

## Аналитическое сравнение методов измерений энергетической характеристики чувствительности и динамического диапазона

А. Д. Деомидов, А. В. Полесский, А. Д. Юдовская, А. И. Андосов, В. Н. Соляков

*Данная статья посвящена проблемам измерения энергетической характеристики чувствительности фотоприемных устройств в широком диапазоне входных воздействий (оптических потоков). В статье приведены методики измерения энергетической характеристики фотоприемных устройств ультрафиолетового и инфракрасных диапазонов спектра. Проведен сравнительный анализ методик по точности измерения и динамическому диапазону при текущем уровне развития средств измерения. Результаты анализа показали, что не существует единой методики, обладающей наибольшей функциональностью во всех спектральных диапазонах.*

*Ключевые слова:* энергетическая характеристика, фотоприемное устройство, динамический диапазон, погрешность измерения, методики измерения.

**Ссылка:** Деомидов А. Д., Полесский А. В., Юдовская А. Д., Андосов А. И., Соляков В. Н. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 6. С. 518.

**Reference:** A. D. Deomidov, A. V. Polesskiy, A. D. Yudovskaya, A. I. Andosov, and V. N. Solyakov, Usp. Prikl. Fiz. 6 (6), 518 (2018).

### Введение

В связи с растущими потребностями обеспечения работы оптико-электронных приборов (ОЭП) и систем (ОЭС) в условиях больших перепадов яркостей объектов, возникает необходимость создания фотоприемных устройств (ФПУ) с широким динамическим диапазоном энергетической характеристики.

Как правило, большой динамический диапазон (90 дБ и более) обеспечивается путем создания фотоприемных устройств с нелинейной энергетической характеристикой чувствительности [1–3].

Для корректного измерения фотоэлектрических параметров таких «нелинейных» ФПУ, а также других ОЭС для регистрации падающих потоков или освещенности (например, радиометров) необходимо измерить и соответствующим образом учесть энергетическую характеристику чувствительности.

Согласно нормативной документации [4], процесс измерения энергетической характеристики чувствительности представляет собой последовательное изменение потока излучения и измерение соответствующего фототока или напряжения фотосигнала.

В общем случае величину потока, попадающего на фотоприемник, можно изменять за счет:

- изменения светимости источника (за счет изменения его параметров);
- изменения размера источника излучения при сохранении светимости;
- применения нейтральных светофильтров (ослабителей сигнала) на пути распространения излучения;
- изменения расстояния от излучающей плоскости до приемника излучения.

Поскольку не существует универсального источника излучения, подходящего для проведения измерений на всем диапазоне электромагнитных волн, в каждом спектральном диапазоне используется свой вид источника. Это накладывает основные ограничения на использование перечисленных методов изменения потока излучения.

Целью данной работы является анализ проблем измерения энергетической характеристики чувствительности фотоприемных устройств в широком диапазоне входных воздействий (оптических потоков).

Деомидов Александр Дмитриевич, вед. инженер.  
Полесский Алексей Викторович, главный метролог, к.т.н.  
Юдовская Александра Дмитриевна, вед. инженер.  
Андосов Артём Игоревич, инженер-программист.  
Соляков Владимир Николаевич, гл. спец.  
АО «НПО «Орион».

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

Статья поступила в редакцию 4 декабря 2018 г.

© Деомидов А. Д., Полесский А. В., Юдовская А. Д., Андосов А. И., Соляков В. Н., 2018

### Источники излучения

Основными источниками излучения, используемыми для измерения параметров ФПУ, являются:

- модель абсолютно черного тела (АЧТ);
- лампа накаливая;
- газоразрядная лампа;
- светодиод;
- лазерный диод

Модель АЧТ – физическое тело с коэффициентом поглощения, близким к единице. Спектр его излучения определяется законом Планка, а длина волны максимума интенсивности излучения можно вычислить по закону смещения Вина. Данные источники излучения используются как для матричных ФПУ без охлаждаемых диафрагм (рабочий спектральный диапазон 0,9–2,5 мкм и 8–14 мкм), так и для матричных ФПУ с охлаждаемыми диафрагмами (3–5, 8–12 мкм).

