

Условия применения стандартной методики для измерения величины эффективной fotocувствительной площади фотоприемных устройств второго поколения

А. В. Полесский, Н. А. Семенченко, В. К. Тресак, Ю. А. Фирсенкова

Статья посвящена анализу возможности измерения величины эффективной fotocувствительной площади фотоприемных устройств второго поколения с помощью стандартной методики, приведенной в ГОСТ 17772-88. Существенным достоинством стандартной методики измерения является полное соответствие современным требованиям метрологического обеспечения, а недостатком – направленность на контроль фотоприемных устройств первого поколения. На основании зарубежных источников для фотоприемных устройств второго поколения определены характерные распределения чувствительности по поверхности fotocувствительного элемента и проведено моделирование процесса измерения величины эффективной fotocувствительной площади по стандартной методике, определена погрешность измерения. Результаты анализа показали возможность ограниченного использования стандартной методики для контроля фотоприемных устройств второго поколения.

Ключевые слова: fotocувствительный элемент, фотоприемное устройство второго поколения, погрешность измерения, эффективная fotocувствительная площадь, методика измерения.

Ссылка: Полесский А. В., Семенченко Н. А., Тресак В. К., Фирсенкова Ю. А. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 2. С. 142.

Reference: A. V. Polesskiy, N. A. Semenchenko, V. K. Tresak, and Yu. A. Firsenkova, Usp. Prikl. Fiz. 7 (2), 142 (2019).

Введение

В настоящее время единственной методикой измерения эффективной fotocувствительной площади фотоприемников (ФП) и фотоприемных устройств (ФПУ), удовлетворяющей всем современным требованиям метрологического обеспечения, является методика,

изложенная в ГОСТ 17772-88 [1]. Величина эффективной fotocувствительной площади используется для определения таких характеристик ФП и ФПУ как удельная обнаружительная способность, вольтовая чувствительность и пороговый поток.

Стандартная методика измерения была разработана для ФПУ первого поколения, а размер fotocувствительного элемента (ФЧЭ) ФПУ второго поколения значительно меньше, чем у ФПУ первого поколения. При столь малых размерах ФЧЭ существенное влияние на результат измерения может оказывать «размытие» fotocувствительной площадки, вызванное подвижностью зарядов и их временем жизни.

С учетом этих особенностей актуальным становится вопрос о реальной возможности

Полесский Алексей Викторович, гл. метролог, к.т.н.
Семенченко Наталья Александровна, инженер.
Тресак Виктория Константиновна, инженер 2 кат.
Фирсенкова Юлия Андреевна, инженер 2 кат.
АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.
E-mail: orion@orion-ir.ru, av22236@bk.ru

Статья поступила в редакцию 29 марта 2019 г.

© Полесский А. В., Семенченко Н. А., Тресак В. К., Фирсенкова Ю. А., 2019

применения стандартной методики для контроля ФПУ второго поколения, так как она является сравнительно простой для реализации. Целью данной работы является анализ возможности измерения величины эффективной фоточувствительной площади фотоприемных устройств второго поколения с помощью стандартной методики, приведенной в ГОСТ 17772-88.

Описание стандартной методики измерения

Измерение величины эффективной фоточувствительной площади выполняется в соответствии с [1] следующим образом: на поверхности ФЧЭ необходимо создать осесимметричное пятно рассеяния, геометрический размер которого по уровню концен-

трации энергии в пятне 90 % не превышает размера площадки. Далее пятно необходимо спроецировать в плоскость ФЧЭ таким образом, чтобы значение напряжения фотосигнала было максимальным U_{\max} (т. е. попасть на фотозлектрический центр площадки). Последовательно перемещая зонд в двух взаимно перпендикулярных направлениях, необходимо зафиксировать координаты, в которых выполняются условия:

– величина сигнала составляет $0,5 \times U_{\max}$ (координаты x_1, x_2, y_1, y_2) для прямоугольных площадок;

– величина сигнала составляет $0,41 \times U_{\max}$ (координаты x_1, x_2) для круглых площадок.

Обобщенная принципиальная схема измерения эффективной фоточувствительной площади [2] приведена на рис. 1.

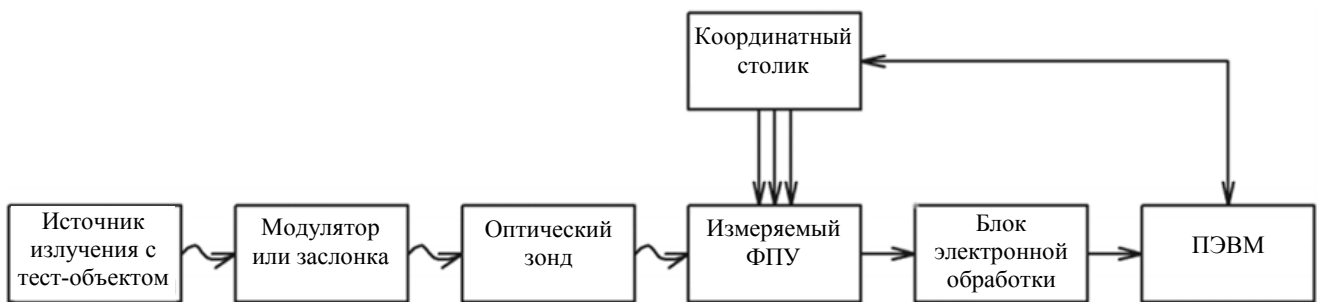


Рис. 1. Обобщенная принципиальная схема измерения эффективной фоточувствительной площади.

За величину эффективной фоточувствительной площади для прямоугольных площадок $A_{\text{эфф}}$ принимают значение:

$$A_{\text{эфф}} = |(x_1 - x_2) \times (y_1 - y_2)|, \quad (1)$$

где x_1, x_2 – координаты по горизонтали для $0,5 \times U_{\max}$; y_1, y_2 – координаты по вертикали для $0,5 \times U_{\max}$.

За величину эффективной фоточувствительной площади для круглых площадок $A_{\text{эфф}}$ принимают значение:

$$A_{\text{эфф}} = \frac{\pi(x_1 - x_2)^2}{4}, \quad (2)$$

где x_1, x_2 – координаты по одной из осей для $0,41 \times U_{\max}$.

При проведении измерений должны выполняться следующие условия: максимальная величина отношения сигнал/шум (ОСШ) должна быть менее 100, а погрешность определения координат – не более 5 % от размера пятна рассеяния. При выполнении всех условий погрешность измерения величины эффективной фоточувствительной площади не должна превышать ± 8 %.

