

**Методы измерения размера фоточувствительной площадки, неравномерности чувствительности и коэффициента фотоэлектрической связи (обзор)***А. И. Андосов, А. А. Батшева, А. В. Полесский, В. К. Тресак, К. А. Хамидуллин*

*Данная статья является обзорной и содержит данные о методиках измерения фотоэлектрических характеристик ФПУ первого и второго поколений, таких как размер фоточувствительной площадки, неравномерность чувствительности и коэффициент фотоэлектрической связи. Все приведенные методики измерения используются при измерениях ФПУ первого и второго поколения на ведущих предприятиях в России и мире. Одновременно в статье рассмотрены зарубежные установки для проведения измерений фотоэлектрических характеристик ФПУ второго поколения и принципы их работы.*

*Ключевые слова:* фотоприемное устройство, измерение параметров, методики измерения, фотоэлектрическая связь, размер фоточувствительной площадки, неравномерность чувствительности.

**Введение**

Одной из сложных задач при производстве фотоприемных устройств (ФПУ) второго поколения является обеспечение измерений размера фоточувствительной площадки, неравномерности чувствительности и коэффициента фотоэлектрической связи. На сегодняшний день в мировой практике нет единого подхода к измерению вышеприведенных параметров и, соответственно, подходов к построению оптико-электронной контрольно-измерительной аппаратуры (КИА). Это связано с тем, что для реализации данных измерений требуется высокоточный оптико-механический модуль, метрологические параметры которого сложно определить.

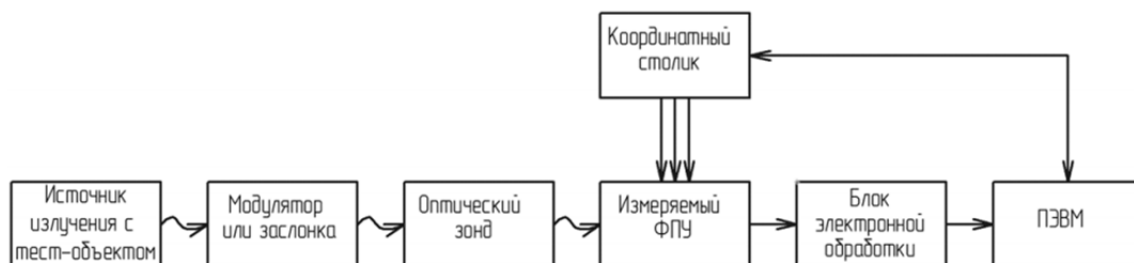
В статье проведен обзор отечественных и зарубежных методик контроля, описание КИА и ее принципов функционирования. Стоит отметить,

что применение зарубежной КИА при производстве ФПУ второго поколения не позволяет решить задачу метрологического обеспечения, поскольку для зарубежной КИА, как правило, отсутствуют сведения о погрешностях измерений.

**Измерения фотоэлектрических характеристик ФПУ первого поколения**

Как уже сказано, одной из важнейших задач при анализе характеристик ФПУ является обеспечение измерений размера фоточувствительной площадки, неравномерности чувствительности и коэффициента фотоэлектрической связи.

В России для производства ФПУ первого поколения применяется КИА, принцип работы которой основан на методиках, описанных в ГОСТ 17772–88 [1]. Обобщенная схема таких измерений приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Обобщенная схема измерения размера фоточувствительной площадки, неравномерности чувствительности и коэффициента фотоэлектрической связи ФПУ первого поколения.

Андосов Артем Игоревич, инженер-программист.  
Батшева Анастасия Александровна, инженер 2 кат.  
Полесский Алексей Викторович, главный метролог, к.т.н.  
Тресак Виктория Константиновна, инженер.  
Хамидуллин Камиль Алиевич, начальник отдела.  
АО «НПО «Орион».

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

Статья поступила в редакцию 28 марта 2018 г.