Для ФПУ без охлаждаемой диафрагмы используется «высокотемпературное» АЧТ с модулированным излучением и малыми размерами излучающей поверхности. Согласно [4], превышение потока излучения в ваттах, падающего на ФПУ, над фоновым излучением, при использовании средств измерений, не включающих в себя оптические элементы, фильтры или ослабители, для абсолютно черного тела вычисляют по формуле:

$$\Phi = \frac{\sigma\beta(\varepsilon_1 T_1^4 - \varepsilon_0 T_0^4) D^2 A}{4L^2}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $\varepsilon_1$  – коэффициент излучения АЧТ ( $\approx 1$ );  $\varepsilon_0$  – коэффициент излучения модулятора;  $T_1$  – температура АЧТ;  $T_0$  – температура модулятора;  $D$  – диаметр диафрагмы АЧТ;  $A$  – эффективная площадь ФЧЭ;  $L$  – расстояние между диафрагмой АЧТ и плоскостью МФПУ;  $\beta$  – коэффициент модуляции.

Формула (1) выражает превышение потока излучения от АЧТ над потоком излучения от заслонки. Это превышение используется для измерения фотоэлектрических характеристик фотоприемников при модулированном излучении, когда приращение потока излучения вызывает приращение сигнала на выходе фотоприемника.

Изменять поток излучения можно за счет варьирования следующих параметров: температуры излучателя, диаметра диафрагмы и расстояния между диафрагмой излучателя и плоскостью ФПУ.

Для ФПУ с охлаждаемыми диафрагмами применяются низкотемпературные АЧТ с большой

площадью излучающей поверхности. Приращение потока излучения в ваттах, падающего на центральный элемент ФПУ, вычисляют по формуле (2):

$$\Phi = \frac{\sigma\varepsilon_1(T_1^4 - T_0^4)d^2 A}{4l^2}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $\varepsilon_1$  – коэффициент излучения АЧТ ( $\approx 1$ );  $T_0$ ,  $T_1$  – температура АЧТ;  $d$  – диаметр «холодной» диафрагмы ФПУ;  $A$  – эффективная площадь ФЧЭ;  $l$  – расстояние от «холодной» диафрагмы до плоскости ФЧЭ.

Поток излучения изменяется за счет изменения температуры излучающей полости.

Нейтральные светофильтры, как правило, не используются совместно с АЧТ в связи со сложностью обеспечения постоянства коэффициента поглощения в широком спектральном диапазоне, а также проблемами, связанными с собственным и отраженным от фильтра излучением. Использование фильтров к тому же приводит к уменьшению точности воспроизведения потока излучения, поскольку их спектральные коэффициенты излучения вносят дополнительную погрешность.

Лампа накаливая представляет собой «серое» тело, коэффициент излучения которого зависит от материала, состояния и температуры нити накала. Спектр излучения достаточно широк и определяется законом Планка. Пределом рабочей температуры для ламп накаливания с вольфрамовой нитью является температура 3000 К. Согласно [4], для проведения измерений рекомендуется использовать лампу накаливания типа СИС или РН при цветовой температуре  $(2856 \pm 100)$  К.

Лампы накаливания в основном используются при измерении параметров ФПУ в видимом диапазоне спектра, реже – в ближнем ИК-диапазоне. В ультрафиолетовом диапазоне спектра лампы накаливания, как правило, не используются, поскольку эту область спектра затрагивает самый край их спектральной характеристики. В среднем и дальнем ИК-диапазоне спектра использование ламп накаливания в качестве источника в измерительной аппаратуре осложняется из-за особенностей пропускания материала колбы и её собственного теплового излучения.

В случае использования ламп накаливания поток излучения, попадающий на ФПУ, можно изменять за счет изменения температуры нити накала (редко используется из-за сложности контроля), использования нейтральных светофильтров и изменения расстояния от источника до ФЧЭ.

Газоразрядная лампа – лампа, в которой оптическое излучение возникает в результате электри-

ческого разряда в газе. Лампы данного типа характеризуются достаточно высокой нестабильностью, неравномерным пространственным распределением потока излучения и изменением спектрального состава излучения во времени. Газоразрядные источники и дуговые лампы имеют различный характер спектрального распределения потока излучения [5]. В связи с этим, газоразрядные лампы практически не используются для измерения энергетической характеристики ФПУ.

