

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**RADIOELECTRONICS AND INSTRUMENT-MAKING**УДК 621.383.92
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-349-356>Поступила в редакцию 11.05.2020
Received 11.05.2020**М. А. Асаёнок¹, А. О. Зеневиц¹, О. В. Кочергина¹, Е. В. Новиков¹, С. А. Сорока²**¹*Белорусская государственная академия связи, Минск, Республика Беларусь,*
²*ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Республика Беларусь***РАБОТА КРЕМНИЕВЫХ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ СО СТРУКТУРОЙ $p^+ - p - n^+$ В РЕЖИМЕ ОДНОКВАНТОВОЙ РЕГИСТРАЦИИ**

Аннотация. Изучены условия реализации режима одноквантовой регистрации для кремниевых фотоэлектронных умножителей со структурой $p^+ - p - n^+$ и получены данные об их характеристиках в этом режиме. Приведены структура экспериментальной установки и методика исследований. Выполнены измерения счетных характеристик фотоприемников, таких как зависимости скорости счета однофотонных импульсов, скорости темновых импульсов и отношения сигнал/шум. Представлены зависимости скорости счета однофотонных импульсов от интенсивности оптического излучения, регистрируемого кремниевым фотоэлектронным умножителем. Установлено, что данные зависимости имеют линейный участок, длина которого увеличивается с ростом перенапряжения кремниевых фотоэлектронных умножителей. Также с ростом перенапряжения увеличивается угол наклона линейного участка. Приведены зависимости скорости счета однофотонных и темновых импульсов, а также отношения сигнал/шум от перенапряжения. Получено, что скорость счета темновых импульсов возрастает с увеличением перенапряжения. Установлено, что зависимость отношения сигнал/шум от перенапряжения для этих кремниевых фотоэлектронных умножителей имеет максимум. Для получения максимальной чувствительности исследованных кремниевых фотоэлектронных умножителей необходимо выбирать перенапряжение, соответствующее этому максимуму. В результате сравнения чувствительности исследуемых кремниевых фотоэлектронных умножителей и лавинных фотодиодов установлено, что кремниевые фотоэлектронные умножители, работающие в режиме одноквантовой регистрации, имеют более высокую чувствительность по сравнению с лавинными фотодиодами в этом же режиме работы. С уменьшением температуры данное превосходство сохраняется. Также понижение температуры приводит к уменьшению минимального значения интенсивности регистрируемого оптического излучения. Тем самым доказана возможность работы кремниевых фотоэлектронных умножителей в режиме одноквантовой регистрации. Данные результаты могут применяться в системах квантовой криптографии при приеме оптического сигнала.

Ключевые слова: лавинный фотодиод, кремниевый фотоэлектронный умножитель, режим одноквантовой регистрации, скорость счета однофотонных импульсов, скорость счета темновых импульсов, отношение сигнал/шум, чувствительность

Для цитирования: 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>

Maryna A. Asayonak¹, Andrey O. Zenevich¹, Volha V. Kacharhina¹, Yauhen V. Novikau¹, Syargey A. Saroka²¹*Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Republic of Belarus*
²*State Scientific and Practical Association "Optics, Optoelectronics and Laser Technology", Minsk, Republic of Belarus***OPERATION OF SILICON PHOTOELECTRONIC MULTIPLIERS WITH THE STRUCTURE $p^+ - p - n^+$ IN THE SINGLE QUANTUM REGISTRATION MODE**

Abstract. The conditions for realizing the single-quantum detection mode for silicon photomultiplier tubes with the $p^+ - p - n^+$ structure are studied and data on their characteristics in this mode are obtained. The structure of the experimental setup and the research technique are presented. Measurements of the counting characteristics of the photodetectors, such as the dependences of the counting rate of single-photon pulses, the speed of dark pulses, and the signal-to-noise ratio, have been

