

## Исследование характеристик кремниевых фотоэлектронных умножителей

М. А. Асаёнок, А. О. Зеневич

**Получены зависимости отношения сигнал/шум от напряжения питания и температуры для кремниевых фотоэлектронных умножителей. Определены напряжения питания кремниевых фотоэлектронных умножителей, при которых наблюдается их максимальная чувствительность.**

**Ключевые слова:** кремниевый фотоэлектронный умножитель, отношение сигнал/шум, пороговая мощность, темновой ток, фототок.

**Ссылка:** Асаёнок М. А., Зеневич А. О. // Прикладная физика. 2018. № 6. С. 49.

**Reference:** M. A. Asayonak and A. O. Zenevich, Prikl. Fiz., No. 6, 49 (2018).

### Введение

В настоящее время вакуумные фотоэлектронные умножители находят широкое применения для исследования кинетики люминесценции, лазерного зондирования дальних и высотных слоев атмосферы и водных сред, в оптической связи и других областях науки и техники. К достоинствам этих фотоприемников можно отнести, прежде всего, высокую чувствительность, большой диапазон рабочих интенсивностей.

К сожалению, вакуумные фотоэлектронные умножители обладают и рядом существенных недостатков, таких как высокое напряжение питания, большие габариты, низкая механическая прочность, малая чувствительность в ближней ИК-области спектра. Поэтому в последнее время на смену вакуумным фотоэлектронным умножителям приходят кремниевые фотоэлектронные умножители (Si-ФЭУ), которые не имеют вышеуказанных недостатков. Необходимо отметить, что Si-ФЭУ, так же как вакуумные фотоэлектронные умножители, обладают достаточно большими коэффициентами усиления ( $\geq 10^5$ ) и имеют большие площади фоточувствительной площадки ( $\geq 7 \text{ мм}^2$ ) [1]. Однако в настоящее время характеристики Si-ФЭУ недостаточно изучены. Одними из наиболее важных характеристик любого фотоприемника являются отношение сигнал/шум и пороговая

мощность. Поэтому целью данной работы является определение этих характеристик.

### Описание установки и методики эксперимента

В качестве объектов исследования были выбраны кремниевые фотоэлектронные умножители, имеющие различные структуры  $n+n-p+$  и  $p+p-n+$  производства ОАО «Интеграл» (Беларусь).

Si-ФЭУ представляет собой фотоприемник, состоящий из упорядоченного набора  $p-n$ -переходов, являющихся ячейками и выполненными на общей подложке, а также содержащий встроенный шунтирующий резистор. Исследуемые нами Si-ФЭУ выполнены на подложках  $p$ -типа проводимости (структура  $n+n-p+$ ) и  $n$ -типа проводимости (структура  $p+p-n+$ ) с размером активной площади кристалла  $1,25 \times 1,25 \text{ мм}$ . При этом общее количество ячеек – 1858 шт. Площадь фоточувствительной поверхности одной ячейки –  $29 \times 29 \text{ мкм}$ . Доля активной площади всех ячеек в общей площади кристалла составляет 68,6 %. Ячейки отделены друг от друга глубокой канавкой. Это позволяет исключить попадание вторичных фотонов из одной ячейки в другую. Для этого канавки заполнены непрозрачным материалом (алюминием). Величина встроенного шунтирующего поликремниевое резистора составляла 1 МОм.

Принцип работы Si-ФЭУ заключается в формировании суммарного выходного сигнала от каждой сработавшей ячейки при воздействии на нее фотона оптического излучения.

Измерения проводились на экспериментальной установке, структурная схема которой показана на рис. 1. Экспериментальная установка функционирует следующим образом. Для формирования оптического излучения использовался светодиод

Асаёнок Марина Анатольевна, аспирант.  
Зеневич Андрей Олегович, ректор, профессор, д.т.н.  
Белорусская государственная академия связи.  
Беларусь, 220114, г. Минск, ул. Ф. Скорины, 8/2.  
E-mail: ama-rul@mail.ru

Статья поступила в редакцию 2 августа 2018 г.