Светодиод – полупроводниковый излучатель, спектр излучения которого определяется материалом и количественным составом полупроводника. Спектральные диапазоны работы светодиодов лежат от глубокого УФ-диапазона спектра до среднего ИК. Расчеты полного энергетического потока светодиодов достаточно сложны, поскольку характеристики зависят от симметричности диаграммы направленности излучения, распределения светового потока внутри индикатрисы и прочих характеристик.

Светодиоды наиболее распространены при измерениях характеристик в УФ-диапазоне спектра, поскольку обладают хорошей стабильностью параметров и отсутствием спекл-структуры в распределении излучения. Изменение потока излучения, попадающего на ФПУ, можно добиться за счет изменения величины протекающего тока, изменения расстояния до ФПУ, а также применения нейтральных светофильтров или аттенуаторов ввиду относительно узкой спектральной полосы излучения [4].

Лазерный диод – полупроводниковый излучатель, создающий когерентный оптический поток. Лазерное излучение, проходя через неоднородную среду, претерпевает случайную модуляцию. Эта

модуляция проявляется в структуре рассеянного излучения, делая его пространственно неоднородным. В результате, образующиеся световые пятна будут расположены случайным образом в плоскости наблюдения, имея при этом различные формы и размеры [6]. Методы изменения потока излучения, попадающего на ФПУ от лазерных диодов такие же, как для светодиодов.

### Изменение потока излучения за счет изменения светимости источника

Светимость источников излучения вроде светодиодов и лазерных диодов может быть изменена путем изменения величины протекающего тока, однако и те и другие не могут формировать малые уровни освещенности из-за особенностей генерации лазерного излучения. Стабильность оптической мощности лазеров, как правило, составляет 2 %. По этой причине использование лазера в режиме постоянного тока как опорного источника для измерения энергетической характеристики не позволит обеспечить динамический диапазон более 50–100 раз. Лазерные диоды в режиме ШИМ-модуляции и светодиоды используются редко, поскольку они проигрывают оптическим аттенуаторам по сложности реализации и динамическому диапазону.

Метод изменения потока излучения за счет изменения светимости источника наиболее применимо для АЧТ, поскольку температура АЧТ может изменяться в широком диапазоне. В таблицах 1–4 приведены значения светимости некоторых моделей АЧТ компании LumaSense в зависимости от их температуры для различных спектральных диапазонов.

Таблица 1

Значение светимости для АЧТ М345-LC

Температура, °C	Светимость (Вт/см <sup>2</sup> ), в спектральном диапазоне (мкм)	
	3,5–5	8–10
-40	$9,05 \times 10^{-3}$	0,447
100	0,244	0,908

Таблица 2

Значение светимости для АЧТ М345

Температура, °C	Светимость (Вт/см <sup>2</sup> ), в спектральном диапазоне		
	0,9–1,7	3,5–5	8–10
-5	-----*	0,0306	0,625
100	$1,64 \times 10^{-6}$	0,244	0,908
170	$1,64 \times 10^{-5}$	0,497	0,915

\* светимость недостаточна для проведения измерений.

Таблица 3

## Значение светимости для АЧТ М315

Температура, °С	Светимость (Вт/см <sup>2</sup> ), в спектральном диапазоне		
	0,9–1,7	3,5–5	8–10
30	-----*	0,0747	0,765
100	$9,05 \times 10^{-3}$	0,244	0,908
400	$7,07 \times 10^{-3}$	1,265	0,641

\* светимость недостаточна для проведения измерений.

Таблица 4

## Значение светимости для АЧТ М360

Температура, °С	Светимость (Вт/см <sup>2</sup> ), в спектральном диапазоне		
	0,9–1,7	3,5–5	8–10
50	-----*	0,112	0,823
100	$1,64 \times 10^{-6}$	0,244	0,908
1100	0,704	1,08	0,166

\* светимость недостаточна для проведения измерений.

Анализ таблиц 1–4 показывает следующее:

– для диапазона 8–10 мкм (для измерения параметров ФПУ используется «протяженные» АЧТ М345-ЛС, М345, М315) динамический диапазон изменения светимости за счет температуры составляет не более 2 раз;

– для диапазона 3,5–5 мкм (для измерения параметров ФПУ используется «протяженные» АЧТ М345-ЛС, М345, М315) динамический диапазон изменения светимости за счет температуры может составить ~27 раз (~28,6 дБ) при использовании АЧТ М345-ЛС;

– для диапазона 0,9–1,7 мкм (для измерения параметров ФПУ используется «точечное» АЧТ М360) динамический диапазон изменения светимости за счет температуры может составить  $\sim 42 \times 10^5$  раз (112 дБ).