performed. The dependences of the counting rate of one-photon pulses on the intensity of optical radiation recorded by a silicon photomultiplier tube are presented. It was found that these dependences had a linear section, the length of which increased with increasing overvoltage of silicon photomultiplier tubes. Also, with an increase in overvoltage, the angle of inclination of the linear section increased. The dependences of the count rate of one-photon and dark pulses, as well as the signal-to-noise ratio on overvoltage, are given. It was found that the counting rate of dark pulses increased with increasing overvoltage. It was found that the dependence of the signal-to-noise ratio on the overvoltage for these silicon photomultiplier tubes has a maximum. To obtain the maximum sensitivity of the studied silicon photomultiplier tubes, it is necessary to select the overvoltage corresponding to this maximum. As a result of comparing the sensitivity of the investigated silicon photomultiplier tubes and avalanche photodiodes, it was found that silicon photomultiplier tubes operating in the single-quantum detection mode have a higher sensitivity compared to avalanche photodiodes in the same operating mode. With a decrease in temperature, this superiority persisted. Also, a decrease in temperature led to a decrease in the minimum value of the intensity of the recorded optical radiation. Thus, the possibility of operation of silicon photomultiplier tubes in the single-quantum registration mode has been proved. These results can be applied in quantum cryptography systems when receiving an optical signal.

Keywords: avalanche photodiode, silicon photoelectronic multiplier, single-quantum registration mode, count rate of single-photon pulses, count rate of dark pulses, signal-to-noise merit, sensitivity

For citation: 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. *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. 3, pp. 349–356 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-349-356>

Введение. В настоящее время фотоприемники, работающие в режиме одноквантовой регистрации, находят широкое применение в системах квантовой криптографии для приема информации, передаваемой отдельными фотонами. При этом под одноквантовым режимом работы понимается такой режим, при котором каждому фотону регистрируемого оптического излучения, который поступил на вход фотоприемника, соответствует один электрический импульс на его выходе.

В системах квантовой криптографии лавинные фотодиоды (ЛФД) используются в качестве приемников оптической информации [1, 2]. Однако ЛФД, работающие в режиме одноквантовой регистрации, неустойчивы к такому типу атак на квантовую систему, как «ослепление» фотоприемника [3]. Эта атака заключается в том, что несанкционированный пользователь полностью перехватывает данные, передаваемые однофотонными импульсами от одного санкционированного пользователя, а другому санкционированному пользователю от себя передает информацию многофотонными импульсами на фоне постоянного оптического излучения. Для ЛФД существует возможность подобрать длительность и амплитуду многофотонного импульса такими, чтобы санкционированным пользователем фотоотклик от этого импульса был воспринят как импульс, сформированный однофотонными импульсами санкционированного пользователя [4]. В связи с этим в квантовых криптографических системах целесообразно использовать фотоприемники, которые могли бы работать в режиме одноквантовой регистрации и обеспечивали устойчивость систем к атакам подобного вида. К таким фотоприемникам относятся кремниевые фотоэлектронные умножители Si-ФЭУ. Отметим, что амплитуда созданного однофотонным импульсом фотоотклика Si-ФЭУ в силу особенностей структуры этих умножителей всегда будет меньше амплитуды, сформированной оптическим импульсом, который содержит два и более фотона [5, 6].

Вместе с тем условия реализации режима одноквантовой регистрации для Si-ФЭУ и их характеристики в данном режиме работы в настоящий момент недостаточно изучены, что и обусловило *цель данной статьи*.

Экспериментальная установка и методика исследований. В качестве объекта исследований использовались опытные образцы Si-ФЭУ со структурой p^+-p-n^+ производства ОАО «Интеграл» (Республика Беларусь). Для проведения измерений из партии в 100 штук случайным образом были выбраны пять Si-ФЭУ.

Блок-схема экспериментальной установки, на которой выполнялись исследования, представлена на рис. 1. Установка функционирует следующим образом. Оптическое излучение постоянной интенсивности от полупроводникового лазера через набор калиброванных нейтральных светофильтров и полупрозрачное зеркало направляется на Si-ФЭУ. Для питания лазера используется источник питания P1. Изменяя коэффициент ослабления набора светофильтров, можно регулировать интенсивность оптического излучения. Полупрозрачное зеркало разделяет оптическое излучение таким образом, что 50 % интенсивности этого излучения поступает на Si-ФЭУ, а 50 % – на лазерный дозиметр ЛД-07, который обеспечивает контроль уровня интенсивности оптического излучения.