Требования к точности позиционирования и величине ОСШ выполнимы в УФ- и ИК-диапазонах спектра. С учетом современного развития ФПУ второго поколения требования по соотношению размера пятна рассеяния и размера ФЧЭ могут быть выполнены для отдельных моделей ФПУ, работающих в коротковолновом, средневолновом и длинноволновом ИК-диапазонах спектра [3]. В УФ-диапазоне требования по соотношению размера пятна рассеяния и размера ФЧЭ ФПУ полностью выполнимы.

Распределение чувствительности по поверхности ФЧЭ ФПУ второго поколения

Распределение чувствительности по поверхности ФЧЭ определяется характеристиками самого фоточувствительного материала, а именно: подвижностью носителей заряда, временем жизни и структурой фоточувствительного слоя. Вследствие этого закономерно предполагать, что ФПУ на основе одинаковых материалов имеют сходную структуру распределения чувствительности по поверхности ФЧЭ. Проблема реализации стандартной методики измерения величины эффективной фоточувствительной площади наиболее существенна в ИК-диапазоне спектра, поэтому был проведен анализ распределения чувствительности по поверхности ФЧЭ для следующих групп ФПУ:

- на основе кадмия-ртути-теллура (HgCdTe);
- на основе антимонида индия (InSb);
- на основе индия-галлия арсенида (InGaAs);
- на основе квантоворазмерных структур и сверхрешеток (QWIP, T2SL).

Ведущими производителями ФПУ второго поколения на основе HgCdTe являются компании Sofradir (Франция) [4], Leonardo DRS (США) [5]. По данным компании Sofradir [6], еще в 2011 году для ФПУ на основе HgCdTe

были получены пиксели с равномерным распределением чувствительности по поверхности ФЧЭ.

Компания Leonardo DRS по результатам измерения функции передачи модуляции (ФПМ) для ФПУ второго поколения HDVIP DRS, представляющего собой матрицу формата 1280×720 элементов средневолнового или длинноволнового ИК-диапазона с шагом ФЧЭ 5 мкм, заявила, что размер эффективной фоточувствительной площадки составляет 6×6 мкм [7]. График функции передачи модуляции ФПУ для матрицы HDVIP DRS формата 1280×720 элементов приведен на рис. 2.

Аналогичные результаты были получены компанией Teledyne (США) [8]. Согласно данным ведущего производителя ФПУ на основе InSb – компании SCD (Израиль) [9], приведенным в [10], распределение чувствительности по поверхности ФЧЭ не равномерно (см. рис. 3).

Для ФПУ на основе InGaAs информация о распределении чувствительности по поверхности ФЧЭ представлена в расчетном виде в работе [11]. При моделировании функции передачи модуляции для ФПУ на основе InGaAs с подложкой InP был получен профиль распределения чувствительности для ФЧЭ с шагом 12, 6, 4 мкм. Соответствующие графики распределения чувствительности и ФПМ приведены на рис. 4.

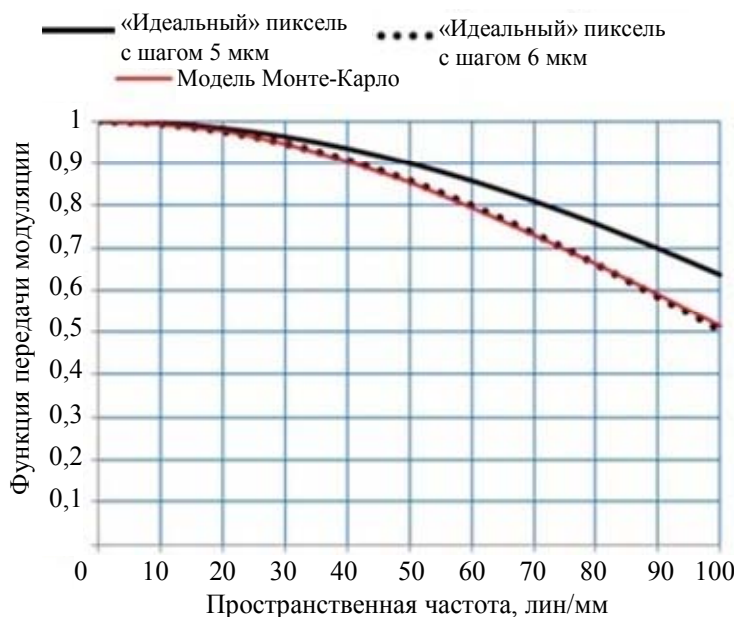


Рис. 2. График функции передачи модуляции ФПУ для матрицы HDVIP DRS формата 1280×720 элементов.

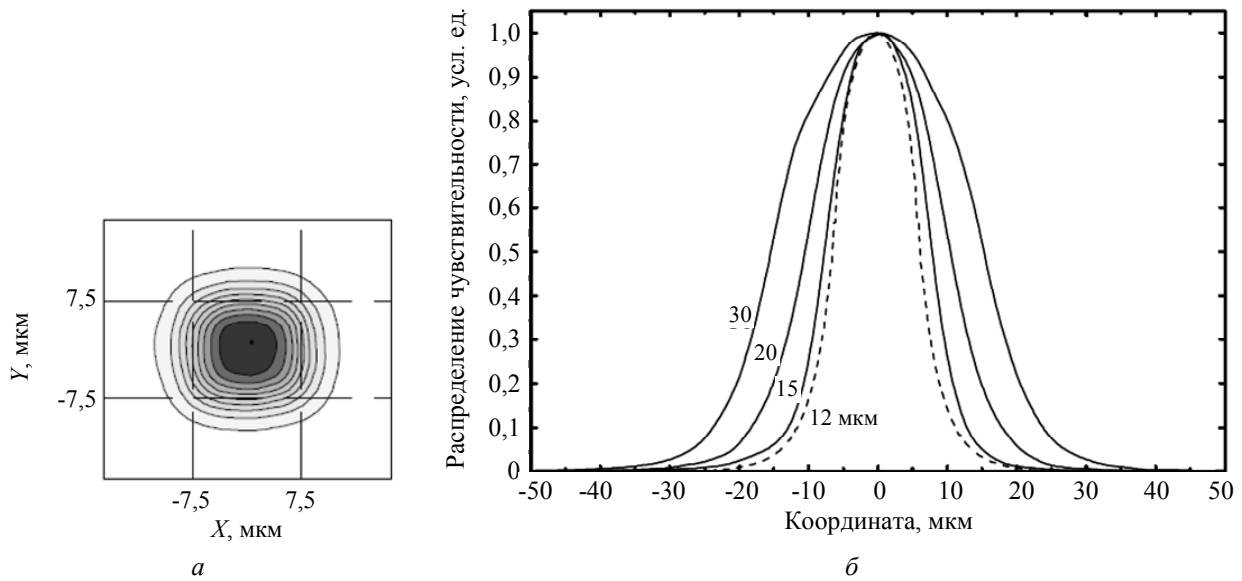


Рис. 3. Распределение чувствительности по поверхности ФЧЭ для ФПУ на основе InSb: а – распределение чувствительности по поверхности ФЧЭ на основе InSb для ФПУ с шагом 15 мкм; б – профили чувствительности ФПУ на основе InSb для шагов ФЧЭ 30, 20, 15 и 12 мкм.