Таким образом, метод изменения потока излучения за счет изменения светимости источника наиболее применим для спектрального диапазона 3,5–5 и 0,9–1,7 мкм.

Данные о погрешности данного метода для спектрального диапазона 0,9–1,7 мкм приведены в таблице 5. Приведенная погрешность складывается из погрешности определения коэффициента использования ФПУ [7], которая для диапазона 0,9–1,7 мкм составляет 5,8 %, и погрешности АЧТ М360 как эталона 2 разряда, составляющей  $\pm 1$  °С [8].

Данные о погрешности данного метода для спектрального диапазона 3,5–5 мкм приведены в таблице 6. Погрешность определения коэффициента использования составляет 8,6 %, а погрешность АЧТ М345-ЛС, согласно [8], составляет  $\pm 0,5$  °С.

Таблица 5

## Погрешность определения потока излучения для спектрального диапазона 0,9–1,7 мкм

Температура, °С	100	200	300	400	500	1000
Погрешность определения потока, %	12,3	8,2	7,0	6,3	5,9	5,6

Таблица 6

## Погрешность определения потока излучения для спектрального диапазона 3,5–5 мкм

Температура, °С	-40	0	40	80	150	170
Погрешность определения потока, %	9,5	9,0	8,8	8,7	8,6	8,6

Исходя из вышеуказанных данных можно сделать следующие выводы.

– Данный метод контроля энергетической характеристики чувствительности хорошо применим только для ФПУ коротковолнового ИК-диапазона. Он обеспечивает широкий диапазон изменения потока излучения, но имеет сравнительно низкую

точность воспроизведения мощности излучения при малых потоках.

– Измерение энергетической характеристики и динамического диапазона ФПУ второго поколения (с «охлаждаемыми» диафрагмами) не представляется возможным при использовании протяженных низкотемпературных АЧТ (т. е. по

стандартной схеме измерения параметров для ФПУ данного типа) [9]. Энергетическую характеристику ФПУ возможно проконтролировать только для центральной зоны матрицы, примерно равной по размеру «холодной» диафрагме ФПУ.

### Изменение потока излучения за счет изменения размера источника излучения

Данный метод хорошо применим для высокотемпературных АЧТ по двум причинам:

– излучающая полость АЧТ имеет равномерную светимость, поэтому зависимость потока от площади источника является прямо пропорциональной (в отличие от ламп, светодиодов и лазерных диодов);

– высокотемпературные АЧТ могут создать значительный поток и при малой площади излуча-

теля (в отличие от низкотемпературных АЧТ с большой излучающей полостью).

Динамический диапазон данного метода определяется соотношением площадей диафрагмы минимально возможного размера к размеру всей излучающей полости АЧТ. Максимальный динамический диапазон изменения потока излучения для данного метода можно рассчитать по следующей формуле:

$$Din = 20 \lg \left( \left( \frac{D_{\max}}{D_{\min}} \right)^2 \right), \quad (3)$$

где  $Din$  – величина динамического диапазона;  $D_{\min}$  – минимально возможный диаметр диафрагмы;  $D_{\max}$  – диаметр излучающей полости АЧТ.

В таблице 7 представлены сравнительные характеристики моделей «высокотемпературных» АЧТ.

Таблица 7

Сравнительные характеристики моделей АЧТ

Наименование	Диапазон температур, °С	Выходная апертура, мм	Динамический диапазон, дБ	
			$D_{\min} = 0,1$ мм	$D_{\min} = 0,02$ мм
АЧТ-30/900/2500 «НПП «Эталон»	900–2500	30	99,1	127,0
LAND P1200B «LAND Instruments International»	150–1150	50	107,9	135,9
АЧТ К19.532, завод «Кварц»	50–1000	8	76,1	104,1
M360 LumaSense, США	50–1100	25	95,9	123,9
АЧТ Электра, НПЛ «Метропир»	300–1250	30	99,1	127,0
АЧТ «Медея», НПЛ «Метропир»	50–500	70	113,8	141,8

Погрешность изменения потока излучения в данном методе зависит от погрешности определения площади диафрагмы, относительную величину которой можно рассчитать по формуле:

$$\Delta P = \Delta S = \frac{\Delta D}{2D} \quad (4)$$

где  $\Delta P$  – относительная погрешность определения потока;  $\Delta S$  – относительная погрешность площади диафрагмы;  $\Delta D$  – погрешность диаметра диафрагмы (мм);  $D$  – диаметр диафрагмы (мм).

