

Исследование пропускной способности оптического канала связи с приемником информации в виде кремниевого фотоэлектронного умножителя в условиях фоновой засветки

И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина

Исследована пропускная способность оптического канала связи с приемником информации в виде кремниевого фотоэлектронного умножителя (Si-ФЭУ) в условиях фоновой засветки. Представлены зависимости пропускной способности оптического канала связи от уровня фоновой засветки, а также определены уровни фоновой засветки, необходимой для «ослепления» фотоприемника от перенапряжения. Показано, что использование светофильтра с длиной волны 470 нм, соответствующего максимуму спектральной чувствительности Si-ФЭУ, позволяет восстановить информационный сигнал после «ослепления». Полученные результаты могут быть использованы при разработке оптических систем связи.

Ключевые слова: кремниевый фотоэлектронный умножитель, пропускная способность, оптический канал связи, технология *Li-Fi*.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-1-28-33

Введение

В настоящее время начинает развиваться такая технология передачи данных как *Li-Fi* [1–3]. Эта технология использует для передачи данных оптическое излучение видимого диапазона с длинами волн от 380 до 780 нм, в открытом пространстве без волновода в качестве канала связи [3]. В связи с этим при реализации данной технологии требуются фотоприемники чувствительные к оптическому излучению в видимом диапазоне длин волн. Высокую чувствительность в таком диапазоне длин волн имеют вакуумные фотоэлектронные умножители. Однако, эти фотоприемники

имеют большие габариты, высокие напряжения питания (> 1000 В) и являются достаточно хрупкими. Хорошо зарекомендовали себя однопиксельные лавинные фотоприемники. Однако максимум спектральной чувствительности большинства однопиксельных лавинных фотоприемников находится в ближней инфракрасной области спектра, и они имеют малые коэффициенты усиления $10^2 \div 10^3$. Хорошей альтернативой вакуумным фотоэлектронным умножителям являются многопиксельные лавинные фотоприемники. Это связано с тем, что они имеют малые габариты, низкое напряжение питания, высокую чувствительность в видимой области спектра, большую площадь фоточувствительной поверхности. Многопиксельные лавинные фотоприемники получили название кремниевые фотоэлектронные умножители (Si-ФЭУ) [4–6].

При реализации технологии *Li-Fi* на фотоприемник помимо информационного сигнала может поступать нежелательное фоновое излучение, вызванное естественным освещением помещения, временем суток, излучением других оконечных устройств и так далее. Фо-

Гулаков Иван Романович, д. ф.-м.н., профессор.

E-mail: i.gulakov@bsac.by

Зеневич Андрей Олегович, д.т.н., ректор.

E-mail: a.zenevich@bsac.by

Кочергина Ольга Викторовна, аспирант.

E-mail: o.kochergina@bsac.by

УО «Белорусская государственная академия связи».

Республика Беларусь, 220114, г. Минск,

ул. Ф. Скорины, 8/2.

Статья поступила в редакцию 16 ноября 2021 г.

© Гулаков И. Р., Зеневич А. О., Кочергина О. В., 2022

новое излучение приводит к снижению отношения сигнал/шум и как следствие уменьшению скорости передачи информации.

Таким образом, целью этой статьи является определить влияние фонового излучения на пропускную способность канала связи с приемником информации в виде кремниевого фотозлектронного умножителя, а также выработать подходы к минимизации воздействия фонового излучения на скорость передачи информации.

Экспериментальная установка и методика исследования

Объектами исследований являлись опытные образцы Si-ФЭУ с p^+p-n^+ -структурой производства ОАО «Интеграл» (Республика Беларусь), серийно выпускаемые Si-ФЭУ *Кетек РМ 3325* и *ON Semi FC 30035*. На рис. 1 представлена структурная схема экспериментальной установки, на которой были проведены исследования.

