

УДК 621.382
EDN: MTLNUS

PASC: 85.60.-q



Амплитудные характеристики шумовых диодов

А. О. Зеневич, О. В. Кочергина, В. В. Буслюк, Д. Н. Федосюк, Д. А. Луций

Приведены результаты исследования амплитудных характеристик шумовых диодов, а именно зависимость амплитуды и частоты импульсов шумовых диодов от напряжения обратного смещения. В качестве объектов исследования были выбраны кремниевые шумовые диоды производства ОАО «ЦВЕТОТРОН» (Республика Беларусь) моделей ND102L, ND103L и ND104L. Получено, что увеличение перенапряжения приводит к увеличению среднего значения амплитуды шумовых импульсов. Установлено, что наибольшая стабилизация напряжения питания для поддержания постоянного значения амплитуды шумовых импульсов необходима для шумовых диодов ND104L, а наименьшая для ND102L. Установлено, что амплитудные распределения импульсов шумовых диодов имеют ярко выраженный максимум, который смещается с ростом перенапряжения в сторону больших значений амплитуд, а величина этого пика уменьшается с увеличением перенапряжения. Результаты этой работы могут найти применение при разработке цифровых систем передачи и защиты информации.

Ключевые слова: шумовой диод, частота следования шумовых импульсов, амплитудное распределение шумовых импульсов.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-3-51-57

Введение

Для решения задач криптографии, численного моделирования случайных процессов находят широкое применение генераторы случайных чисел, для создания которых используются специально разработанные шумовые диоды [1, 2]. Генератор шума представляет собой устройство, предназначенное для создания специальных помех в определенном частотном диапазоне, для защиты информации от несанкционированного вмеша-

тельства путем маскирования полезного сигнала [3, 4].

В основу работы таких диодов положен случайный характер возникновения микроплазменного пробоя их $p-n$ -перехода [5, 6]. Такие диоды имеют небольшие габариты и малые напряжения питания (менее 10 В), что позволяет достаточно просто встраивать их в различные электронные устройства [7].

Например, при создании калиброванных генераторов шума на основе шумовых диодов необходимо обеспечивать постоянное значе-

Зеневич Андрей Олегович¹, ректор, профессор, д.т.н.

Кочергина Ольга Викторовна¹, доцент, к.т.н.

E-mail: o.kochergina@bsac.by

Буслюк Виктор Вячеславович^{2,3}, вед. инженер-конструктор, зав. филиалом кафедры, к.т.н.

Федосюк Дмитрий Николаевич^{2,3}, инженер, магистрант.

Луций Дмитрий Александрович^{2,3}, инженер-технолог, магистрант.

¹ Белорусская государственная академия связи.

Республика Беларусь, 220114, г. Минск,

ул. Ф. Скорины, 8/2.

² ОАО «Цветотрон».

Республика Беларусь, 224022, г. Брест, ул. Суворова, 96А.

³ Брестский государственный технический университет.

Республика Беларусь, 224017, г. Брест,

ул. Московская, 267.

Статья поступила в редакцию 21.02.2024

После доработки 2.04.2024

Принята к публикации 19.04.2024

Шифр научной специальности: 2.2.2

© Зеневич А. О., Кочергина О. В., Буслюк В. В.,

Федосюк Д. Н., Луций Д. А., 2024

ние как частоты появления шумовых импульсов, так и их амплитуды [8]. Необходимо отметить, что у полупроводниковых приборов, работающих в режиме микроплазменного пробоя, частота следования микроплазменных импульсов и их амплитуда имеют зависимость от приложенного напряжения обратного смещения [2]. Поэтому при построении калиброванных генераторов шума необходимо знать зависимости частоты следования шумовых импульсов и их амплитуды от напряжения обратного смещения. Отметим, что зависимости частоты следования шумовых импульсов от напряжения обратного смещения были получены в работах [3, 4, 7]. Однако, в настоящее время не установлена зависимость амплитуды импульсов шумовых диодов от напряжения обратного смещения. В связи с этим получение такой зависимости явилось целью данной статьи.

Экспериментальная установка и методы измерений

Для проведения исследования была создана экспериментальная установка, структурная схема которой представлена на рисунке 1.