В таблице 8 приведены результаты расчета относительной погрешности метода при использовании в качестве диафрагм «пинхоллов» 10PP производства Vicon Standa.

На основании приведенных таблиц можно сделать вывод, что данный метод позволяет измерять энергетическую характеристику ИК-фотоприемников в широком динамическом диапазоне, причём с хорошей точностью. Проблемой реализации данного метода является нагрев диафрагм от АЧТ, а также необходимость использования большого количества диафрагм, что приводит к трудностям, связанных с их установкой и заменой.

Таблица 8

Относительная погрешность определения потока излучения

Размер отверстия «пинхолла» (мкм)	10	20	30	50	75	100
Абсолютная погрешность диаметра (мкм)	±1	±2	±2	±3	±3	±4
Относительная погрешность определения потока излучения, %	±5	±5	±3,3	±3	±2	±2

### Изменение потока излучения за счет применения нейтральных светофильтров

Нейтральные светофильтры, как правило, используются в УФ, видимом, ближнем и коротко-

волновом ИК-диапазонах спектра. В средневолновом и длинноволновом ИК-диапазоне применение нейтральных фильтров затруднено из-за переотражений окружающих объектов.

Также существует проблема создания нейтральных светофильтров в широком спектральном диапазоне. Как правило, отступление от нейтральности приводит к необходимости вводить поправочный коэффициент, учитывающий селективность нейтрального светофильтра [4]. Этот поправочный коэффициент должен рассчитываться для каждого ФПУ отдельно из-за разброса их спектральных характеристик. Как и в случае с применением диафрагм, для измерения энергетической характеристики необходимо использовать существенный набор светофильтров с различными коэффициентами пропускания. При использова-

нии набора светофильтров погрешность определения потока излучения может составлять до 30 %.

Довольно интересной альтернативой классических светофильтров являются оптические аттенюаторы, коэффициент ослабления которых можно перестраивать с высокой точностью. Допускается последовательное включение нескольких аттенюаторов с целью расширения динамического диапазона. Аттенюаторы применяются в УФ, видимом и ближнем ИК-диапазоне спектра. В таблице 9 приведены сравнительные характеристики современных аттенюаторов.

Таблица 9

Сравнительные характеристики аттенюаторов

Аттенюатор	Рабочие длины волн, нм	Ослабление	Вносимые потери
Оптический аттенюатор 330А	1310, 1480, 1550, 1625	от 0 до 35 дБ с шагом 0,1 дБ	не более 2 дБ
Дифракционные аттенюаторы DVA-8 и DVA-22	1064, 800, 633, 532, 488, 355, 266 или любая другая по требованию	от 0 до 34 дБ при повороте от 0° до 360°	отклонение от линейности < 5 %
FOD 5418 FOD 5419 FOD 5420	1310, 1550 850, 1300 850, 1300, 1310, 1550	от 0 до 80 дБ разрешение 0,05 дБ	не более 2,5 дБ

Сложность использования аттенюаторов заключается в необходимости использования лазерных излучателей и специальных систем для формирования равномерной освещённости на поверхности фоточувствительных элементов ФПУ. К тому же необходимо предусматривать защиту установок с использованием аттенюаторов от перепадов температур и механических воздействий, которые могут привести к деформации оптического волокна и, как следствие, к случайному изменению потока излучения.

#### Изменение потока излучения за счет изменения расстояния

Для точечного источника света (размеры которого много меньше расстояния от источника до объекта) зависимость освещённости в заданной плоскости от расстояния до неё, описывается следующей формулой:

$$E \sim \frac{1}{r^2}, \quad (5)$$

где  $E$  – освещённость в заданной плоскости;  $r$  – расстояние от источника излучения до плоскости.