СД. Питание светодиода осуществлялось от источника постоянного напряжения И1. Оптическое излучение от светодиода СД поступало в оптическое волокно ОВ. С выхода оптического волокна излучение подавалось на кремниевый фотоэлектронный умножитель Si-ФЭУ, который подключался последовательно с резистором нагрузки  $R_n$ . Для питания использовался регулируемый источник постоянного напряжения И2. Напряжение, приложенное к Si-ФЭУ, измерялось при помощи вольтметра В. Для определения величины электрического тока, протекающего через Si-ФЭУ, применялся амперметр А. Охлаждение Si-ФЭУ обеспечивалось камерой тепла и холода К. Температура Si-ФЭУ контролировалась при помощи электронного термометра Т. Измерение интенсивности оптического излучения на выходе оптического волокна ОВ осуществлялось измерителем интенсивности излучения ИИ. Для этого использовался оптический коммутатор К1. Коммутатором К1 управляется блок управления БУ таким образом, что оптическое излучение с выхода оптического волокна может поступать на вход измерителя ИИ или подаваться на Si-ФЭУ.

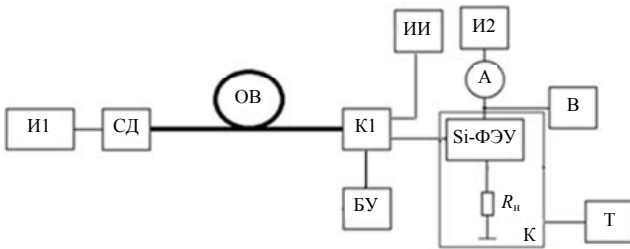


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: И1 – источник питания светодиода; СД – светодиод; ОВ – оптическое волокно; К1 – коммутатор, ИИ – устройство измерения интенсивности оптического излучения, И2 – источник питания; Si-ФЭУ – кремниевый фотоэлектронный умножитель; А – амперметр; В – вольтметр;  $R_n$  – резистор нагрузки; К – камера тепла и холода; Т – электронный термометр, БУ – блок управления.

Во время проведения измерения на Si-ФЭУ подавалось оптическое излучение с длинами волн 630 нм и 850 нм. Диапазон изменения температуры составлял 203÷303 К. При сравнении характеристик кремниевых фотоэлектронных умножителей между собой применялась величина перенапряжения  $\Delta U = U_n - U_{пр}$ , где  $U_n$  – напряжение питания,  $U_{пр}$  – напряжение пробоя Si-ФЭУ. Это связано с тем, что исследуемые фотоприемники имели различные напряжения пробоя.

По вольт-амперной характеристике кремниевого фотоумножителя, полученной для отсутствия оптического излучения, определялось его напряжение пробоя  $U_{пр}$ , используя методику работы [2].

В процессе исследования измерялся темновой ток  $I_T$  и суммарный ток  $I_{фт}$ . Под темновым током понимается электрический ток, протекающий через Si-ФЭУ в отсутствие оптического излучения от светодиода СД. Суммарный ток  $I_{фт}$  представлял собой сумму темнового и фототока  $I_{ф}$ . Суммарный ток регистрировался при поступлении на Si-ФЭУ оптического излучения от светодиода СД (см. рис. 1). Величина фототока определялась следующим образом:  $I_{ф} = I_{фт} - I_T$ .

По значениям, полученным в результате измерения суммарного тока  $I_{фт}$ , определялся коэффициент усиления этого тока  $M_c$ . При этом считалось, что при значении напряжении питания Si-ФЭУ  $U_n = 5$  В усиление тока в Si-ФЭУ отсутствует. В связи с этим для вычисления коэффициента усиления  $M_c$  применялось следующее выражение:  $M_c = I_{фт}/I_{фт0}$ , где  $I_{фт}$  – суммарный ток, протекающий через Si-ФЭУ при  $U_n \geq 5$  В,  $I_{фт0}$  – суммарный ток, протекающий через Si-ФЭУ при  $U_n = 5$  В.

По полученным значениям определялся шум-фактор  $F$  по следующей формуле:

$$F = \frac{\langle M_c^2 \rangle}{M_c^2}, \quad (1)$$

где  $\langle M_c^2 \rangle$  – среднее значение квадрата коэффициента усиления  $M_c$ .

Вычисление отношения сигнала к шуму  $S/N$  на выходе Si-ФЭУ осуществлялось в соответствии с выражением (полученном на основе формулы, приведенной в работе [3] для постоянной интенсивности оптического излучения), а именно:

$$\frac{S}{N} = \frac{I_{фт} - I_T}{\sqrt{2qI_{фт}FM_cB + \frac{4kTB}{R}}}, \quad (2)$$

где  $q$  – заряд электрона;  $B$  – полоса частот;  $k$  – константа Больцмана;  $T$  – температура;  $R$  – сопротивление нагрузки.