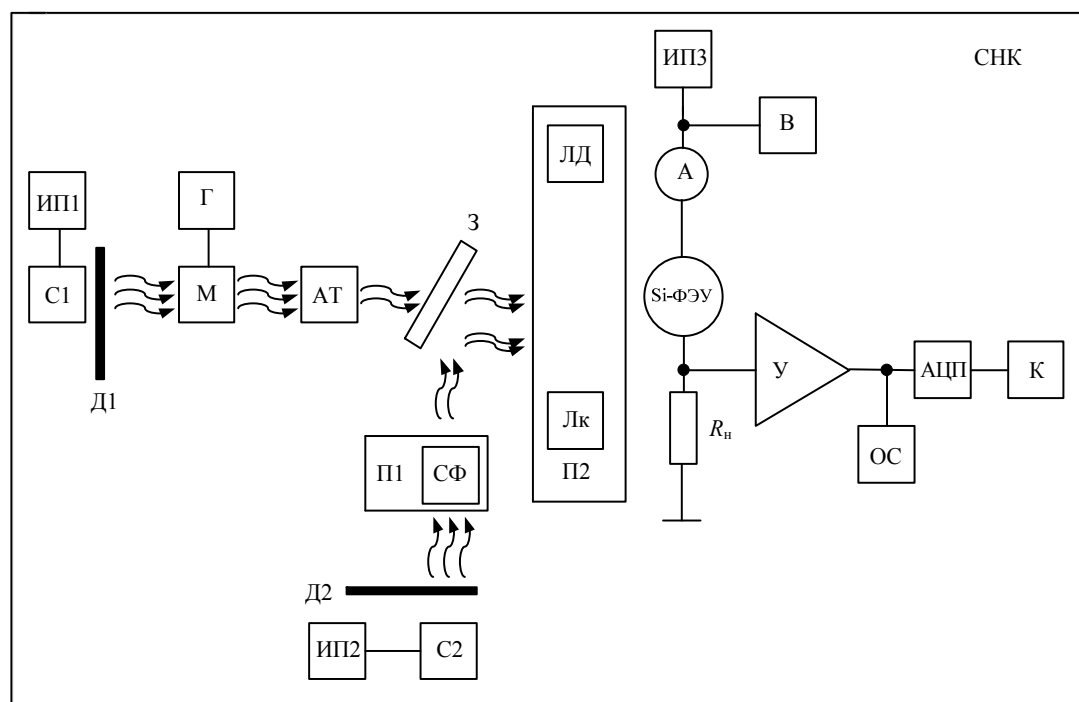


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: С1 и С2 – светодиоды; М – модулятор; Г – генератор прямоугольных импульсов; АТ – аттенюатор; ЛД – лазерный дозиметр; Лк – люксметр; СФ – светофильтр; Д1 и Д2 – диафрагмы; ИП1, ИП2 и ИП3 – источники питания; П1 и П2 – механические платформы; А – амперметр; В – вольтметр; У – усилитель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; К – компьютер; R_n – сопротивление нагрузки; Si-ФЭУ – кремниевый фотоприемник; СНК – светонепроницаемая камера; ОС – осциллограф

В экспериментальной установке в качестве источника оптического излучения используется светодиод С1 с излучением 470 нм. Данная длина волны была выбрана поскольку она соответствовала максимуму спектральной чувствительности исследуемых Si-ФЭУ. Питание светодиода С1 осуществляется от источника постоянного напряжения ИП1. Оптическое излучение через диафрагму Д1 поступает на модулятор М, где модулируется путем подачи на управляющий вход модулятора прямоугольных электрических импульсов. Длительность электрических импульсов изменяется от 50 до 1000 нс, а частота их следования составляет $10^4 \div 10^7$ Гц. Диафрагма Д1

используется для перекрывания оптического излучения, поступающего на модулятор М.

Во время электрического импульса на управляющем входе модулятора М оптическое излучение поступает на вход аттенюатора АТ. Аттенюатор АТ использовался для ослабления мощности оптического излучения. Коэффициент ослабления мощности оптического излучения изменяется в диапазоне от 1 до 10^5 раз. С выхода аттенюатора АТ оптическое излучение через полупрозрачное зеркало 3 поступает на Si-ФЭУ (см. рис. 1).

Питание Si-ФЭУ осуществляется от источника постоянного напряжения питания ИП3. Напряжение, приложенное к Si-ФЭУ

$U_{\text{пит}}$ контролируется вольтметром В. Величина электрического тока, протекающего через Si-ФЭУ, измеряется амперметром А.