Формула (5) справедлива для сред, где нет заметного поглощения и рассеивания энергии.

Поскольку излучение от точечного источника имеет форму сферы, каждая точка поверхности которой имеет одинаковую освещённость, а поверхность фоточувствительных элементов ФПУ представляет собой плоскость, то минимальное

расстояние между источником и приемником необходимо выбирать из условия равномерности освещённости поверхности ФЧЭ. Если источник излучения является ламбертовым (это справедливо для большинства АЧТ и ламп), то для него справедливо следующее выражение [10]:

$$E_E = E_{e0} \times \cos^4 \varepsilon, \quad (6)$$

где  $\varepsilon$  – угол между направлением излучения и нормалью к освещаемой площадке;  $E$  – распределение освещённости по площадке.

В случае применения ламп накаливания расстояние от источника до заданной плоскости должно превышать пятикратный размер тела накала лампы [4].

Минимальное расстояние определим из условия, чтобы значение косинуса четвертой степени угла направления излучения было не более 0,99 для матрицы 320×256 с шагом 30 мкм.

Минимальное расстояние, на котором должно быть установлено ФПУ, можно определить по формуле:

$$L_{\min} = \frac{d/2}{\arccos(\sqrt[4]{0,99})} = \frac{6,15 \text{ мм}}{\arccos(\sqrt[4]{0,99})} = 86,8 \text{ мм}, \quad (6)$$

где  $L_{\min}$  – минимальное расстояние, на котором должно быть установлено ФПУ;  $d$  – диагональ матрицы ФПУ.

Величину динамический диапазона, обеспечиваемого данным методом на расстоянии  $L = 4$  м, можно определить по формуле:

$$D = 20 \lg \left( \frac{L}{L_{\min}} \right)^2 = 20 \lg \left( \frac{4000}{86,8} \right)^2 \approx 66,5 \text{ дБ.} \quad (7)$$

При погрешности измерения расстояния в 1 мм в худшем случае (для расстояния 86,8 мм) относительная погрешность метода составит  $\sim 2,3$  %.

Если требования по равномерности распределения освещенности в плоскости фоточувствительных элементов ФПУ снизить до 10 %, то минимальное расстояние  $L_{\min}$  составит 40 мм. Тогда при тех же условиях проведения эксперимента динамический диапазон составит 80 дБ, а относительная погрешность определения потока для точки на оси не превысит 5 %.

Результаты анализа данного метода показывают, что он обеспечивает наибольшую точность при приемлемой величине динамического диапазона. Метод применим не только для точечных и ламбертовых источников, но и для источников другого типа. Однако в этом случае равномерность освещенности от источника в плоскости фоточувствительных элементов ФПУ необходимо определять дополнительно. Стоит отметить, что данный метод обеспечивает динамический диапазон в пределах 80 дБ. Дальнейшее расширение динамического диапазона затруднено в связи с необходимостью увеличения расстояния от источника излучения до ФПУ. Кроме того, при реализации данного метода существует проблема измерения точного расстояния от источника излучения до фоточувствительных элементов ФПУ, поскольку, в общем случае, они находятся в закрытых объемах и прямое измерение расстояния между ними затруднено.

### Заключение

Проведенный анализ методов изменения энергетической характеристики позволяет дать рекомендации по выбору метода измерения ФПУ УФ, коротковолнового ИК-диапазона, а также средневолновых и дальневолновых ИК ФПУ с «холодными» диафрагмами.

Для УФ-диапазона спектра рационально использование метода измерения энергетической характеристики, основанного на использовании аттенуаторов. Данный метод позволяет достичь измерения энергетической характеристики в диапазоне потоков до 102 дБ, при погрешности определения потока 2,8 %.

Для ФПУ коротковолнового ИК-диапазона применимы методы измерения энергетической

характеристики, основанные на использовании как аттенуаторов, так и набора диафрагм. При использовании аттенуаторов достигим динамический диапазон в 160 дБ при погрешности определения потока 1,4 %, а при использовании диафрагм – до 140 дБ при погрешности, не превышающей 5 %. Стоит отметить, что наиболее прост в реализации метод, основанный на использовании набора диафрагм.