Оценка пороговой мощности Si-ФЭУ  $P_n$  выполнялась по формуле, полученной из выражения (2) для значения  $S/N = 1$ :

$$P_n = \frac{hc}{\eta\lambda} FM_c B \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2qI_T FM_c + \frac{4kT}{R}}{(qFM_c)^2 B}} \right), \quad (3)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме;  $\lambda$  – длина волны оптического излучения;  $h$  – постоянная Планка;  $\eta$  – квантовый выход. При выводе формулы (3) также учитывалось, что  $I_{ф} = \frac{q\eta}{h\nu} P_n$  (где  $\nu$  – частота

та оптического излучения). Квантовый выход находился по следующему выражению:

$$\eta = \frac{I_{\text{фт}} - I_{\text{т}}}{qJSM} \times \frac{hc}{\lambda}, \quad (4)$$

где  $J$  – интенсивность оптического излучения;  $S$  – площадь фоточувствительной поверхности Si-ФЭУ;  $M$  – средний коэффициент усиления фототока. Коэффициент усиления  $M$  определялся на основании следующего выражения:  $M = I_{\text{ф}}/I_{\text{ф0}}$ , где  $I_{\text{ф}}$  – фототок, протекающий через Si-ФЭУ при  $U_{\text{п}} \geq 5$  В,  $I_{\text{ф0}}$  – фототок, протекающий через Si-ФЭУ при  $U_{\text{п}} = 5$  В.

Для оценки полосы частот использовалась формула  $B = (2\pi RC)^{-1}$ , где  $C$  – собственная емкость Si-ФЭУ. Сопротивление нагрузки рассчитывается на основе эквивалентной схемы, приведенной в [3], т. е. имеем выражение:

$$R = (R_{\text{н}} R_{\text{с}})/(R_{\text{н}} + R_{\text{с}}),$$

где  $R_{\text{с}}$  – последовательное сопротивление Si-ФЭУ,  $R_{\text{н}}$  – величина резистора нагрузки. Величина  $C$  определялась на основании вольт-фарадной характеристики Si-ФЭУ. Значение  $R_{\text{с}}$  находилось по вольт-амперной характеристике Si-ФЭУ.

### Результаты эксперимента и их обсуждение

Выполненные измерения вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик исследуемых Si-ФЭУ показали, что при постоянном значении температуры для напряжений питания, меньших напряжения пробоя, величины  $R_{\text{с}}$  и  $C$  уменьшались с ростом  $U_{\text{п}}$ . При напряжениях питания, превышающих напряжение пробоя Si-ФЭУ, значение  $R_{\text{с}}$  оставалось постоянным. Так, при температуре  $T = 300$  К для  $U_{\text{п}} \geq U_{\text{пр}}$  величины  $R_{\text{с}} = 22$  кОм и  $R_{\text{с}} = 17$  кОм для Si-ФЭУ со структурами  $n+n-p+$  и  $p+-p-n+$  соответственно. При этой же температуре для  $U_{\text{п}} \geq U_{\text{пр}}$  величины собственной емкости составляли  $C = 170$  пФ и  $C = 110$  пФ для Si-ФЭУ со структурами  $n+n-p+$  и  $p+-p-n+$  соответственно. Таким образом, полосы пропускания для исследуемых Si-ФЭУ при  $T = 300$  К и  $U_{\text{п}} \geq U_{\text{пр}}$  составляли  $B = 1,0$  МГц (Si-ФЭУ со структурой  $n+n-p+$ ) и  $B = 1,5$  МГц (Si-ФЭУ со структурой  $p+-p-n+$ ). Поскольку для регистрации оптического излучения при помощи Si-ФЭУ используются  $U_{\text{п}} \geq U_{\text{пр}}$  [4], то далее будут рассматриваться именно эти напряжения.