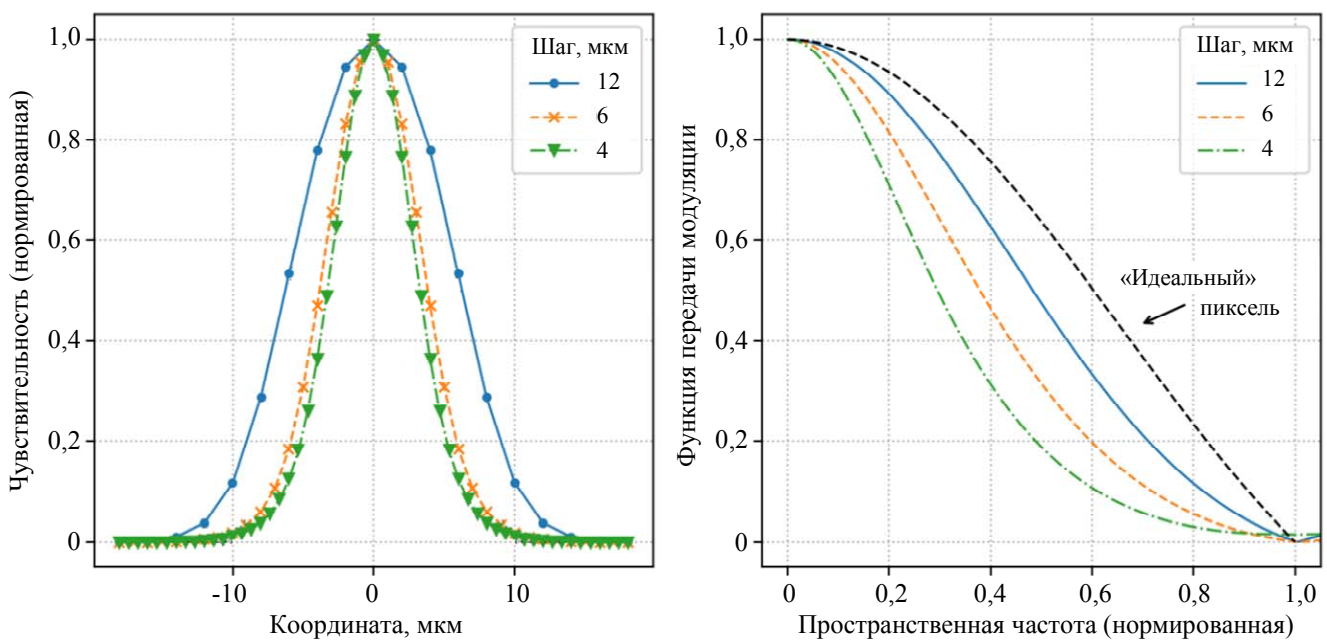


Рис. 4. Распределение чувствительности по поверхности ФЧЭ и функция передачи модуляции для ФПУ на основе InGaAs.

На рис. 5 приведены графики функций передачи модуляции для ФПУ средневолнового и длинноволнового ИК-диапазонов спектра на основе T2SL (суперрешеток с деформированным слоем типа II) с шагом 19,5 мкм [12].

На рис. 6 приведены графики функций передачи модуляции для ФПУ средневолнового ИК-диапазона спектра на основе QWIP структур GaAs/Al_xGa_{1-x}As с шагом 19,5 мкм и длинноволнового ИК-диапазона спектра с шагом 30 мкм [13].

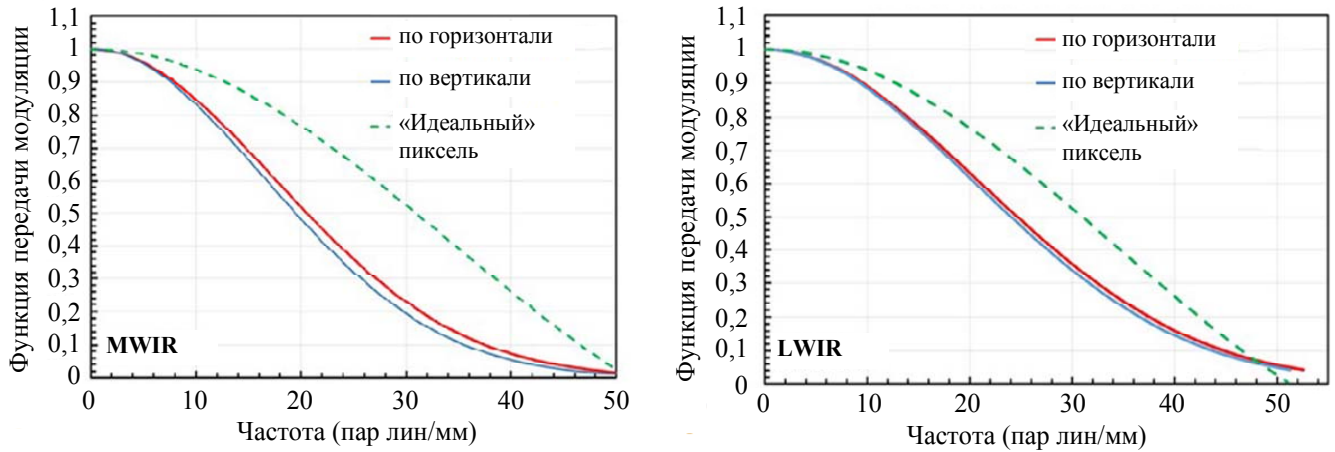


Рис. 5. Графики функций передачи модуляции для ФПУ средневолнового и длинноволнового ИК-диапазонов спектра на основе T2SL с шагом 19,5 мкм.