Измерение энергетической характеристики каждого пикселя ФПУ с «холодной» диафрагмой, работающего в средневолновом или дальневолновом ИК-диапазоне, не представляется возможным, поскольку единственный метод, обеспечивающий одновременную засветку всех фоточувствительных элементов (метод, основанный на изменении температуры АЧТ) не обеспечивает приемлемой величины динамического диапазона изменения потока излучения.

По этой причине для ФПУ с «холодными» диафрагмами возможно измерение энергетической характеристики только в центральной области методом изменения потока излучения за счет размера источника излучения, или метода изменения потока излучения за счет изменения расстояния. Вероятно, для ФПУ с «холодными» диафрагмами будет возможно применения метода, основанного на измерении энергетической характеристики путем изменения экспозиции (времени накопления). Однако данный метод не может быть признан объективным без проведения дополнительных исследований, поскольку на точность измерения будет влиять нелинейность входной ячейки ФПУ.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Tu N., Hornesy R., Ingram S. G. // Proc. IEEE Can. Conf. Electrical Comput. Eng. May 1998. P. 754.
2. Vatteroni M., Valdastrì P., Sartori A., et al. // Electron Devices, IEEE Transactions. Feb. 2011. Vol. 58. No. 4.
3. Storm G., Henderson R., Hurwitz J. E. D., et al. // IEEE Journal of Solid-State Circuits. Sept. 2006. Vol. 41. No. 9.
4. ГОСТ 17772-88. Приемники излучения и устройства приемные полупроводниковые фотоэлектрические. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1988.
5. Докторович И. В., Годованюк В. Н., Юрьев В. Г., Житарюк В. Г. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2015. № 2-3. С. 53.
6. Ульянов С. С. // Соросовский образовательный журнал. 1999. № 5. С. 112.
7. Полесский А. В., Соломонова Н. А., Семенченко Н. А. // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 4. С. 360.
8. Описание типа средств измерений № 16045-08 от 04.02.2008: «Источники излучения в виде моделей черного тела серии М300».
9. Полесский А. В. // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 4. С. 350.
10. Закаэнов Н. П., Киришин С. И., Кузичев В. Н. Теория оптических систем. – М.: Машиностроение, 1992. С. 448.

## Analytical comparison of energy characteristics of sensitivity and dynamic range measuring methods

A. D. Deomidov, A. V. Polesskiy, A. D. Yudovskaya, A. I. Andosov, and V. N. Solyakov

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

Received December 4, 2018

*This article is devoted to the problems of photodetector's sensitivity energy characteristics measuring in a wide range of input optical fluxes. Methods for photodetector's sensitivity energy characteristics measuring in ultraviolet and infrared spectral ranges are presented. There is comparative analysis of accuracy and dynamic range measuring methods range at the current level of development of measuring instruments. The results of the analysis showed that there is no uniform methodology with the greatest functionality for all spectral ranges.*

*Keywords:* energy characteristic, FPA, dynamic range, measurement error, methodic of measurement.

### REFERENCES

1. N. Tu, R. Hornesy, and S. G. Ingram, Proc. IEEE Can. Conf. Electrical Comput. Eng. May, 754 (1998).
2. M. Vatteroni, P. Valdastrì, A. Sartori, et al., Electron Devices, IEEE Transactions **58** (4), (2011).
3. G. Storm, R. Henderson, J. E. D. Hurwitz, et al., IEEE Journal of Solid-State Circuits **41** (9), (2006).
4. GOST 17772-88. (USSR Gosstandart, Moscow, 1988) [in Russian].
5. I. V. Doctorovich, V. N. Godovanyuk, V. G. Yuryev, and V. G. Zhitaryuk, Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature, No. 2-3, 53 (2015).
6. S. S. Ul'yanov, Soros Educational Journal, No. 5, 112 (1999).
7. A. V. Polesskiy, N. A. Solomonova, and N. A. Semchenko, Usp. Prikl. Fiz. **5** (4), 360 (2017).
8. Review of Measurement Instrumentation No. 16045-08 (February 04, 2008) [in Russian].
9. A. V. Polesskiy, Usp. Prikl. Fiz. **5** (4), 350 (2017).
10. N. P. Zakaznov, S. I. Kirushin, and V. I. Kuzichev, *Theory of Optical Systems* (Mashinostroenie, Moscow, 1992) [in Russian].