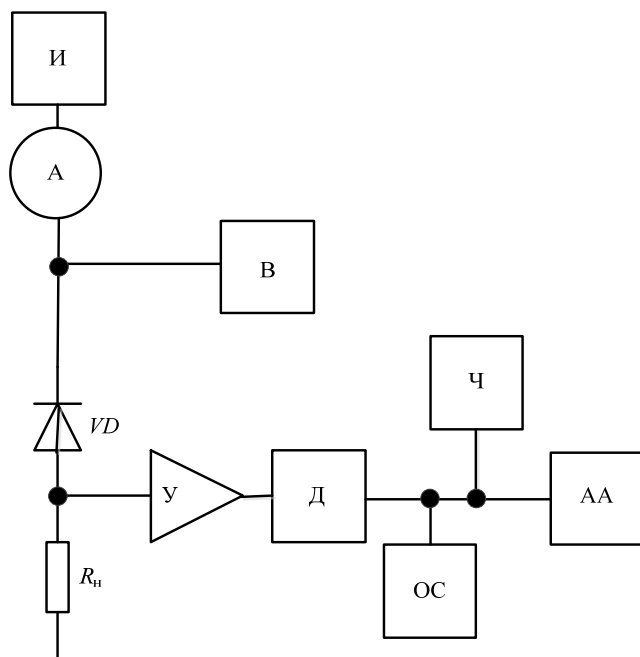


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: И – источник питания; В – вольтметр; А – амперметр; У – усилитель; Д – дискриминатор; Ч – частотомер; ОС – осциллограф; R_n – сопротивление нагрузки; АА – амплитудный анализатор

Питание шумовых диодов осуществлялось при помощи источника постоянного напряжения (И) и контролировалось вольтметром (В). Величина тока, протекающего через шумовой диод, определялась амперметром (А). Значение напряжения питания, подаваемого на шумовой диод незначительно превышало напряжение лавинного пробоя. При таких напряжениях питания наблюдается микроплазменный пробой $p-n$ -перехода шумового диода.

Режим микроплазменного пробоя происходит в результате попадания свободного носителя заряда в микроплазменный канал $p-n$ -перехода шумового диода. Область $p-n$ -перехода, в которой напряженность электрического поля выше, чем в других областях называется микроплазменным каналом. Свободные носители заряда, образовавшиеся в $p-n$ -переходе в результате термогенерации или туннелирования, попадают в микроплазменный канал. Там под воздействием электрического поля они получают достаточную энергию для того, чтобы вызвать локальный лавинный пробой $p-n$ -перехода. В результате этого пробоя возрастает электрический ток, протекающий через шумовой диод. Это приводит к тому, что на сопротивлении нагрузки R_n увеличивается падение напряжения, а на шумовом диоде уменьшается. Если при протекании лавинного пробоя напряжение на шумовом диоде становится меньше напряжения пробоя $p-n$ -перехода, то лавина гасится, ток, протекающий через диод, уменьшается и на R_n формируется импульс напряжения. Таким образом, на сопротивлении нагрузки R_n формируются шумовые импульсы.

Величина сопротивления нагрузки была подобрана наименьшей, при которой для исследуемых шумовых диодов формировались электрические импульсы постоянной длительности, и составила $R_n = 1$ кОм. Отметим, что при меньших значениях сопротивления нагрузки R_n выходной сигнал шумовых диодов характеризовался значительными флуктуациями амплитуды и длительности электрических импульсов. Флуктуации амплитуды указывают на то, что коэффициент умножения при лавинном пробое изменяется от импульса к импульсу. Лавинный пробой прекращался только тогда, когда количество носителей в области сильного электрического поля

p-n-перехода шумового диода уменьшалось до нуля. При этом длительность импульсов достаточно большая и увеличивалась с возрастанием напряжения смещения вплоть до момента, когда шумовой диод переходил в состояние постоянного пробоя.

Если сопротивление нагрузки R_n увеличивать, то лавинный пробой начинает протекать иным образом. В момент возникновения лавинного пробоя ток через шумовой диод резко возрастает и при этом падение напряжения на резисторе R_n значительно увеличивается, что приводит к уменьшению падения напряжения на самом шумовом диоде ниже напряжения пробоя его *p-n*-перехода. В результате этого лавина прекращается.

Сформированные шумовые импульсы усиливались усилителем (У) и подавались на дискриминатор (Д), в котором осуществлялось отделение микроплазменных шумовых импульсов от собственных шумов усилителя. Внешний вид, сформированных импульсов контролировался осциллографом (ОС), а частота их следования определялась частотомером (Ч). Для измерения амплитудного распределения импульсов использовался многоканальный амплитудный анализатор (АА).