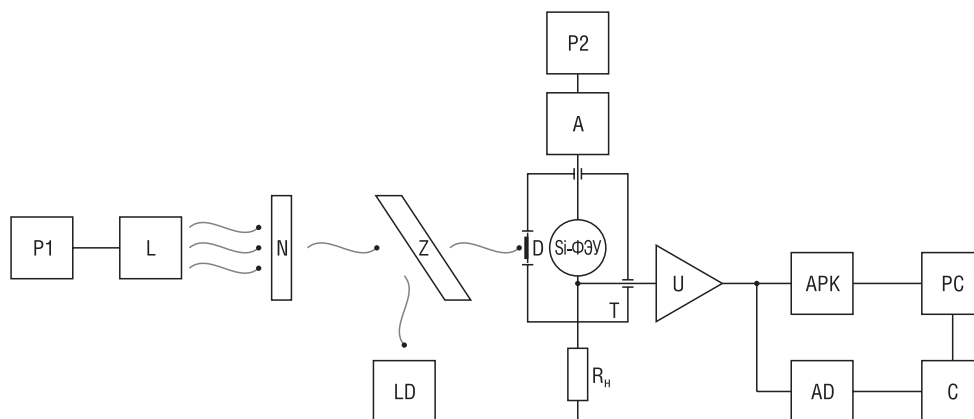


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: P1 – источник питания, P2 – регулируемый источник питания, L – полупроводниковый лазер, N – набор нейтральных светофильтров, Z – полупрозрачное зеркало, LD – лазерный дозиметр, D – диафрагма, T – камера тепла и холода, A – амперметр, U – широкополосный усилитель, АРК – аппаратно-программный комплекс, AD – амплитудный дискриминатор, PC – компьютер, C – частотомер, R_н – резистор нагрузки

Fig. 1. Block diagram of the experimental installation: P1 – power source, P2 – regulated power source, L – semiconductor laser, N – set of neutral filters, Z – half-transmitting mirror, LD – laser dosimeter, D – diaphragm, T – heat and cold chamber, A – ammeter, U – broadband amplifier, АРК – hardware and software complex, AD – amplitude discriminator, PC – personal computer, C – cymometer, R_н – load resistor

Si-ФЭУ располагается в камере тепла и холода, с помощью которой изменяется температура фотоприемника. Камера имеет специальное окно с диафрагмой, через которое оптическое излучение поступает на Si-ФЭУ. Диафрагма позволяет также полностью перекрыть оптическое излучение, поступающее на Si-ФЭУ.

Для реализации режима одноквантовой регистрации на Si-ФЭУ подавалось напряжение питания от регулируемого источника питания P2. Значение напряжения питания устанавливалось близким к напряжению пробоя умножителя.

Si-ФЭУ представляет собой фотоприемник на основе упорядоченного набора отдельных ячеек – *p-n*-переходов, выполненных на общей подложке, и при значениях напряжения питания, близких к напряжению пробоя, поведение каждой ячейки фотоприемника может рассматриваться как индивидуальное. Сигнал каждой ячейки является логическим и не зависит от числа первоначальных носителей заряда, вызвавших срабатывание ячейки. В случае одновременного срабатывания нескольких ячеек сигнал на выходе фотоприемника будет являться суммой сигналов от всех сработавших ячеек.

Срабатывание ячейки может произойти при поглощении фотона регистрируемого оптического излучения или в результате термогенерации в ней свободного носителя заряда. Импульсы, сформированные на выходе Si-ФЭУ при поглощении фотона только в одной ячейке, будем называть однофотонными. Импульсы тока, вызванные термогенерацией носителей заряда в его ячейках, обозначим как темновые.

Амплитуда напряжения на выходе Si-ФЭУ зависит от величины нагрузочного резистора R_н. Сопротивление нагрузочного резистора R_н = 1 кОм соответствовало минимальной величине, при которой возможно формирование однофотонных импульсов с амплитудой, превышающей уровень шума усилителя.

Импульсы напряжения с нагрузочного резистора R_н поступают на вход широкополосного импульсного усилителя U, где они усиливаются и поступают параллельно на входы аппаратно-программного комплекса АРК и амплитудного дискриминатора AD. Аппаратно-программный комплекс позволяет измерять амплитуду и накапливать амплитудное распределение импульсов напряжения, поступающих с выхода усилителя, а также определять среднюю амплитуду импульсов и ее дисперсию.