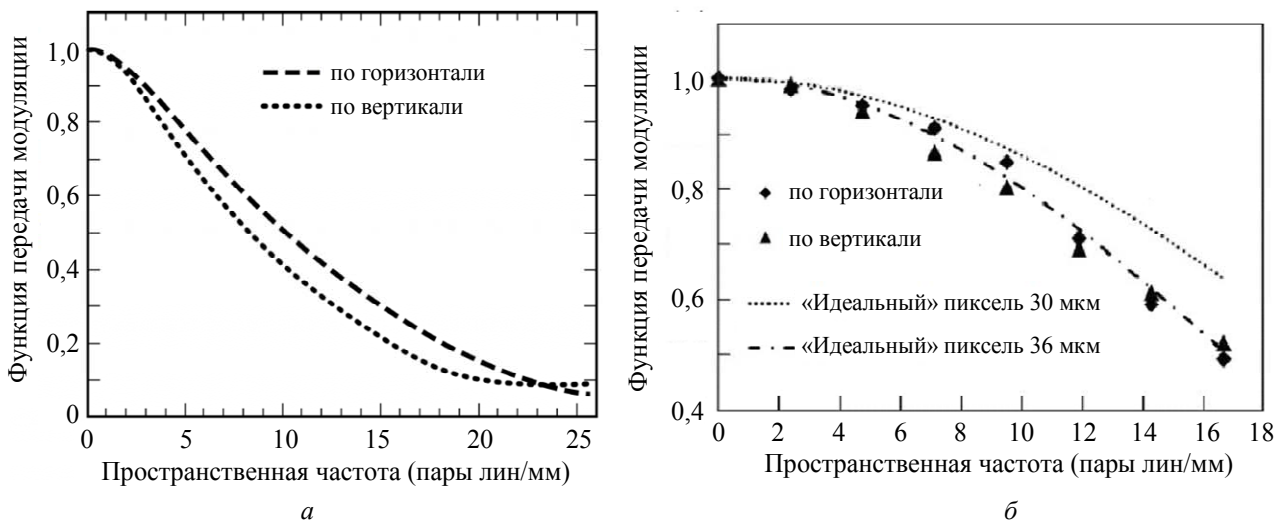


Рис. 6. Графики функций передачи модуляции ФПУ на основе QWIP структур $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$: а – средневолнового ИК-диапазона спектра с шагом 19,5 мкм; б – длинноволнового ИК-диапазона спектра с шагом 30 мкм.

В результате проведенного обзора и анализа данных для ФПУ второго поколения выявлено следующее:

- распределение чувствительности по поверхности ФЧЭ для ФПУ на основе $HgCdTe$ для площадок с шагом до 10 мкм, для ФПУ на основе $InGaAs$ с шагом до 15 мкм и ФПУ на основе T2SL структур с шагом более 19,5 мкм равномерно;

- распределение чувствительности по поверхности ФЧЭ для ФПУ на основе $InGaAs$ с шагом менее 15 мкм, ФПУ на основе $InSb$ с шагом менее 30 мкм, QWIP структур с шагом менее 30 мкм и T2SL структур шагом менее 30 мкм имеет вид «гауссоиды».

Описание математической модели

Исследование возможности применения стандартной методики для измерения величины эффективной фоточувствительной площади заключалось в моделировании процесса сканирования ФЧЭ световым пятном, создаваемым оптическим зондом с качеством изображения, близким к дифракционному, причем с заданным распределением чувствительности (характерным для ФПУ второго поколения). При совпадении центра пятна рассеяния и фотоэлектрического центра площадки ФЧЭ рассчитывалась максимальная величина сиг-

нала U_{\max} , затем определялась координата, в которой величина сигнала составляла $0,5 \times U_{\max}$. Далее величина эффективной фоточувствительной площади $A_{\text{эфф}}$ рассчитывалась при помощи формулы (1).

Световое пятно было задано функцией:

$$SF(x, y) = \text{circ}\left(\frac{x}{a}, \frac{y}{a}\right) \otimes PSF\left(\frac{x}{b}, \frac{y}{b}\right), \quad (3)$$

$$PSF(x, y) = \frac{1}{(1 - \eta^2)^2} \left(\frac{2 \times J_1(\sqrt{x^2 + y^2})}{\sqrt{x^2 + y^2}} - \eta^2 \frac{2 \times J_1(\eta \times \sqrt{x^2 + y^2})}{\eta \times \sqrt{x^2 + y^2}} \right)^2, \quad (4)$$

где J_1 – функция Бесселя первого порядка; η – коэффициент экранирования.

В качестве функции, описывающей равномерное распределение чувствительности по поверхности ФЧЭ, была использована следующая функция:

$$S_{\text{ид.}}(x, y) = \text{rect}\left(\frac{x}{c}, \frac{y}{c}\right), \quad (5)$$

где $S_{\text{ид.}}(x, y)$ – функция распределения чувствительности по поверхности ФЧЭ; $\text{rect}(x, y)$ – прямоугольная функция [14]; c – коэффициент, определяющий размер площадки.

Для описания ФЧЭ с распределением чувствительности, имеющим форму «гауссоиды», в работе [12] приведена формула расчета ФПМ для площадок, обладающих значительной диффузионной длиной:

$$MTF_{\text{пикс.}}(f) = MTF_{\text{ид.пикс.}}(f) \times MTF_{\text{дифф.}}(f), \quad (6)$$

$$S_{\text{дифф.}}(x, y) = \text{rect}\left(\frac{x}{c}, \frac{y}{c}\right) \otimes F^{-1}\left(\frac{1}{1 + (2\pi \times L \times f)^2}\right) = \frac{\sqrt{\frac{1}{L^2}} \left[\exp\left(\frac{t \times \sqrt{\frac{1}{4L}}}{\pi}\right) - 2\Phi(t) \times \sinh\left(\frac{t \times \sqrt{\frac{1}{4L}}}{\pi}\right) \right]}{2} \otimes \text{rect}\left(\frac{x}{c}, \frac{y}{c}\right) \quad (8)$$

где $F^{-1}(\dots)$ – обозначение обратного Фурье-преобразования; $\Phi(t)$ – функция Хэвисайда; c – коэффициент, определяющий размер площадки.

где $SF(x, y)$ – функция распределения энергии в световом пятне; $PSF(x, y)$ – функция рассеяния точки дифракционно-ограниченной оптической системы; $\text{circ}(x, y)$ – круговая функция [14]; a, b – масштабные коэффициенты; \otimes – оператор свертки.

Функция рассеяния точки дифракционно-ограниченной оптической системы рассчитывалась по формуле:

где $MTF_{\text{пикс.}}(f)$ – функция передачи модуляции пикселя; $MTF_{\text{ид.пикс.}}(f)$ – функция передачи модуляции ФЧЭ с равномерной чувствительностью; $MTF_{\text{дифф.}}(f)$ – поправка для учета диффузии носителей заряда; f – пространственная частота.