Последовательно с Si-ФЭУ включен резистор нагрузки R_n . Под воздействием оптического излучения изменяется электрический ток, протекающий через Si-ФЭУ. В результате чего на резисторе нагрузки R_n формируются импульсы напряжения. Эти импульсы усиливаются усилителем У и поступают на аналогово-цифровой преобразователь АЦП. Вид электрических импульсов на выходе усилителя контролируется осциллографом ОС. При помощи АЦП электрические импульсы оцифровываются. После чего данные с выхода АЦП передаются в компьютер К. Программное обеспечение компьютера позволяет вычислять среднюю амплитуду пиковых значений электрических импульсов U_n и их среднее квадратическое отклонение, а также пропускную способность канала связи.

Вычисление максимальной скорости передачи (пропускной способности) S , вычисляется на основании формулы Шеннона [7]:

$$S = \frac{1}{2\pi RC} \log_2 \left(1 + \frac{U_n^2}{2\sigma^2} \right), \quad (1)$$

где U_n – среднее значение пикового напряжения сигнала, σ – среднее квадратическое отклонение напряжения шума, C – емкость Si-ФЭУ, R – последовательное сопротивление фотоприемника.

Значения емкости Si-ФЭУ и его последовательное сопротивление заносится в компьютер К перед началом измерений.

Фоновая засветка (излучение) создается с помощью светодиода С2 с излучением белого света. Питание светодиода С2 осуществляется источником питания ИП2. Фоновое излучение от светодиода С2 поступает на полупрозрачное зеркало З, отражается от него и направляется на Si-ФЭУ (см. рис. 1). Наличие или отсутствие фоновой засветки, поступающей Si-ФЭУ, регулируется диафрагмой Д2.

При помощи механической платформы П1 на пути распространения фонового излучения может устанавливаться светофильтр СФ. Светофильтр СФ выделяет из фоновой засветки излучение с длиной волны 420÷520 нм.

Если диафрагмы Д1 и Д2 закрыты, то амперметр А регистрирует темновой ток I_T , то есть ток, протекающий через Si-ФЭУ в отсутствие оптического излучения. Если открыта диафрагма Д1, то амперметр регистрирует общий информационный ток $I_{\text{тс}}$. Если открыты обе диафрагмы, то амперметр регистрирует ток, обусловленный влиянием информационного сигнала и фоновой засветки $I_{\text{фс}}$. В процессе измерений определялась величина фототока, вызванного информационным сигналом и фоновой засветкой Si-ФЭУ как разность $I_{\text{фс}} = I_{\text{тс}} - I_T$.

Вся экспериментальная установка помещается в светонепроницаемую камеру СНК.

Измерение энергетической экспозиции оптических импульсов выполняется лазерным дозиметром ЛД. Для этого диафрагмой Д2 перекрывается фоновое излучение, а при помощи механической платформы на пути распространения оптического излучения устанавливается лазерный дозиметр (см. рис. 1).

Измерение освещенности создаваемой фоновым излучением без светофильтра осуществляется люксметром Лк. Для этого диафрагмой Д1 перекрывается оптическое излучение от светодиода С1, а при помощи механической платформы на пути отраженного от зеркала З фонового излучения устанавливается люксметр Лк (см. рис. 1).

С помощью генератора прямоугольных импульсов Г и модулятора М длительность оптических импульсов подбиралась такой, при которой обеспечивается максимальная скорость передачи информации в отсутствие фоновой засветки.

Поскольку исследуемые Si-ФЭУ имели различные напряжения пробоя $U_{\text{пр}}$, то для сравнения их характеристик между собой используется величина перенапряжения, определяемая следующим образом: $\Delta U = U_{\text{пит}} - U_{\text{пр}}$.

Напряжение пробоя $U_{\text{пр}}$ определяется по вольт-амперной характеристике Si-ФЭУ при закрытой диафрагме Д по методике, описанной в работе [8].

Исследование проводилось при температуре окружающей среды 293 К.