Дискриминатор AD работает как дифференциальный, выделяя из потока импульсов усилителя лишь те, амплитуда которых находится между уровнями, заданными двумя порогами

амплитудной селекции. Нижний порог располагается на уровне собственных шумов усилителя. Положение верхнего порога подбиралось таким образом, чтобы он выделял только импульсы Si-ФЭУ, сформированные одним фотоном. Значение величины верхнего порога определялось на основе анализа амплитудного распределения импульсов, регистрируемого АРК.

На своем выходе дискриминатор формирует стандартизированные по амплитуде и длительности импульсы, чью частоту следования регистрировал частотомер, данные с которого также передавались в компьютер для обеспечения комплексного анализа результатов измерений, в частности оценки влияния темновых импульсов.

Отметим, что амплитуда и длительность темновых импульсов была близка к амплитуде и длительности однофотонных импульсов. Поэтому для отделения темновых импульсов от однофотонных за одинаковый промежуток времени подсчитывались импульсы, возникающие в Si-ФЭУ при наличии оптического излучения, а затем при его отсутствии. После этого находилась разность между значениями числа импульсов, полученных при наличии и в отсутствие оптического излучения.

В экспериментальной установке предусмотрена возможность замены Si-ФЭУ на другие типы фотоприемников. Это позволяет проводить сравнение характеристик фотоприемников. В качестве фотоприемников, с которыми осуществлялось сравнение Si-ФЭУ в данной работе, выступали лавинные фотодиоды КОФ101. Они достаточно хорошо зарекомендовали себя при работе в режиме однофотонной регистрации [7].

Величина электрического тока, протекающего через фотоприемник, контролировалась амперметром А. Поскольку исследуемые лавинные фотоприемники имели различные напряжения пробоя $U_{пр}$, то для сравнения их характеристик между собой использовалась величина перенапряжения $\Delta U = U - U_{пр}$, где U – напряжение питания фотоприемника. Напряжения пробоя лавинных фотоприемников определялись по их вольт-амперной характеристике в соответствии с методикой работы [6].

Исследования проводились при температурах от 203 до 303 К, поскольку именно в этом диапазоне температур наиболее часто эксплуатируются Si-ФЭУ. Длина волны оптического излучения равнялась 650 нм, что соответствовало максимуму спектральной чувствительности изучаемых Si-ФЭУ. Для исследования был выбран диапазон перенапряжений $\Delta U = -0,15 \div 0,25$ В. Это связано с тем, что при $\Delta U < -0,15$ В однофотонные импульсы в Si-ФЭУ не формировались. При $\Delta U > 0,25$ В значительно возрастает электрический ток, протекающий через Si-ФЭУ, что могло привести к тепловому пробую умножителя.

Результаты измерения и их обсуждение. Выполненные измерения показали, что при напряжениях питания близких, соответствующих и превышающих напряжение пробоя $U_{пр}$, на нагрузочном резисторе R_n формировались однофотонные импульсы со средней амплитудой 13 мВ и длительностью 1,5–2,1 мкс для рабочей температуры Si-ФЭУ $T = 293$ К. Длительность фронта нарастания этих импульсов не превышала 0,26 мкс и практически не изменялась от температуры. Длительность спада τ_c импульсов зависела от температуры и уменьшалась с ростом T . Так, при температуре $T = 203$ К длительность спада импульсов была равна $\tau_c = 0,50$ мкс, для $T = 303$ К $\tau_c = 0,35$ мкс. Такое уменьшение длительности спада было связано со снижением сопротивления Si-ФЭУ R_{Si} с ростом температуры. Отметим, что для температуры $T = 203$ К значение сопротивления $R_{Si} = 5,9$ кОм, а для $T = 303$ К $R_{Si} = 1,5$ кОм.

Средняя амплитуда импульсов на выходе усилителя увеличивалась с уменьшением температуры, и при $T = 203$ К ее значение составляло 31 мВ. Увеличение амплитуды импульсов связано с ростом коэффициента усиления Si-ФЭУ при уменьшении температуры [8]. Отметим, что зависимость амплитуды импульсов от температуры была линейной. Величина отношения изменения средней амплитуды импульсов ΔA к изменению температуры ΔT составляла $\Delta A / \Delta T = -0,18$ мВ/К.