Поправка, учитывающая диффузию носителей заряда, описывается формулой:

$$MTF_{\text{дифф.}}(f) = \frac{1}{1 + (2\pi \cdot L \cdot f)^2}, \quad (7)$$

где L – диффузионная длина.

Функция передачи модуляции ФЧЭ связана с функцией распределения чувствительности по поверхности ФЧЭ преобразованием Фурье, вследствие этого можно восстановить распределение чувствительности по функции передачи модуляции ФЧЭ при помощи обратного Фурье-преобразования:

Параметр t определяется формулой:

$$t = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{e}, \quad (9)$$

где e – масштабный коэффициент.

Для вычисления величины эффективной фоточувствительной площади для ФЧЭ, имеющих сложную форму распределения чувствительности по поверхности, используется формула, приведенная в ГОСТ 21934-83 [15]:

$$A_{\text{эфф}} = \frac{1}{S_{\text{макс}}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_{\text{пикс}}(x, y) dx dy \quad (10)$$

где $A_{\text{эфф}}$ – эффективный размер фотоэлектрической площадки; $S_{\text{пикс}}(x, y)$ – распределение чувствительности по поверхности ФЧЭ; $S_{\text{макс}}$ – максимальное значение чувствительности по поверхности ФЧЭ.

Поскольку у большинства ФПУ второго поколения размеры ФЧЭ по горизонтали и вертикали равны, то линейный размер ФЧЭ можно рассчитать следующим образом:

$$l_{\text{эфф}} = \sqrt{A_{\text{эфф}}}, \quad (11)$$

где $l_{\text{эфф}}$ – линейный размер ФЧЭ; $A_{\text{эфф}}$ – эффективный размер фотоэлектрической площадки.

Погрешность измерения была получена в два этапа. На первом этапе определена погрешность измерения линейного размера ФЧЭ, с учетом которой на втором этапе рассчитывалась погрешность измерения величины эффективной фоточувствительной площади ФЧЭ.

При расчете погрешности измерения были учтены следующие факторы:

- ошибка измерения координаты, в которой значение сигнала равно $0,5 \times U_{\text{макс}}$, обусловленная наличием шума;
- ошибка измерения координаты, в которой сигнал равен $0,5 \times U_{\text{макс}}$, вызванная отсчетным устройством;
- ошибка результата измерения (систематическая ошибка);
- ОСШ равно 100 при наведении в центр площадки.

Для расчета погрешности измерения, вызванной ошибкой наведения на центр площадки, осуществлялось два сканирования ФЧЭ световым пятном. При первом сканировании, проводимом от точки совпадения центров ФЧЭ и светового пятна, определялось смещение Δ , при котором падение величины сигнала составляло $0,96 \times U_{\text{макс}}$. Второе сканирование проводилось со смещением Δ , а размер площадки ФЧЭ определялся по стандартной методике.

Ошибка измерения размера ФЧЭ, обусловленная наличием шума, $\varepsilon_{\text{шума}}$ рассчитывалась по формуле:

$$\varepsilon_{\text{шума}} = \frac{k_{0,5} \times 0,04}{l_{\text{эфф}}}, \quad (12)$$

где $k_{0,5}$ – коэффициент наклона функции зависимости фотоотклика от координаты оптического зонда в точке, где величина сигнала составляет $0,5 \times U_{\text{макс}}$; 0,04 – коэффициент, полученный из соотношения сигнал/шум и доверительной вероятности измерения 0,95; $l_{\text{эфф}}$ – линейный размер ФЧЭ, полученный из формулы (11).

Погрешность измерения координаты, вызванная отсчетным устройством, $\varepsilon_{\text{изм}}$ была получена при помощи формулы:

$$\varepsilon_{\text{изм}} = \frac{D_{90} \times 0,05}{l_{\text{эфф}}}, \quad (13)$$

где D_{90} – диаметр пятна рассеяния по уровню концентрации энергии 90 %; $l_{\text{эфф}}$ – линейный размер ФЧЭ, полученный из формулы (11).

Систематическая ошибка определения размера ФЧЭ $\varepsilon_{\text{пикс}}$ рассчитывалась по формуле:

$$\varepsilon_{\text{пикс}} = \frac{l_{\text{изм}}}{l_{\text{эфф}}}, \quad (14)$$

где $l_{\text{изм}}$ – величина размера ФЧЭ, полученная в результате измерения при втором сканировании; $l_{\text{эфф}}$ – линейный размер ФЧЭ, полученный из формулы (11), для заданного распределения чувствительности.

Суммарная погрешность измерения эффективного размера ФЧЭ $\varepsilon_{\text{сумм}}$ определялась по формуле:

$$\varepsilon_{\text{сумм}} = \sqrt{\varepsilon_{\text{шума}}^2 + \varepsilon_{\text{изм}}^2 + \varepsilon_{\text{пикс}}^2}, \quad (15)$$

где $\varepsilon_{\text{шума}}$ – ошибка измерения размера ФЧЭ, обусловленная наличием шума; $\varepsilon_{\text{изм}}$ – погрешность измерения, вызванная отсчетным устройством; $\varepsilon_{\text{пикс}}$ – систематическая ошибка определения размера ФЧЭ.

Суммарная погрешность измерения величины эффективной фоточувствительной площади ФЧЭ $\varepsilon_{A_{\text{эфф}}}$ рассчитывалась по формуле:

$$\varepsilon_{A_{\text{эфф}}} = (1 + \varepsilon_{\text{сумм}})^2 - 1, \quad (16)$$

где $\varepsilon_{\text{сумм}}$ – суммарная погрешность измерения эффективного размера ФЧЭ.

Результаты расчетов

Для обеспечения независимости результатов от конкретных условий измерения расчет проводился в относительных единицах. За единицу в расчете была принята величина радиуса кружка рассеяния Эри, которая определяется по формуле:

$$R_{\text{Эри}} = 1,22 \times \lambda \times \frac{NA}{2} \hat{=} 1, \quad (17)$$

где $R_{\text{Эри}}$ – радиус кружка рассеяния Эри; λ – длина волны излучения; NA – числовая апертура оптического зонда в пространстве изображений.