Результаты измерения и их обсуждение

Выполненная оценка напряжений пробоя исследуемых кремниевых фотоэлектрон-

ных умножителей показала, что они имеют следующие значения: $U_{пр} = 27,0$ В для *Кетек РМ 3325*; $U_{пр} = 24,7$ В для *ON Semi FC 30035*; $U_{пр} = 37,5$ В для Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл».

В процессе проведенных исследований было получено, что максимальную скорость передачи данных удастся достичь при перенапряжении фотоприемников $\Delta U = 0,0$ В. Так при энергетической экспозиции импульса $H = 10^{-11}$ Дж/см² удастся получить следующие значения пропускной способности канала связи с Si-ФЭУ: $S = 40$; 59 и 72 Мбит/с для *Кетек РМ 3325*; *ON Semi FC 30035* и Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл» соответственно. Рост величины фоновой засветки Si-ФЭУ приводил к уменьшению пропускной способности. Это подтверждается зависимостью пропускной способности от величины фоновой засветки, представленной на рис. 2. Данная зависимость получена для $\Delta U = 0,0$ В и энергетической экспозиции импульса $H = 10^{-11}$ Дж/см². Как видно из представленных зависимостей при значениях фоновой засветки больше 100; 80 и 40 Лк для *Кетек РМ 3325*, *ON Semi FC 30035* и Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл» соответственно, скорость передачи данных становится равной нулю. Такое поведение этой зависимости связано с тем, что с ростом фоновой засветки увеличивается уровень дробового шума в фотоприемнике, а также уменьшается коэффициент усиления фототока [9]. Это приводит к уменьшению значения отношения сигнал/шум [9] и как следствие понижению скорости передачи данных.

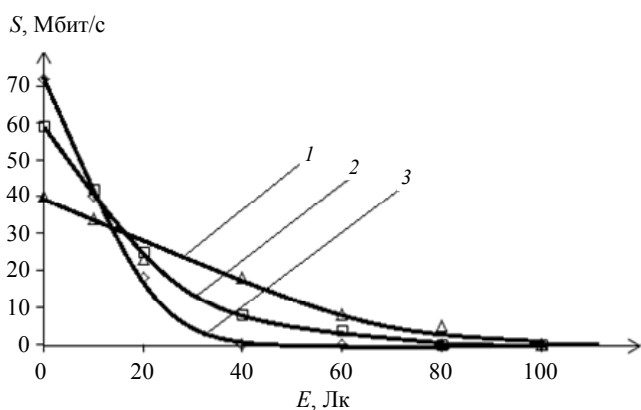


Рис. 2. Зависимость пропускной способности от фоновой засветки: 1 – *Кетек РМ 3325*; 2 – *ON Semi FC 30035*; 3 – Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл»

Далее величину фоновой засветки, при которой скорость передачи данных становится равной нулю, будем называть «ослеплением» фотоприемника [10]. Так для «ослепления» при $\Delta U = 0,0$ В требовалось меньшее значение фоновой засветки для Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл», чем для *ON Semi FC 30035* и *Кетек РМ 3325*.

На рис. 3 представлена зависимость «ослепления» Si-ФЭУ от величины перенапряжения. Данная зависимость получена для энергетической экспозиции импульса $H = 10^{-11}$ Дж/см². Как видно из полученных зависимостей рост перенапряжения приводит к тому, что для «ослепления» фотоприемника требуется большее значение фоновой освещенности. При увеличении перенапряжения увеличивается напряженность поля в области пространственного заряда. Поэтому для компенсации увеличенного значения напряжённости электрического поля требуется большее количество свободных носителей заряда, сформированных фоновой засветкой. При перенапряжении $\Delta U = 0,6$ В значения освещенности, позволяющие ослепить Si-ФЭУ, составили $E_{осл} = 180$; 160 и 70 Лк для *Кетек РМ 3325*, *ON Semi FC 30035* и Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл» соответственно. При этом величина тока, протекающего через фотоприемник, составила $I_{осл} = 268$; 170 и 109 мкА для *Кетек РМ 3325*, *ON Semi FC 30035* и Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл» соответственно.