Для определения возможности реализации режима однофотонной регистрации для Si-ФЭУ исследовались зависимости скорости счета однофотонных импульсов n_c на выходе умножителя от интенсивности регистрируемого оптического излучения J . Под n_c понимается количество однофотонных импульсов, зарегистрированных за единицу времени. На рис. 2 представлены зависимости n_c от J для разных перенапряжений ΔU , полученные при температуре 293 К.

Как видно из рис. 2, данные зависимости имеют линейный участок, наличие которого свидетельствует, что Si-ФЭУ могут работать в режиме однофотонной регистрации при значениях J , соответствующих данному участку.

Возрастание перенапряжения Si-ФЭУ приводило к увеличению длины линейного участка зависимости n_c от J . Отметим, что диапазон линейности определялся по 5%-ному отклонению зависимости от линейной. Так, для $\Delta U = -0,1$ В диапазон линейности был равен $n_c = (0 \div 4,0) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ и максимальное значение интенсивности, соответствующее этому диапазону, составляло $J_{\max} = 0,2 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/см}^2$. Для $\Delta U = 0,0$ В диапазон линейности $n_c = (0 \div 1,3) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ и $J_{\max} = 0,5 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/см}^2$; для $\Delta U = 0,1$ В диапазон линейности $n_c = (0 \div 2,0) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ и $J_{\max} = 0,6 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/см}^2$; для $\Delta U = 0,2$ В диапазон линейности $n_c = (0 \div 2,6) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ и $J_{\max} = 0,7 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/см}^2$. Увеличение длины линейного участка связано с тем, что с ростом ΔU уменьшается постоянная времени Si-ФЭУ, которая зависит от сопротивления и собственной емкости фотоприемника [6]. Отметим, что для $\Delta U \leq 0,0$ В сопротивление и собственная емкость Si-ФЭУ уменьшались с ростом напряжения питания. При напряжениях питания, превышающих напряжение пробоя, значение сопротивления оставалось постоянным, а собственная емкость Si-ФЭУ незначительно уменьшалась.

Также с ростом ΔU увеличивался угол наклона линейного участка зависимости скорости счета однофотонных импульсов от интенсивности оптического излучения. Это связано с тем, что с ростом перенапряжения увеличивается квантовая эффективность регистрации Si-ФЭУ. Понижение температуры не приводило к изменению угла наклона линейного участка при постоянных значениях ΔU .

Скорость счета однофотонных импульсов при постоянных J и ΔU оставалась неизменной во всем рассматриваемом интервале температур. Это свидетельствует о том, что для данных Si-ФЭУ квантовая эффективность регистрации не зависит от T в исследуемом диапазоне температур.

На рис. 3 представлены зависимости скорости счета темновых и однофотонных импульсов, а также отношения сигнал/шум от величины перенапряжения ΔU .

Зависимости скорости счета импульсов и отношения сигнал/шум представлены для постоянных значений температуры $T = 293$ К и интенсивности оптического излучения $J = 0,7 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/см}^2$. Отметим, что для интенсивностей $J \leq 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/см}^2$ эти зависимости были аналогичными. Для интенсивностей $J > 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/см}^2$ измерения не выполнялись, так как начинало наблюдаться насыщение во всем исследуемом диапазоне перенапряжений.

С увеличением перенапряжения возрастала скорость счета темновых импульсов n_t (см. рис. 3). При значениях перенапряжений $\Delta U \leq 0,0$ В скорость счета темновых импульсов

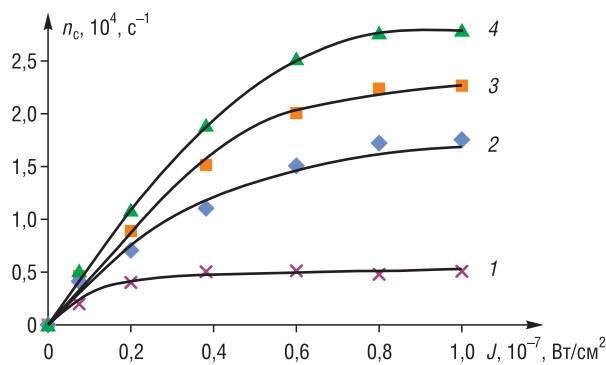


Рис. 2. Зависимости скорости счета однофотонных импульсов n_c от интенсивности регистрируемого оптического излучения: 1 – для перенапряжения $\Delta U = -0,1$ В; 2 – для перенапряжения $\Delta U = 0,0$ В; 3 – для перенапряжения $\Delta U = 0,1$ В; 4 – для перенапряжения $\Delta U = 0,2$ В