Время измерения амплитудного распределения шумовых импульсов составляло 100 с. Исследование проводилось при комнатной температуре 293 К.

Поскольку исследуемые шумовые диоды имеют разные напряжения пробоя $U_{пр}$, то для сравнения их характеристик использовалось перенапряжение, определяемое как

$\Delta U = U_{пит} - U_{пр}$. Исследования амплитудных распределений выполнены в диапазоне от $-0,01$ до $0,01$ В. Такой диапазон перенапряжений гарантировано обеспечивает наличие шумовых импульсов на выходе всех исследуемых диодов. При меньших перенапряжениях шумовые импульсы не формируются, а при больших величина электрического тока, протекающего через шумовой диод, принимает очень большие значения, что может привести к тепловому пробую шумового диода.

Напряжение пробоя определялось по вольтамперной характеристике на основании методики, описанной в работе [9].

Результаты измерения и их обсуждение

В качестве объектов исследования были выбраны кремниевые шумовые диоды производства ОАО «ЦВЕТОТРОН» (Республика Беларусь), поскольку шумовые диоды этого производителя уже достаточно хорошо зарекомендовали себя при использовании в генераторах шума [8, 10]. Для проведения исследования случайным образом были отобраны по три экземпляра из партии моделей *ND102L*, *ND103L* и *ND104L*. Статистика набрана в результате многократного измерения параметров каждого шумового диода.

Сведения о напряжении пробоя $U_{пр}$, средней амплитуде шумовых импульсов $\langle A \rangle$ и среднеквадратичном отклонении амплитуды этих импульсов от среднего значения σ при напряжении пробоя представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры шумовых диодов

Модель шумового диода	Напряжение пробоя, $U_{пр}$, В	Средняя амплитуда шумовых импульсов, $\langle A \rangle$, мВ	Среднеквадратичное отклонение амплитуды, σ , мВ
<i>ND102L</i>	9,21	150,4	45,1
<i>ND103L</i>	8,72	61,2	15,5
<i>ND104L</i>	7,74	15,1	0,5

Отклонение напряжения пробоя для трех экземпляров *ND102L* составляло 1,3 %. Для такого же количества экземпляров *ND103L* и *ND104L* отклонение $U_{пр}$ было 0,1 %. Наибольшее значение напряжения пробоя соответствовало шумовым диодам *ND102L*, а наименьшее – *ND104L* (см. табл. 1).

Как видно из таблицы 1, при напряжениях питания равных напряжению пробоя

наибольшее значение средней амплитуды импульсов и среднеквадратичного отклонения σ наблюдалось для шумовых диодов *ND102L*, а наименьшее для *ND104L*. Такое отличие в этих параметрах связано с различием во внутренней структуре исследуемых марок шумовых диодов.

Увеличение перенапряжения приводило к увеличению среднего значения амплитуды

шумовых импульсов и ее среднеквадратичного отклонения (рис. 2). Зависимость $\langle A \rangle$ от ΔU близка к линейной для всех исследуемых шумовых диодов. Поскольку она показывает непрерывный рост амплитуды $\langle A \rangle$ от перенапряжения, то для них можно определить коэффициент $\Delta \langle A \rangle / \Delta U_{\text{пит}}$, где $\Delta \langle A \rangle$ – изменение среднего значения амплитуды шумовых импульсов при изменении перенапряжения $\Delta U_{\text{пит}}$. Получено, что величина $\Delta \langle A \rangle / \Delta U_{\text{пит}} = 1,0; 1,5$ и $2,0$ раз для *ND102L*, *ND103L* и *ND104L* соответственно. Таким образом, наиболее сильную зависимость средней амплитуды шумовых импульсов $\langle A \rangle$ от изменения приложенного напряжения питания имеют шумовые диоды *ND104L*, а наименьшую – *ND102L*. Это связано с тем, что увеличение перенапряжения приводит к росту напряженности электрического поля в области микроплазменного канала *p-n*-перехода. Увеличение напряженности приводит к повышению коэффициента умножения носителей в этой области. В результате происходит рост электрического тока, протекающего через *p-n*-переход во время его локального пробоя. Это приводит к повышению падения напряжения на сопротивлении нагрузки R_n , а значит к росту амплитуды шумовых импульсов.