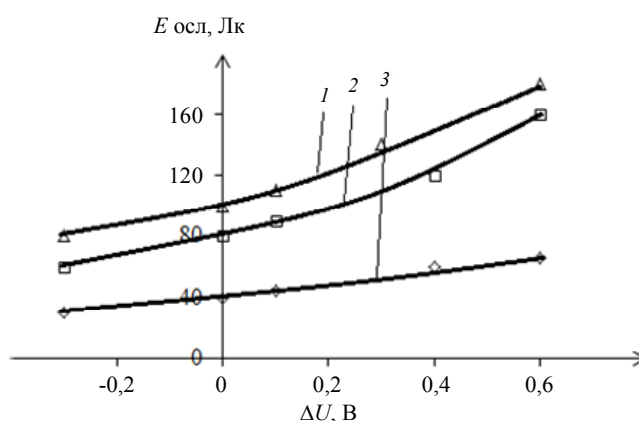


Рис. 3. Зависимость фоновой освещенности, достаточной для ослепления фотоприемника, от перенапряжения: 1 – *Кетек РМ 3325*; 2 – *ON Semi FC 30035*; 3 – Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл»

Таким образом, при «ослеплении» Si-ФЭУ для $\Delta U = 0,0$ В восстановить передачу данных возможно путем увеличения перенапряжения.

Так при «ослеплении» фоновой засветкой 120 Лк восстановление передачи данных наблюдается при увеличении перенапряжения до следующих значений: $\Delta U = 7,7; 4,8; 5,5$ В для Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл», *Кетек PM 3325* и *ON Semi FC 30035* соответственно. При этом фототок, соответствующий восстановленному сигналу, составил 1320 мкА для Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл», 1930 мкА для *Кетек PM 3325* и 1710 мкА для *ON Semi FC 30035*. Отметим, что при таких значениях электрического тока долгая эксплуатация Si-ФЭУ может привести к выходу их из строя.

Для уменьшения влияния фоновой засветки был использован светофильтр, который позволяет из фонового излучения выделить оптическое излучения с длиной волны 470 нм, что соответствует максимуму спектральной

чувствительности Si-ФЭУ. Результаты исследования приведены в таблице. Величина фоновой засветки, из которой выделялось оптическое излучение с длиной волны 470 нм, соответствовала «ослеплению» Si-ФЭУ для $\Delta U = 0,0$ В. Энергетическая экспозиция оптического импульса для каждого Si-ФЭУ выбиралась такой, для которой удавалось получить максимальную скорость передачи в отсутствии фоновой засветки.

Как следует из данных, представленных в таблице, применение светофильтра приводит к уменьшению фототока, вызванного фоновой засветкой. Так для значений фоновой засветки белым светом, при которых наступало «ослепление», при использовании светофильтра происходит восстановление передачи данных.

Таблица

Характеристики кремниевых фотозлектронных умножителей

Тип Si-ФЭУ	Энергетическая экспозиция, Дж/см ²	Фоновая засветка, Лк	Фототок от фоновой засветки, мкА	Фототок от фоновой засветки при наличии светофильтра, мкА	Скорость передачи информации восстановленного сигнала, Мбит/с
Кетек PM 3325	10 ⁻¹¹	100	152,0	38,8	30
ON Semi FC 30035		88	148,6	63,0	37
Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл»		40	78,2	32,0	41

Использование светофильтра позволяет осуществить передачу данных при значительно больших значениях фоновой засветки, чем без него. Так при использовании светофильтра скорость передачи $S = 30; 37$ и 41 Мбит/с для *Кетек PM 3325*, *ON Semi FC 30035* и Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл» можно получить при $E = 395; 210$ и 100 Лк соответственно.

Также необходимо отметить, что полного восстановления скорости передачи до значений полученных при отсутствии фоновой засветки достичь не удалось ни при использовании светофильтра, ни при увеличении перенапряжения.

Заключение

Получено, что увеличение фоновой засветки Si-ФЭУ приводило к уменьшению скорости передачи данных. Наименьшее значение фоновой засветки, при которой прекращается передача данных для перенапря-

жения 0,0 В соответствовало Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл», а наибольшее – *Кетек PM 3325*.

Установлено, что для более высоких перенапряжений требуется большее значение фоновой освещенности, при которой прекращается передача данных, чем для малых перенапряжений.