Fig. 2. Dependences of the count rate of single-photon pulses n_c on the intensity of the detected optical radiation: 1 – for overvoltage $\Delta U = -0.1$ V; 2 – for overvoltage $\Delta U = 0.0$ V; 3 – for overvoltage $\Delta U = 0.1$ V; 4 – for overvoltage $\Delta U = 0.2$ V

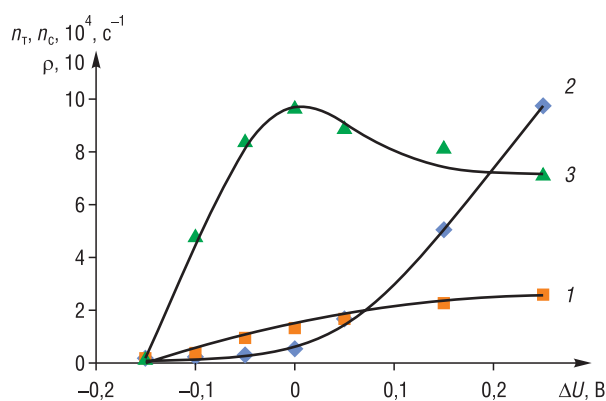


Рис. 3. Зависимости скорости счета однофотонных, темновых импульсов и отношения сигнал/шум от перенапряжения: 1 – скорость счета однофотонных импульсов, 2 – скорость счета темновых импульсов, 3 – отношение сигнал/шум

Fig. 3. Dependences of the counting speed of single-photon, dark pulses and the signal-to-noise ratio from overvoltage: 1 – count rate of single-photon pulses, 2 – count rate of dark pulses, 3 – signal-to-noise merit

Si-ФЭУ не превышала $5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$. Дальнейшее возрастание перенапряжения приводило к более значительному увеличению скорости счета темновых импульсов по сравнению с $\Delta U \leq 0,0 \text{ В}$. Так, при $\Delta U = 0,1 \text{ В}$ $n_T = 3,1 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, а для $\Delta U = 0,2 \text{ В}$ n_T возрастала до $7,5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$. Такое поведение зависимости n_T от ΔU можно объяснить различием в напряжениях пробоя каждого из p - n -переходов Si-ФЭУ, которые близки между собой, но не одинаковы. Поэтому при значениях напряжения питания $\Delta U \leq 0,0 \text{ В}$ для меньшего числа p - n -переходов напряжение питания Si-ФЭУ будет превосходить напряжения их пробоя. Отметим, что только эти p - n -переходы смогут сформировать темновые импульсы. При $\Delta U > 0,0 \text{ В}$ для большего количества p - n -переходов напряжение питания Si-ФЭУ начинает превосходить напряжения их пробоя.

Также с ростом перенапряжения увеличивается объем области, в которой происходит лавинообразное размножение носителей заряда [6]. Увеличение этой области приводит к тому, что в нее может попадать все большее число термогенерированных носителей заряда, что обуславливает рост вероятности появления темновых импульсов, а следовательно, увеличение значения n_T .

Уменьшение температуры при постоянном значении ΔU приводило к снижению скорости счета темновых импульсов. Это обусловлено тем, что при уменьшении температуры уменьшается число термогенерированных свободных носителей заряда и вероятность вызвать темновой импульс становится меньше, а значит, снижается и скорость счета темновых импульсов.

Зависимость между n_T и T имела близкий к линейному вид. Так, для $\Delta U = 0,1 \text{ В}$ при $T = 303 \text{ К}$ $n_T = 3,5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, при $T = 203 \text{ К}$ $n_T = 1,2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, а величина отношения изменения скорости счета темновых импульсов тока Δn_T к изменению температуры ΔT составляла $\Delta n_T / \Delta T = 230 \text{ с}^{-1} / \text{К}$. Увеличение перенапряжения приводило к уменьшению отношения $\Delta n_T / \Delta T$. Например, при $\Delta U = 0,2 \text{ В}$ величина соотношения равнялась $\Delta n_T / \Delta T = 116 \text{ с}^{-1} / \text{К}$.