Отметим, что отличия в характере зависимости $\langle A \rangle(\Delta U)$ обусловлены отличием внутренней структуры исследуемых шумовых диодов.

Зависимость среднеквадратичного отклонения σ от перенапряжения в указанном диапазоне также близка к линейной. Для этой зависимости наблюдается непрерывный рост. Величина коэффициента $\Delta \sigma / \Delta U_{\text{пит}}$ составила 0,6; 0,4 и 0,3 для *ND102L*, *ND103L* и *ND104L* соответственно. Отметим, что при определении этого коэффициента величина $\Delta \sigma$ представляла собой изменение среднеквадратичного отклонения амплитуды шумовых импульсов при изменении перенапряжения $\Delta U_{\text{пит}}$. Таким образом, наиболее сильную зависимость среднеквадратичного отклонения σ от изменения приложенного напряжения питания имеют шумовые диоды *ND102L*, а наименьшую – *ND104L*.

Шумовые диоды, для которых наблюдались большие значения амплитуды шумовых импульсов, имели большие значения средне-

квадратичного отклонения σ . Это связано с тем, что умножение носителей заряда в канале микроплазменного пробоя является статистическим процессом. Вероятность возникновения того или иного числа носителей заряда, образующихся в процессе этого умножения, подчиняется распределению Пуассона [8]. Следовательно, чем больше коэффициент умножения носителей заряда, тем больше статистический разброс числа носителей заряда, образовавшихся в результате умножения. В связи с этим, возрастает флуктуация электрического тока, создаваемого пробоями с большим коэффициентом умножения в микроплазменном канале по сравнению с пробоями с меньшим коэффициентом умножения. Возрастание флуктуации электрического тока приводит к увеличению среднеквадратичного отклонения σ шумовых импульсов, формируемых таким током.

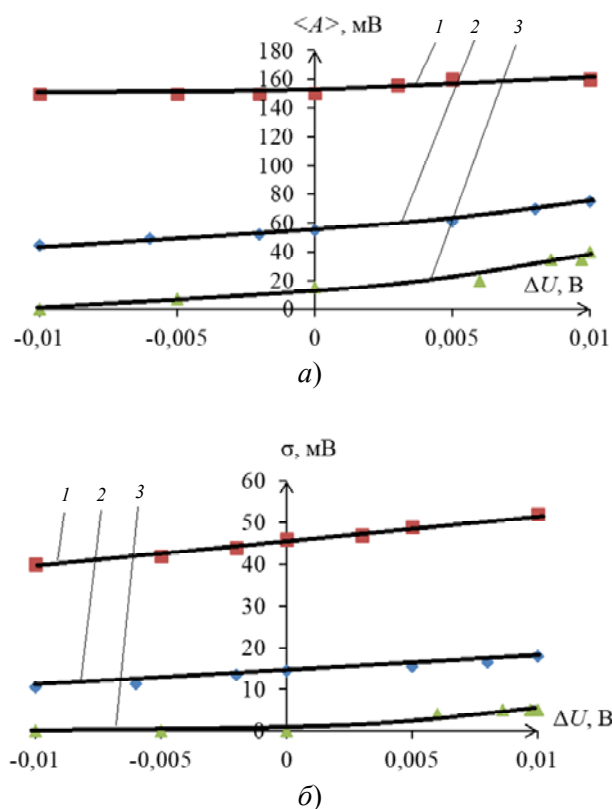


Рис. 2. Зависимость среднего значения амплитуды шумовых импульсов $\langle A \rangle$ (а) и среднеквадратичного отклонения σ (б) от перенапряжения: 1 – *ND102L*; 2 – *ND103L*; 3 – *ND104L*

Отметим, что наибольшее значение среднеквадратичного отклонения σ имеют шумовые диоды *ND102L*, а наименьшее –

ND104L во всем диапазоне исследуемых перенапряжений.