Диаметры пятен рассеяния для оптических зондов при различном отношении размера изображения диафрагмы и кружка Эри при коэффициентах экранирования 0; 0,2; 0,4 и 0,6, рассчитанные по формуле (3), приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета

Отношение диаметра изображения диафрагмы к диаметру кружка Эри	Коэффициент экранирования			
	0	0,2	0,4	0,6
	Диаметр пятна рассеяния зонда, отн. ед.			
0	3,118	3,656	4,880	6,836
0,5	2,874	3,494	3,982	6,102
1	2,890	3,194	4,178	5,804
1,5	3,574	3,701	4,384	5,688
2	4,370	4,450	4,782	6,070
3	6,084	6,134	6,306	7,030
4	7,875	7,913	8,037	8,417

Стоит обратить внимание, при использовании диафрагм небольшого размера наблюдается уменьшение диаметра пятна рассеяния по уровню концентрации энергии 90 % по отношению к ФРТ на величину около 15 %. И также в случае если величина отношения размера изображения диафрагмы к кружку Эри более 5, то размер пятна рассеяния слабо зависит от величины экранирования.

Результаты измерения величины эффективной фоточувствительной площади по стандартной методике измерения для площадок с равномерным распределением чувствительности приведены в табл. 2.

Результаты расчета относительных погрешностей измерения величин эффективной фоточувствительной площади (для площадок с равномерным распределением чувствительности) приведены в табл. 3.

Таблица 2

Результаты измерения

Отношение диаметра изображения диафрагмы к диаметру кружка Эри	Коэффициент экранирования			
	0		0,2	
	Величина эффективной фоточувствительной площади, отн. ед.			
	Расчетная величина	Измеренная величина*	Расчетная величина	Измеренная величина*
0	3,118	3,136	3,656	3,675
0,5	2,874	2,899	3,494	3,519
1	2,890	2,932	3,194	3,238
1,5	3,574	3,638	3,701	3,767
2	4,370	4,453	4,450	4,536
3	6,084	6,202	6,134	6,261
4	7,875	8,023	7,913	8,065
0	4,880	4,902	6,836	6,863
0,5	3,982	4,004	6,102	6,130
1	4,178	4,217	5,804	5,843
1,5	4,384	4,452	5,688	5,749
2	4,782	4,877	6,070	6,154
3	6,306	6,438	7,030	7,101
4	8,037	8,202	8,417	8,606

* *Примечание.* Приведено среднее значение с учетом систематической ошибки методики измерения.

Таблица 3

Результаты расчета

Отношение диаметра изображения диафрагмы к диаметру кружка Эри	Коэффициент экранирования							
	0		0,2		0,4		0,6	
	Относительная погрешность измерения, %							
	$\varepsilon_{I_{эфф}}$	$\varepsilon_{A_{эфф}}$	$\varepsilon_{I_{эфф}}$	$\varepsilon_{A_{эфф}}$	$\varepsilon_{I_{эфф}}$	$\varepsilon_{A_{эфф}}$	$\varepsilon_{I_{эфф}}$	$\varepsilon_{A_{эфф}}$
0	5,2	10,6	5,1	10,5	5,1	10,4	5,1	10,4
0,5	5,3	10,9	5,2	10,7	5,2	10,6	5,1	10,5
1	5,7	11,8	5,7	11,6	5,4	11,0	5,3	10,7
1,5	6,0	12,3	6,0	12,3	5,7	11,8	5,5	11,2
2	6,1	12,6	6,1	12,6	6,0	12,5	5,7	11,6
3	6,2	12,8	6,2	12,8	6,2	12,9	5,8	12,0
4	6,3	12,9	6,3	12,9	6,3	13,0	6,3	13,0

Согласно [1], погрешность методики измерения эффективной фоточувствительной площади не должна превышать 8 %, что не выполняется (см. табл. 3) в основном из-за погрешности измерения координаты, вносимой отсчетным устройством. Она вносит 5 % погрешности в измерения линейного размера и соответственно порядка 10 % в погрешность измерения эффективной фоточувствительной площади. Также из табл. 3 следует, что чем меньше изображение диафрагмы, тем выше

точность измерения. При увеличении размера изображения диафрагмы, погрешность стабилизируется и составляет порядка 13 %.

Уменьшение погрешности, вносимой отсчетным устройством, до (1–1,5) % позволит обеспечить величину погрешности измерения эффективной фоточувствительной площади ФЧЭ не более 8 %.

При моделировании процесса измерения площадок с распределением чувствительности в виде «гауссоиды» в качестве основы была

выбрана площадка ФПУ на основе InSb с шагом 15 мкм компании SCD. Для данной площадки выполняется следующее условие: величина шага площадки практически совпадает с уровнем половины чувствительности. На рис. 7 приведено распределение чувствительности по площадке ФПУ на основе InSb с ша-

гом 15 мкм и использовавшееся при моделировании.

Результаты измерения величины эффективной фоточувствительной площади по стандартной методике измерения для площадок с распределением чувствительности в виде «гауссоиды» (рис. 7) приведены в табл. 4.