Понижение температуры приводило к увеличению последовательного сопротивления Si-ФЭУ. Так, при понижении температуры до 203 К и напряжениях питания  $U_{\text{п}} \geq U_{\text{пр}}$  последовательное сопротивление увеличивалось до следующих значений:  $R_{\text{с}} = 41$  кОм для Si-ФЭУ со структурой  $n+n-p+$ ,  $R_{\text{с}} = 23$  кОм для Si-ФЭУ со структурой

$p+-p-n+$ . Уменьшение температуры практически не влияло на собственную емкость исследуемых Si-ФЭУ. Таким образом, существенное снижение температуры приводило к уменьшению полосы пропускания до  $B = 0,9$  МГц для Si-ФЭУ со структурой  $n+n-p+$ , а для Si-ФЭУ со структурой  $p+-p-n+$  – до  $B = 1,4$  МГц.

На основании измерения величин  $M_{\text{с}}$  и  $\langle M_{\text{с}}^2 \rangle$  был определен шум-фактор по формуле (1) для постоянной интенсивности оптического излучения. Полученные результаты показали, что его величина  $F = 1$  для Si-ФЭУ различных структур и температур.

На рис. 2 применительно к Si-ФЭУ представлены полученные зависимости отношения сигнал/шум, темнового и сигнального тока от перенапряжения  $\Delta U$  при  $T = 263$  К для длины волны оптического излучения  $\lambda = 630$  нм. Отметим, что далее зависимости  $S/N$  от  $\Delta U$  и  $T$  получены расчетным путем на основании выражения (2). Для длины волны  $\lambda = 850$  нм эти зависимости были аналогичные. Измерения для этих длин волн проводились при постоянной интенсивности оптического излучения  $J = 1,7 \times 10^{-5}$  Дж/см<sup>2</sup>. Оказалось, что все зависимости  $S/N$  от  $\Delta U$  имеют максимум для всех типов Si-ФЭУ и исследуемых длин волн оптического излучения. Максимум зависимости  $S/N$  от  $\Delta U$  наблюдался при перенапряжении 0 В. Рост зависимостей  $S/N$  ( $\Delta U$ ) для  $\Delta U < 0$  В связан с увеличением квантового выхода и коэффициента усиления фототока с повышением перенапряжения.

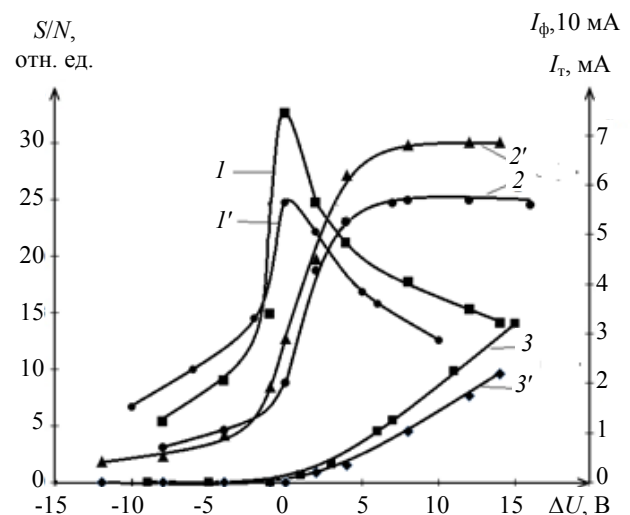


Рис. 2. Зависимости отношения сигнал/шум, темнового и сигнального токов от перенапряжения  $\Delta U$  при  $T = 300$  К для кремниевых фотоумножителей при  $\lambda = 630$  нм. Кривая 1 – отношение С/Ш структуры  $p+-p-n+$ , 1' – отношение С/Ш структуры  $n+n-p+$ ; 2 – фототок структуры  $p+-p-n+$ , 2' – фототок структуры  $n+n-p+$ ; 3 – темновой ток структуры  $p+-p-n+$ , 3' – темновой ток структуры  $n+n-p+$ .

Для значений  $\Delta U \leq 0$  В наблюдалось незначительное увеличение темнового тока с ростом перенапряжения. Значение темнового тока при этих перенапряжениях для всех типов исследуемых Si-ФЭУ было менее 1 мкА. При значениях  $\Delta U > 0$  В наблюдается значительное увеличение темнового тока. Наряду с увеличением темнового тока наблюдается и резкий рост фототока в интервале  $\Delta U = 0 \div 4$  В (см. рис. 2). Для  $\Delta U > 4$  В фототок практически не увеличивался, а темновой ток продолжал расти. Рост темнового тока при  $\Delta U > 0$  В обуславливал спад зависимости  $S/N$  ( $\Delta U$ ) при этих перенапряжениях.