В таблице 2 представлены данные о средней амплитуде шумовых импульсов и частоты их следования для различных перенапряжений исследуемых шумовых диодов. В таблице 2 показаны два крайних значения из исследуемого диапазона перенапряжений. Как было отмечено выше, зависимости $\langle A \rangle$ от ΔU демонстрировали рост значений средней амплитуды шумовых импульсов с увеличением перенапряжения. Поэтому по этим значениям можно оценить, во сколько раз увеличивается величина $\langle A \rangle$ и частота следования шумовых импульсов f в исследуемом диапазоне перенапряжений. Так средняя амплитуда шумовых импульсов в пределах исследуемого диапазона перенапряжений увеличивалась в

1,1; 1,7 и 4,4 раз для ND102L, ND103L и ND104L соответственно. При этом частота следования шумовых импульсов возрастает в 1,1; 2,5 и 96,2 раз для ND102L, ND103L и ND104L соответственно. Отметим, что между частотой следования шумовых импульсов и амплитудой этих импульсов наблюдалась линейная зависимость. Поэтому обеспечить постоянное значение амплитуды шумовых импульсов можно путем контроля частоты и поддержанием ее постоянного значения.

Из результатов, представленных в таблице 2 и на рисунке 2 следует, что в исследуемом диапазоне перенапряжений наибольшая стабилизация напряжения питания для поддержания постоянного значения амплитуды шумовых импульсов необходима шумовым диодам ND104L, а наименьшая – ND102L.

Таблица 2

Амплитудно-частотная характеристика шумовых диодов

Модель шумового диода	Перенапряжение, ΔU , В	Средняя амплитуда шумовых импульсов, $\langle A \rangle$, мВ	Частота следования шумовых импульсов, f , кГц
ND102L	- 0,01	149,0	467
	0,01	160,1	500
ND103L	- 0,01	44,7	300
	0,01	75,4	749
ND104L	- 0,01	8,9	80
	0,01	38,8	7700

На рисунке 3 представлены амплитудные распределения шумовых диодов ND103L при изменении перенапряжения. Представленные амплитудные распределения типовые, для других исследуемых шумовых диодов они имеют аналогичный вид и поведение с изменением перенапряжения.

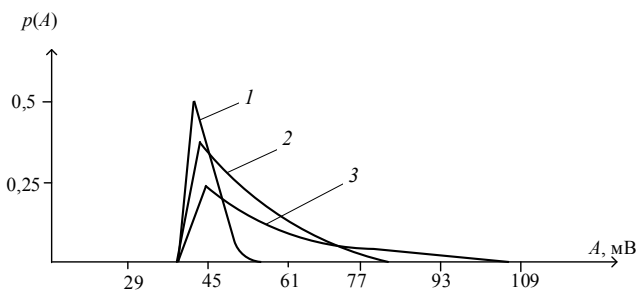


Рис. 3. Типичное амплитудное распределение импульсов шумовых диодов: 1 – при $\Delta U = - 0,01$ В; 2 – при $\Delta U = 0,00$ В; 3 – при $\Delta U = 0,01$ В

Все из полученных амплитудных распределений импульсов шумовых диодов име-

ли ярко выраженный максимум, который смещался с ростом перенапряжения от - 0,01 до 0,01 В в сторону больших значений амплитуд. Величина этого пика уменьшается с увеличением перенапряжения. Также с ростом перенапряжения увеличивается вероятность появления импульсов с большей амплитудой.

Заключение

Получены зависимости средней амплитуды импульсов шумовых диодов от напряжения обратного смещения из которых следует, что увеличение перенапряжения приводит к увеличению среднего значения амплитуды шумовых импульсов. Данные зависимости близки к линейным.

Определено, что наиболее сильную зависимость средней амплитуды шумовых импульсов $\langle A \rangle$ от изменения приложенного напряжения питания имеют шумовые диоды ND104L, а наименьшую – ND102L. Поэтому

наибольшая стабилизация напряжения питания для поддержания постоянного значения амплитуды шумовых импульсов необходима для шумовых диодов ND104L, а наименьшая – ND102L.

Установлено, что амплитудные распределения импульсов шумовых диодов имели ярко выраженный максимум, который смещался с ростом перенапряжения в сторону больших значений амплитуд, а величина этого пика уменьшается с увеличением перенапряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буслюк В. В., Нерода И. Ю., Петлицкий А. Н., Просолович В. С., Янковский Ю. Н., Лановский Р. А. / Журнал Белорус. гос. ун-та. Физика. 2017. № 1. С. 95–99.
2. Buslyuk V. V., Odzhayev V. B., Panfilenko A. K., Petlitsky A. N., Prosolovich V. S., Filipyenyeva V. A., Yankov-

sky Yu. N. / Russian Microelectronics. 2020. Vol. 49. № 4. P. 295–301.