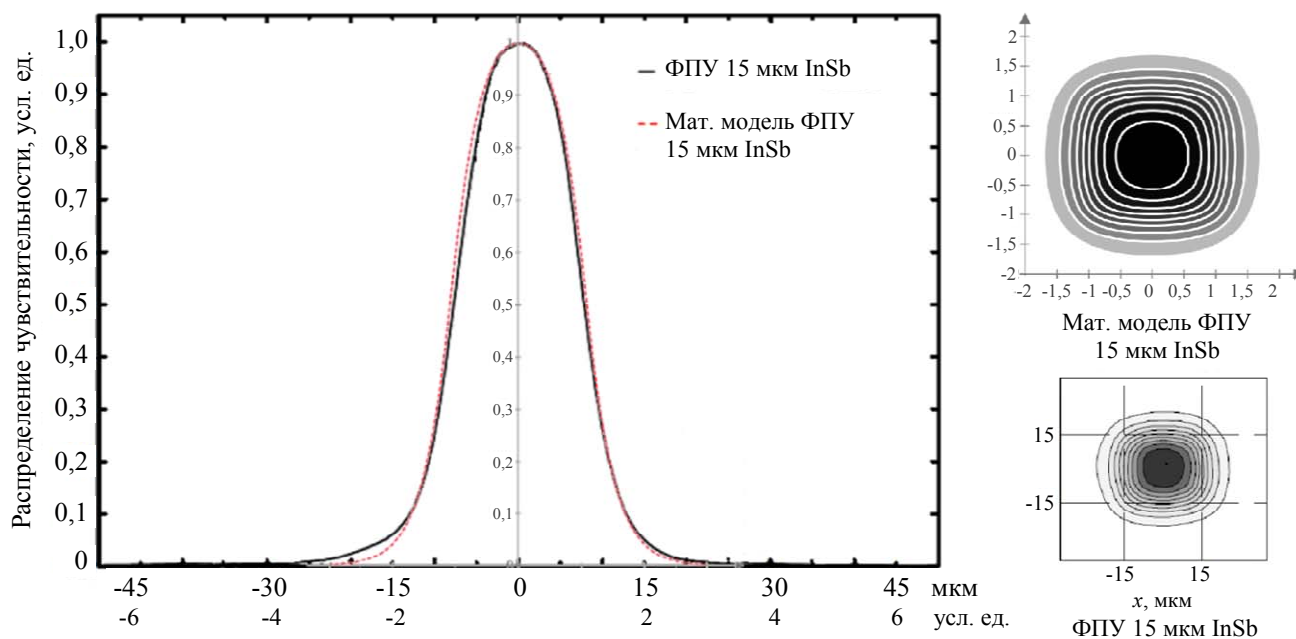


Рис. 7. Распределения чувствительности по площадке для ФПУ на основе InSb с шагом 15 мкм (черный цвет) и использованное в качестве математической модели (красный цвет).

Таблица 4

Результаты измерения

Отношение диаметра изображения диафрагмы к диаметру кружка Эри	Коэффициент экранирования			
	0		0,2	
	Величина эффективной фоточувствительной площади, отн. ед.			
	Расчетная величина	Измеренная величина*	Расчетная величина	Измеренная величина*
0	3,509	3,484	4,117	4,085
0,5	3,251	3,242	4,432	4,392
1	3,251	3,350	3,593	3,671
1,5	4,020	4,198	4,162	4,331
2	4,916	5,171	5,001	5,540
3	6,843	7,257	6,900	7,717
0	5,490	5,375	7,649	7,503
0,5	4,477	4,474	6,861	6,833
1	4,702	4,730	6,524	6,519
1,5	4,927	5,043	6,412	6,477
2	5,379	5,816	6,828	7,036
3	7,093	7,840	7,908	8,458

* Примечание – приведено среднее значение с учетом систематической ошибки методики.

Результаты расчета относительных погрешностей измерения величин эффективной фоточувствительной площади (для площадок с распределением чувствительности в виде «гауссоиды») приведены в табл. 5.

Аналогично случаю измерения площадок с равномерным распределением чувствительности минимальная ошибка измерения в сред-

нем составляет порядка 11,5 % и определяется погрешностью измерения координаты, вызванной отсчетным устройством. Обеспечение величины погрешности измерений не более 8 % возможно при выполнении двух условий: исходная погрешность не должна превышать 13 % и погрешность измерения координаты должна быть уменьшена до (1–1,5) %.

Таблица 5

Результаты расчета

Отношение диаметра изображения диафрагмы к диаметру кружка Эри	Коэффициент экранирования							
	0		0,2		0,4		0,6	
	Относительная погрешность измерения, %							
	$\varepsilon_{I_{эфф}}$	$\varepsilon_{A_{эфф}}$	$\varepsilon_{I_{эфф}}$	$\varepsilon_{A_{эфф}}$	$\varepsilon_{I_{эфф}}$	$\varepsilon_{A_{эфф}}$	$\varepsilon_{I_{эфф}}$	$\varepsilon_{A_{эфф}}$
0	5,5	11,3	5,4	11,2	5,8	11,4	5,5	11,3
0,5	5,5	11,3	5,5	11,3	5,5	11,2	5,5	11,3
1	6,4	13,3	6,0	12,3	5,6	11,4	5,5	11,3
1,5	7,2	14,9	7,0	14,4	6,1	12,5	5,6	11,6
2	7,7	16,0	12,1	25,8	9,9	20,8	6,4	13,2
3	8,3	17,3	13,1	28,1	12,0	25,5	9,0	18,9

Главным отличием при измерении площадок с распределением чувствительности в виде «гауссоиды» от площадок с равномерным распределением чувствительности является отсутствие стабилизации погрешности измерения при увеличении размера изображения диафрагмы. Чем больше отношение размера изображения диафрагмы к пятну рассеяния, тем больше погрешность измерений.

Дополнительно проведенные исследования показали, что результаты измерений площадок с распределением чувствительности в виде «гауссоиды» будут корректными только при следующем условии: измеренное значение линейного размера фотозлектрической площадки должно быть не менее диаметра пятна рассеяния по уровню концентрации энергии 90 %.

Анализ результатов

Проведенный расчет показал возможность измерения величины эффективной фотозлектрической площади ФПУ второго поколения с помощью стандартной методики. При выполнении измерений должны быть соблюдены условия:

– погрешность измерения координаты, вызванной отсчетным устройством, не должна превышать (1–1,5) %;

– отношение диаметра изображения диафрагмы к диаметру кружка Эри для систем с экранированием до 0,2 должно быть менее единицы, для систем с экранированием от 0,4 до 0,6 – не более трех;

– отношение сигнал/шум при проведении измерений должно быть не менее 100.

Минимальный размер эффективной фотозлектрической площадки, которую можно проконтролировать в спектральном диапазоне (3–5) мкм (при расчетной длине волны 4 мкм) при использовании зонда с выходной апертурой, соответствующей относительному отверстию 1:1, при соотношении диаметра изображения диафрагмы к диаметру кружка Эри равного 1 составит:

$$a = 1,22 \times \lambda \times \left(\frac{D}{f'} \right)^{-1} \times 2,89 = 14,1 \text{ мкм},$$

где a – линейный размер эффективной площадки; λ – длина волны излучения; D/f' – относительное отверстие (в расчете принято равным 1:1); 2,89 – коэффициент для расчета размера пятна для концентрации энергии 90 % (см. табл. 1).

В случае использования источника с длиной волны 2,5 мкм возможен контроль ФЧЭ размером до 9 мкм; для источника с длиной волны 1,55 мкм с помощью данной методики можно контролировать ФЧЭ до 5,5 мкм при соблюдении условий, указанных выше.

При измерении величины эффективной фоточувствительной площади ФЧЭ ФПУ ИК-диапазона спектра по стандартной методике наиболее рационально использовать оптические зонды без экранирования, поскольку они обеспечивают контроль ФЧЭ меньшего размера. Оптическая система зонда должна иметь подтвержденное дифракционное качество изображения, например, интерференционным методом. При расчете и контроле оптического зонда необходимо учитывать влияние входного окна ФПУ. Обязательной подготовительной операцией при проведении контроля является проверка качества поверхности входного окна корпуса ФПУ после откачки на предмет анализа кривизны оптической поверхности.