Темновой ток при  $\Delta U > 0$  В для Si-ФЭУ со структурой  $p+-p-n+$  имел более высокие значения чем для Si-ФЭУ со структурой  $n+-n-p+$  (см. рис. 2). Величина фототока для Si-ФЭУ со структурой  $n+-n-p+$  была больше чем для Si-ФЭУ со структурой  $p+-p-n+$ . Выполненная оценка квантового выхода Si-ФЭУ на основании формулы (4) показала, что квантовый выход Si-ФЭУ со структурой  $p+-p-n+$  был больше квантового выхода Si-ФЭУ со структурой  $n+-n-p+$  при этих перенапряжениях. Так максимальное значение квантового выхода, полученное для Si-ФЭУ со структурой  $n+-n-p+$  составляло  $\eta = 0,6$  для длины волны 630 нм и  $\eta = 0,1$  для длины волны 850 нм. Такие же значения  $\eta$  для Si-ФЭУ со структурой  $p+-p-n+$  были 0,7 для длины волны 630 нм и 0,3 для длины волны 850 нм. Однако Si-ФЭУ со структурой  $p+-p-n+$  имели более высокие значения коэффициентов усиления  $M_c$  и  $M$ , чем Si-ФЭУ со структурой  $n+-n-p+$ . Это приводило к тому, что отношение сигнал/шум при  $\Delta U > 0$  В для Si-ФЭУ со структурой  $p+-p-n+$  превосходила  $S/N$  для Si-ФЭУ со структурой  $n+-n-p+$ .

На графиках, представленных на рис. 3, видно, что с уменьшением температуры отношение сигнал/шум увеличивается до температуры  $T = 260$  К (кривая 1 и 1' рис. 3) для исследуемых структур Si-ФЭУ. При дальнейшем уменьшении температуры отношение сигнал/шум оставалось неизменным. Отметим, что для длины волны оптического излучения 850 нм зависимости отношения сигнал/шум и фототока от температуры были аналогичными. Понижение температуры также приводило к уменьшению темнового тока. Это

связано с уменьшением количества термогенерированных носителей заряда с понижением температуры, несмотря на увеличения коэффициента темнового тока. При понижении температуры величина квантового выхода практически не изменялась как для длины волны оптического излучения 630 нм, так и для – 850 нм.

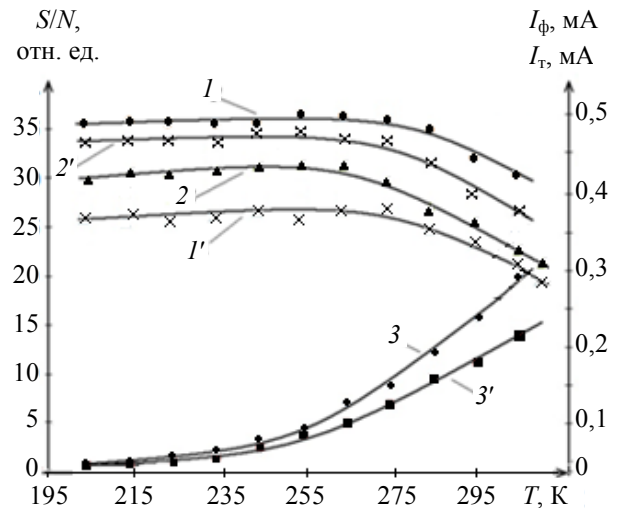


Рис. 3. Зависимость отношения сигнал/шум, темнового и сигнального токов от температуры  $T$  при  $\Delta U = 0$  В для кремниевых фотоумножителей при  $\lambda = 630$  нм. Кривая 1 – отношение С/Ш структуры  $p+-p-n+$ , 1' – отношение С/Ш структуры  $n+-n-p+$ ; 2 – фототок структуры  $p+-p-n+$ , 2' – фототок структуры  $n+-n-p+$ ; 3 – темновой ток структуры  $p+-p-n+$ , 3' – темновой ток структуры  $n+-n-p+$ .

Из полученных результатов следует, что уменьшение температуры приводило к росту фототока при охлаждении от 300 К до 255 К (кривая 2 и 2' рис. 3) для исследуемых структур Si-ФЭУ. При дальнейшем уменьшении температуры фототок оставался неизменным. Такое поведение зависимости фототока от температуры обусловлено изменением коэффициента усиления фототока от температуры, которая представлена в работе [5].