Увеличение перенапряжения приводило к росту скорости счета однофотонных импульсов n_c в интервале перенапряжений $\Delta U = -0,1 \div 0,05 \text{ В}$ (см. рис. 3). При $\Delta U > 0,05 \text{ В}$ наблюдалось насыщенные зависимости n_c от ΔU .

Отношение сигнал/шум ρ определялось по формуле $\rho = \frac{n_c}{\sqrt{n_c + n_T}}$. Зависимость ρ от перена-

пряжения имеет максимум (см. рис. 3), который соответствовал перенапряжению $\Delta U = 0,0 \text{ В}$. Для этого значения перенапряжения $n_c > n_T$ и разность между скоростями счета однофотонных и темновых импульсов была наибольшей.

Рост зависимости отношения сигнал/шум от перенапряжения для значений $\Delta U \leq 0,0 \text{ В}$ связан с тем, что при этих перенапряжениях наблюдалось увеличение разности между скоростями счета однофотонных и темновых импульсов. Для $\Delta U > 0,0 \text{ В}$ эта разность уменьшалась. Таким образом, наблюдался спад зависимости ρ от ΔU .

Понижение температуры приводило к увеличению значения ρ , соответствующего максимуму зависимости отношения сигнал/шум от перенапряжения. Так, для $T = 303 \text{ К}$ отношение сигнал/шум составило $\rho = 96$, а для $T = 203 \text{ К}$ равнялось $\rho = 192$. При этом смещение максимума зависимости ρ от ΔU не происходило. Увеличение значения ρ , соответствующее максимуму этой зависимости, с понижением температуры обусловлено тем, что n_T уменьшается при снижении температуры. Для получения максимальной чувствительности Si-ФЭУ необходимо выбирать перенапряжение, соответствующее этому максимуму.

Также выполнено сравнение чувствительности Si-ФЭУ и кремниевых ЛФД. При сравнении чувствительности фотоприемников определялось минимальное значение интенсивности оптического излучения J_{\min} , которое они могли зарегистрировать. Так, для $T = 303 \text{ К}$ и максимума отношения сигнал/шум для этих фотоприемников минимальные значения интенсивности оптического излучения составляли следующие значения: $J_{\min} = 0,8 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/см}^2$ для Si-ФЭУ и $J_{\min} = 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/см}^2$ для ЛФД. Понижение температуры до 203 К приводило к уменьшению минимального значения интенсивности оптического излучения, и для Si-ФЭУ $J_{\min} = 0,2 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/см}^2$, а для ЛФД $J_{\min} = 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/см}^2$. Таким образом, Si-ФЭУ имеют более высокую чувствительность по сравнению с ЛФД.

Чувствительность Si-ФЭУ в режиме одноквантовой регистрации более чем в 10 раз превосходила его чувствительность в токовом режиме. Значение минимальной регистрируемой интенсивности в токовом режиме при температуре $T = 303 \text{ К}$ и максимуме отношения сигнал/шум составляло $0,9 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/см}^2$. С уменьшением температуры данное превосходство увеличивалось.

Заклучение. Показана возможность работы кремниевых фотоэлектронных умножителей со структурой $p^+ - p - n^+$ производства ОАО «Интеграл» в режиме одноквантовой регистрации.

Установлено, что зависимость отношения сигнал/шум от перенапряжения для этих кремниевых фотоэлектронных умножителей имеет максимум. Для получения максимальной чувствительности исследованных кремниевых фотоэлектронных умножителей необходимо выбирать перенапряжение, соответствующее этому максимуму.

Показано, что исследованные кремниевые фотоэлектронные умножители, работающие в режиме одноквантовой регистрации, обладают более высокой чувствительностью по сравнению с кремниевыми лавинными фотодиодами КОФ101 в этом же режиме работы.

Полученный результат можно использовать в системах квантовой криптографии при передаче оптических данных.