В качестве источника излучения необходимо использовать любой некогерентный источник излучения с узкополосным оптическим фильтром (при применении лазерных источников распределение энергии в пятне рассеяния не будет совпадать с использованным при расчете).

Перед проведением контроля необходимо проверить размер пятна рассеяния оптического зонда по уровню концентрации энергии 90 % с помощью набора диафрагм и одноэлементного фотоприемника.

Заключение

Стандартная методика измерения величины эффективной фоточувствительной площади применима для ФПУ первого поколения, а для контроля ФПУ второго поколения с малыми размерами ФЧЭ и её использование возможно при выполнении ряда условий. Основным достоинством данной методики является возможность ее применения при отсутствии информации о распределении энергии в пятне рассеяния. Стандартная методика идеально работает в случае малой диффузионной длины, т. е. при равномерном распределении чувствительности по площадке, и при-

менима в случае значительной диффузионной длины при выполнении ряда условий. При использовании стандартной методики возможно проведение измерений ФПУ дальневолнового ИК-диапазона с ФЧЭ с шагом не менее 28 мкм, средневолнового ИК-диапазона с ФЧЭ с шагом не менее 10 мкм, коротковолнового ИК-диапазона с ФЧЭ с шагом не менее 6 мкм с погрешностью, не превышающей 8 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 17772-88. Приемники излучения и устройства приемные полупроводниковые фотоэлектрические. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1988.
2. Полесский А. В. // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 4. С. 350.
3. Андосов А. И., Батиева А. А., Полесский А. В., Тресак В. К., Хамидуллин К. А. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 2. С. 149.
4. Sofradir Group [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sofradir.com/> (дата обращения: 11.02.2019).
5. Leonardo DRS [Электронный ресурс]. URL: <https://www.leonardocompany.com/> (дата обращения: 13.02.2019).
6. Chorier P., Delannoy A. // Proceeding of SPIE. 2011. Vol. 8012. P. 801202.
7. Armstrong J. M., Skokan M. R., Kinch M. A., Luttmner J. D. // Proceeding of SPIE. 2014. Vol. 9070. P. 907033.
8. Teledyne [Электронный ресурс]. URL: <http://www.teledyne.com/> (дата обращения: 18.02.2019).
9. Semi Conductor Devices (SCD) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.scd.co.il> (дата обращения: 18.02.2019).
10. Shtrichman I., Fishman T., Mizrahi U., Nahum V., Calahorra Z., Aron Y. // Proceeding of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2007. Vol. 6542. P. 65423N.
11. Appleton B., Hubbard T., Glasmann A., Bellotti E. // OPTICS EXPRESS. 2018. Vol. 26. P. 5310.
12. Rafol S. B., Gunapala S. D., Keo S. A., Ting D. Z., Soibel A., Khoshakhlagh A., Hill C. J., Luong E., Fisher A. M., Mumolo J. M., Liu J. K., Pepper B. // Infrared Physics and Technology. 2019. Vol. 96. P. 251.
13. Gunapala S. D., Rafol S. B., Ting D. Z., Soibel A., Hill C. J., Khoshakhlagh A., Liu J. K., Mumolo J. M., Keo S. A., Höglund L., Luong E. M. / IEEE Photonics Conference. 2013.
14. Ллойд Дж. Системы тепловидения. – М.: Мир, 1978.
15. ГОСТ 21934-83. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Термины и определения. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1983.

Satisfiability of the standard method for measuring an effective photosensitive area of the second-generation photodetectors

A. V. Polesskiy, N. A. Semenchenko, V. K. Tresak, and Yu. A. Firsenkova

Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru; av22236@bk.ru

Received March 29, 2019

The article is devoted to the analysis of the possibility of controlling an effective photosensitive area of the second-generation photodetectors using the standard method documented in GOST 17772-88. A significant advantage of the standard measurement method is full compatibility with the modern requirements of metrological support, and the disadvantage is the focus on monitoring the first-generation photodetectors. Based on foreign sources for the second-generation photodetectors, characteristic sensitivity distributions over the surface of the photosensitive element are determined and the process of measuring the effective area of the responsive element is modeled according to the standard method, the measurement error is determined. The results of the analysis showed the possibility of limited use of the standard method to monitoring the second-generation photodetectors.

Keywords: effective area, photosensitive element, second-generation photodetectors, measurement accuracy, methods.

REFERENCES

1. GOST 17772-88 (USSR State Committee of Standards, Moscow, 1988) [in Russian].
2. A. V. Polesskiy, *Usp. Prikl. Fiz.* **5** (4), 350 (2017).
3. A. I. Andosov, A. A. Batsheva, A. V. Polesskiy, V. K. Tresak, and K. A. Khamidullin, *Usp. Prikl. Fiz.* **6** (2), 149 (2018).
4. Sofradir Group. URL: <http://www.sofradir.com/> (11.02.2019).
5. Leonardo DRS. URL: <https://www.leonardocompany.com/> (13.02.2019).
6. P. Chorier and A. Delannoy, *Proceeding of SPIE*, **8012**, 801202 (2011).
7. J. M. Armstrong, M. R. Skokan, M. A. Kinch, and J. D. Luttmner, *Proceeding of SPIE* **9070**, 907033 (2014).
8. Teledyne. URL: <http://www.teledyne.com/> (18.02.2019).
9. Semi Conductor Devices (SCD). URL: <http://www.scd.co.il> (18.02.2019).
10. I. Shtrichman, T. Fishman, U. Mizrahi, V. Nahum, Z. Calahorra, and Y. Aron, *Proceeding of SPIE – The International Society for Optical Engineering* **6542**, 65423N (2007).
11. B. Appleton, T. Hubbard, A. Glasmann, and E. Bellotti, *OPTICS EXPRESS* **26**, 5310 (2018).
12. S. B. Rafol, S. D. Gunapala, S. A. Keo, D. Z. Ting, A. Soibel, A. Khoshakhlagh, C. J. Hill, E. Luong, A. M. Fisher, J. M. Mumolo, J. K. Liu, and B. Pepper, *Infrared Physics and Technology* **96**, 251 (2019).
13. S. D. Gunapala, S. B. Rafol, D. Z. Ting, A. Soibel, C. J. Hill, A. Khoshakhlagh, J. K. Liu, J. M. Mumolo, S. A. Keo, L. Höglund, and E. M. Luong, in *Proc. IEEE Photonics Conference* (2013).
14. J. M. Lloyd, *Thermal Imaging Systems* (Plenum Press, New York and London, 1975; Mir, Moscow, 1978).
15. GOST 21934-83 (USSR State Committee of Standards, Moscow, 1983) [in Russian].