Значения пороговой мощности  $P_{п}$  исследуемых Si-ФЭУ представлены в таблице для перенапряжения, соответствующего максимальному значению отношения сигнал/шум. Величина  $P_{п}$  была рассчитана по формуле (3) для длин волн 630 нм и 850 нм.

Таблица

Пороговая мощность Si-ФЭУ

Структура Si-ФЭУ	Напряжение пробоя, В	Перенапряжение, В	Температура, К	Длина волны, нм	Пороговая мощность, Вт
$n+-n-p+$	21,01	0	203	850	$2,1 \times 10^{-7}$
			263		$2,5 \times 10^{-7}$
			203	630	$0,3 \times 10^{-7}$
			263		$0,6 \times 10^{-7}$
$p+-p-n+$	14,01		203	850	$2,8 \times 10^{-7}$
			263		$3,2 \times 10^{-7}$
			203	630	$0,4 \times 10^{-7}$
			263		$0,7 \times 10^{-7}$

Из таблицы видно, что пороговая мощность для оптического излучения с длиной волны  $\lambda = 630$  нм была меньшей, чем для оптического излучения с длиной волны  $\lambda = 850$  нм для всех исследуемых образцов Si-ФЭУ. Понижение температуры приводило к увеличению значения пороговой мощности.

### Заключение

В работе получены зависимости отношения сигнал/шум от напряжения питания и температуры для кремниевых фотоэлектронных умножителей Si-ФЭУ. Определены напряжения питания кремниевых фотоэлектронных умножителей, при которых наблюдается их максимальная чувствительность.

Наличие максимума зависимости отношения сигнала к шуму  $S/N$  от перенапряжения  $\Delta U$  позволяет сделать вывод, что для получения максимальной чувствительности для Si-ФЭУ необходимо выбирать перенапряжение, соответствующее этому максимуму.

Повысить чувствительность Si-ФЭУ можно путем охлаждения их до температуры 260 К. При дальнейшем охлаждении Si-ФЭУ их чувствительность оставалась неизменной.

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

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гулаков И. Р., Зеневич А. О. Фотоприемники квантовых систем: монография. – Минск: УО ВГКС, 2012.
2. Грехов И. В., Сержкин Ю. Н. Лавинный пробой  $p-n$ -перехода в полупроводниках: монография. – Л.: Энергия, 1980.
3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: в 2-х книгах. Кн. 2. Пер. с англ. – 2-е перераб. и доп. изд. – М.: Мир, 1984.
4. Асайнок М. А., Горбадей О. Ю., Зеневич А. О. // Проблемы инфокоммуникаций. 2017. № 2 (6). С. 82.
5. Асайнок М. А., Зеневич А. О., Горбадей О. Ю. // Доклады БГУИР. 2018. № 2 (112). С. 54.
6. Гулаков И. Р., Холондырев С. В. Метод счёта фотонов в оптико-физических измерениях. – Минск: Университетское, 1989.

PACS: 85.60.-q

## Investigation of the characteristics of silicon photomultipliers

*M. A. Asayonak and A. O. Zenevich*

Belarusian State Academy of Communications  
8/2 F. Skorina str., Minsk, 220114, Belarus  
E-mail: ama-rul@mail.ru

*Received August 2, 2018*

***The dependence of the signal-to-noise merit on the supply voltage and temperature for silicon photoelectric multipliers is obtained. The supply voltages of silicon photoelectric multipliers are determined, at which their maximum sensitivity is observed.***

***Keywords:*** silicon photoelectric multipliers, signal-to-noise merit, threshold power, dark current, photocurrent.

### REFERENCES

1. I. R. Gulakov and A. O. Zenevich, *Photodetectors of Quantum Systems* (Minsk, UO VGKS, 2012) [in Russian].
2. I. V. Grekhov and Y. N. Serezhkin, *Avalanche Breakdown of the  $p-n$  Junction in Semiconductors* (Energiya, Leningrad, 1980) [in Russian].
3. S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, 1981.
4. M. A. Asayonak, O. Y. Gorbadey, and A. O. Zenevich, *Problemy Infokommunikatsii*, No. 2, 6 (2017).
5. M. A. Asayonak, A. O. Zenevich, and O. Y. Gorbadey, *Doklady BGUIR*, No. 2, 112 (2018).
6. I. R. Gulakov and S. V. Holondyrev, *Method of Photon Calculation* (Minsk, Universitetskoe, 1989) [in Russian].