Список использованных источников

1. Квантовая криптография: идеи и практика / С.Я. Килин [и др.]; под ред. С.Я. Килина, Д.Б. Хорошко, А.П. Низовцева. – Минск: Белорус. наука, 2007. – 391 с.
2. Hacking commercial quantum cryptography systems by tailored bright illumination / L. Lydersen [et al.] // *Nature Photonics*. – 2010. – Vol. 4, № 10. – P. 686–689. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2010.214>
3. Василиу, Е.В. Квантовые системы обеспечения информационной безопасности: учеб.-метод. пособие / Е.В. Василиу, И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич. – Минск: Белорус. гос. акад. связи, 2019. – 216 с.
4. Исследование двухрежимной работы лавинных фотодиодов при регистрации оптического излучения / О.Ю. Горбадей [и др.] // *Приборы и техника эксперимента*. – 2019. – №2. – С. 81–85. <https://doi.org/10.1134/S0032816219020113>
5. Towards Optical Partial Discharge Detection with Micro Silicon Photomultipliers / Ming Ren [et al.] // *Sensors*. – 2017. – Vol. 17, № 11. – P. 2595. <https://doi.org/10.3390/s17112595>
6. Гулаков, И.Р. Фотоприемники квантовых систем / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич. – Минск: УО ВГКС, 2012. – 276 с.
7. Исследование статистического распределения одноквантовых импульсов лавинных фотоприемников / И.Р. Гулаков [и др.] // *Приборы и техника эксперимента*. – 2010. – №4. – С. 92–97.
8. Асаёнок, М.А. Температурные характеристики кремниевых фотоэлектронных умножителей / М.А. Асаёнок, А.О. Зеневич, О.Ю. Горбадей // *Доклады БГУИР*. – 2018. – №2 (112). – С. 54–58.

References

1. Kilin S. Ya., Khoroshko D. B., Nizovtsev A. P., eds. *Quantum Cryptography: Ideas and Practice*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2007. 391 p. (in Russian).
2. Lydersen L., Wiechers C., Wittmann C., Elser D., Skaar J., Makarov V. Hacking commercial quantum cryptography systems by tailored bright illumination. *Nature Photonics*, 2010, vol. 4, no. 10, pp. 686–689. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2010.214>
3. Vasiliu E. V., Gulakov I. R., Zenevich A. O. *Quantum Systems for Ensuring Information Security*. Minsk, Belarusian State Academy of Communications, 2019. 216 p. (in Russian).
4. Gorbadey O. Y., Zenevich A. O., Novikov E. V., Goibov S. A. Investigation of the two-mode operation of avalanche photodiodes in the registration of optical radiation. *Instruments and Experimental Techniques*, 2019, vol. 62, no. 2, pp. 81–85. <https://doi.org/10.1134/s0020441219020106>
5. Ming Ren, Jierui Zhou, Bo Song, Chongxing Zhang, Ming Dong, Albarracín R. Towards Optical Partial Discharge Detection with Micro Silicon Photomultipliers. *Sensors*, 2017, vol. 17, no. 11, p. 2595. <https://doi.org/10.3390/s17112595>
6. Gulakov I. R., Zenevich A. O. *Photodetectors of Quantum Systems*. Minsk, Higher State College of Communications, 2012. 276 p. (in Russian).
7. Gulakov I. R., Zalesky V. B., Zenevich A. O., Korytko N. N., Malyshev V.S. Investigation of the statistical distribution of single-quantum pulses of avalanche photodetectors. *Instruments and Experimental Techniques*, 2010, vol. 53, no. 4, pp. 92–97. <https://doi.org/10.1134/s0020441210040159>
8. Asayonak M. A., Gorbadey O. Y., Zenevich A. O. Temperature characteristics of silicon photoelectronic multipliers. *Doklady BGUIR*, 2018, no. 2 (112), pp. 54–58 (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

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

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

Кочергина Ольга Викторовна – аспирант, Белорусская государственная академия связи (ул. Ф. Скорины, 8/2, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: o.kochergina@bsac.by

Новиков Евгений Владимирович – кандидат технических наук, доцент, директор Института 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 (Логойский тракт, 22, 220090, Минск, Республика Беларусь). E-mail: soroca@oelt.basnet.by

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

Volha V. Kocharhina – Postgraduate Student, Belarusian State Academy of Communications (8/2, F. Skorina Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: o.kochergina@bsac.by

Yauhen V. Novikau – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Director of the Institute of Modern Communication Technologies of 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