Показано, что использование светофильтра с длиной волны 470 нм, соответствующего максимуму спектральной чувствительности Si-ФЭУ, позволяет восстановить скорость передачи данных после его ослепления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Arya V., Priya P., Resma Omanakuttan, Shilby Baby // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. 2015. Vol. 4. Iss. 4. P. 2340.
2. Anurag Sarkar, Shalabh Agarwal // International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies. 2015. Vol. 3. Iss. 6. P. 1.

3. Макаренко В. // ЭКиС. Новые технологии. 2020. № 1. С. 46.

4. Van Dam H., Seifert S., Vinke R., Dendooven P., Löhner H., Beekman F. J., D. R. Schaart // Transactions on nuclear science. 2010. Vol. 57. № 4. P. 2254.

5. Modi M. N., Daie K., Turner G. C., Podgorski K. // Optics Express. 2019. Vol. 27. № 24/25. P. 35830.

6. Клемин С., Кузнецов Ю., Филатов Л., Бужан П., Долгошеин Б., Ильин А., Попова Е. // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2007. № 8. С. 80.

7. Шубин В. В. Информационная безопасность волоконно-оптических систем. – Саров: Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, 2015.

8. Гулаков И. Р., Зеневич А. О. Фотоприемники квантовых систем. – Минск: УО ВГКС, 2012.

9. Асаёнок М. А., Зеневич А. О. // Прикладная физика. 2018. № 6. С. 49.

10. Гулаков И. Р., Зеневич А. О., Кочергина О. В., Новиков Е. В., Гоилов С. А. // Оптический журнал. 2021. Т. 88. № 11. С. 9.

PACS: 85.60.-q

Investigation of the optical communication channel throughput of an information receiver in the form of a silicon photomultiplier tube under conditions of background illumination

I. R. Gulakov, A. O. Zenevich, O. V. Kochergina

Belarusian State Academy of Communications
8/2 F. Skorina st., Minsk, 220114, Belarus
E-mail: o.kochergina@bsac.by

Received November 16, 2021

In this work, the throughput of an optical communication channel with an information receiver in the form of a silicon photomultiplier tube (Si-PMT) under conditions of background illumination has been studied. The dependences of the optical communication channel throughput on the level of background illumination are presented, and the background illumination levels necessary for "blinding" the photodetector from overvoltage are determined. It is shown that the use of the 470 nm wavelength light filter, corresponding to the maximum spectral sensitivity of the Si-PMT, makes it possible to restore the information signal after its "blinding". The results obtained can be used in the development of optical communication systems.

Keywords: silicon photomultiplier tube, bandwidth, optical communication channel, Li-Fi technology.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-1-28-33

REFERENCES

1. V. Arya and P. Priya, Resma Omanakuttan, Shilby Baby. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering **4** (4), 2340 (2015).
2. Anurag Sarkar, Shalabh Agarwal, and Asoke Nath, International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies **3** (6), 1 (2015).
3. V. Makarenko, EKIS. New technologies, No. 1, 46 (2020) [in Russian].
4. Van Dam H., Seifert S., R. Vinke, P. Dendooven, H. Löhner, F. J. Beekman, and D. R. Schaart, Transactions on nuclear science **57** (4), 2254 (2010).
5. M. N. Modi, K. Daie, G. C. Turner, and K. Podgorski, Optics Express **27** (24/25), 35830 (2019).
6. S. Klemin, Y. Kuznetsov, L. Filatov, P. Buzhan, B. Dolgoshein, A. Ilyin, and E. Popova, Electronics: Science, Technology, Business, No. 8, 80 (2007) [in Russian].
7. V. V. Shubin, *Information security of fiber optic systems* (All-Russian Research Institute of Experimental Physics, 2015) [in Russian].
8. I. R. Gulakov and A. O. Zenevich, *PhotoReceivers of quantum systems* (Minsk, UO VGKS Publ., 2012) [in Russian].
9. M. A. Asayonak and A. O. Zenevich, Applied Physics, No. 6, 49 (2018) [in Russian].
10. I. R. Gulakov, A. O. Zenevich, O. V. Kochergina, E. V. Novikov, and S. A. Goibov, Journal of Optical Technology **88** (11), 9 (2021).