3. Буслюк В. В. Шумовые полупроводниковые диоды с управляемым уровнем дефектности высоколегированных кремниевых структур: автореф. дис... канд. техн. наук. – Минск, БГУИР, 2022.

4. Горбадей О. Ю., Зеневич А. О. / ПФМТ. 2018. № 2. С. 7–10.

5. Бельский А. Я., Сацук С. М., Путилин В. Н. / Доклады БГУИР. 2020. № 18 (5). С. 9–16.

6. Рентюк В. / Компоненты и технологии. 2014. № 1. С. 136–137.

7. Барановский О. К., Горбадей О. Ю., Зеневич А. О., Сильченко О. М. / Проблемы инфокоммуникаций. 2017. № 1 (5). С. 13–18.

8. Винокуров С. А., Кочемасов В. Н., Сафин А. Р. / Изв. Вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26. № 4. С. 6–32.

9. Горбадей О. Ю., Зеневич А. О. / Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2017. № 3 (56). С. 12–17.

10. Гулаков И. Р. Фотоприемники квантовых систем: монография. – Минск: УО ВГКС, 2012.

PASC: 85.60.-q

Amplitude characteristics of noise diodes

A. O. Zenevich¹, O. V. Kochergina¹, V. V. Buslyuk^{2,3}, D. N. Fedosyuk^{2,3}
and D. A. Lushchik^{2,3}

¹ Belarusian State Academy of Communications
8/2 F. Skorina st., Minsk, 220114, Belarus
E-mail: o.kochergina@bsac.by

² JSC TsVETOTRON
96A Suvorova st., Brest, 224022, Belarus

³ Brest State Technical University
267 Moskovskaya st., Brest, 224017, Belarus

Received 21.02.2024; revised 2.04.2024; accepted 19.04.2024

The paper presents the results of a study of the amplitude characteristics of noise diodes, namely the dependence of the amplitude and frequency of noise diode pulses on the reverse bias voltage. Silicon noise diodes produced by JSC "TsVETOTRON" (Republic of Belarus) models ND102L, ND103L and ND104L were chosen as objects of study. It was found that an increase in overvoltage leads to an increase in the average amplitude of noise pulses. It has been established that the greatest stabilization of the supply voltage to maintain a constant value of the amplitude of the noise pulses is necessary for noise diodes ND104L, and the least - for ND102L. It was found that the amplitude distributions of noise diode pulses had a pronounced maximum, which shifted with increasing overvoltage towards larger amplitude val-

ues, and the magnitude of this peak decreases with increasing overvoltage. The results of this article can be used in the development of digital systems for transmitting and protecting information.

Keywords: noise diode, repetition rate of noise pulses, amplitude distribution of noise pulses.

REFERENCES

1. Buslyuk V. V., Neroda I. Yu., Petlitsky A. N., Prosolovich V. S., Yankovsky Yu. N. and Lanovsky R. A., Journal Belarus. state un-ta. Physics № 1, 95–99 (2017) [in Russian].
2. Buslyuk V. V., Odzhayev V. B., Panfilenko A. K., Petlitsky A. N., Prosolovich V. S., Filipyena V. A. and Yankovsky Yu. N., Russian Microelectronics **49** (4), 295–301 (2020).
3. Buslyuk V. V., Noise semiconductor diodes with a controlled level of defects in highly doped silicon structures: abstract of thesis. dis... cand. those. Sci. Minsk, BSUIR, 2022 [in Russian].
4. Gorbadei O. Yu. and Zenevich A. O., PFMT, № 2, 7–10 (2018) [in Russian].
5. Belsky A. Ya., Satsuk S. M. and Putilin V. N., Reports of BSUIR, № 18 (5), 9–16 (2020) [in Russian].
6. Rentyuk V., Components and technologies, № 1, 136–137 (2014) [in Russian].
7. Baranovsky O. K., Gorbadei O. Yu., Zenevich A. O. and Silchenko O. M., Problems of infocommunications, № 1 (5), 13–18 (2017) [in Russian].
8. Vinokurov S. A., Kochemasov V. N. and Safin A. R., Izv. Universities of Russia. Radioelectronics **26** (4), 6–32 (2023) [in Russian].
9. Gorbadei O. Yu. and Zenevich A. O., Telecommunication and information technologies, № 3 (56), 12–17 (2017) [in Russian].
10. Gulakov I. R., Photodetectors of quantum systems: monograph. Minsk, UO VGKS, 2012 [in Russian].