© Андосов А. И., Батшева А. А., Полесский А. В., Тресак В. К., Хамидуллин К. А., 2018

Измерение размера фоточувствительной площадки выполняется следующим образом. На поверхности фоточувствительного элемента (ФЧЭ) необходимо создать осесимметричное пятно рассеяния, геометрический размер которого (по уровню 90%-концентрации энергии в пятне) 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 фотоэлектрический центр площадки). После этого зонд перемещают таким образом, чтобы величина сигнала для прямоугольных площадок составила  $0,5 \times U_{\max}$  (перемещения проводятся последовательно в двух взаимно перпендикулярных направлениях) и  $0,41 \times U_{\max}$  для круглых площадок. Фиксируются соответствующие координаты  $x_1, x_2, x_3, x_4$  для прямоугольных площадок и  $x_1, x_2$  для круглых. За величину фотоэлектрической площадки для прямоугольных площадок  $A_{\text{эфф}}$  принимают следующее значение:

$$A_{\text{эфф}} = (x_1 - x_2) \times (x_3 - x_4), \quad (1)$$

где  $A_{\text{эфф}}$  – величина фотоэлектрической площадки;  $x_1, x_2$  – координаты по вертикали для  $0,5 \times U_{\max}$ ;  $x_3, x_4$  – координаты по горизонтали для  $0,5 \times U_{\max}$ .

За величину фотоэлектрической площадки для круглых площадок  $A_{\text{эфф}}$  принимают значение:

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

где  $A_{\text{эфф}}$  – величина фотоэлектрической площадки;  $x_1, x_2$  – координаты по одной из осей для  $0,41 \times U_{\max}$ .

При проведении измерений должны выполняться определенные требования: 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 эффективной площадки для ФП и ФПУ первого поколения не превышает 8 %.

Измерение коэффициента фотоэлектрической связи проводят по вышеприведенной схеме (рис. 1). На поверхности ФЧЭ создается осесимметричное пятно рассеяния, которое по уровню 90%-концентрации энергии в пятне не превышает размера площадки и зазора между фоточувствительными элементами (т. е. больший по размеру, чем для измерения величины площадки). Далее проводится фокусировка пятна на площадке (по величине максимума фотосигнала) и фиксируется величина  $U_{\max}$ . Для нахождения центра площадки зонд перемещают в положения, где напряжение фотосиг-

нала составляет  $0,5 \times U_{\max}$ , и проводится регистрация соответствующих координат  $x_1, x_2$ . Затем зонд помещают в центре между координатами  $x_1, x_2$  и проводят измерение фотоотклика с соседних площадок  $U_{\text{но}}$ .

За величину коэффициента фотоэлектрической связи (ФЭС) принимают выражение:

$$K_{\text{ФЭС}} = \frac{U_{\text{но}}}{U_{\text{осв}}} \quad (3)$$

где  $K_{\text{ФЭС}}$  – величина коэффициента фотоэлектрической связи;  $U_{\text{но}}$  – фотосигнал с неосвещенного ФЧЭ;  $U_{\text{осв}}$  – фотосигнал с освещенного ФЧЭ.

Если все условия измерения соблюдены, то погрешность измерения величины коэффициента фотоэлектрической связи для ФП и ФПУ первого поколения не превышает 3 %.

Для измерения неравномерности чувствительности по поверхности ФЧЭ ФП и ФПУ первого поколения на поверхности ФЧЭ необходимо создание зондирующего пятна, размер которого по уровню 90%-концентрации энергии в пятне не превышает 20 % от размера фоточувствительной площадки. Далее осуществляется сканирование зондом поверхности ФЧЭ и обработка полученной зависимости. При выполнении всех условий измерения погрешность измерения величины неравномерности чувствительности по поверхности ФЧЭ для ФП и ФПУ первого поколения не превышает 20 %.

### Методы измерения фотоэлектрических характеристик ФП второго поколения

Современные ФП второго поколения, производимые в России, имеют следующие размеры фоточувствительных площадок:

- в УФ-диапазоне спектра – 30 мкм;
- в коротковолновом и средневолновом ИК-диапазоне – 30 мкм и 15 мкм;
- в длинноволновом ИК-диапазоне – 30 мкм, 28 мкм, 25 мкм.

Для измерения размера фоточувствительной площадки, неравномерности чувствительности и коэффициента фотоэлектрической связи ФП второго поколения, в соответствии с вышеописанной методикой, в некотором приближении можно принять, что размер зондирующего пятна для ФП с шагом 30 мкм должен быть не более 6 мкм, для шага 15 мкм – диаметр пятна 3 мкм, а для шага 10 мкм – диаметр пятна 2 мкм.

Теоретически достижимый размер пятна рассеяния определяются дифракцией. Для осесимметричных систем без центрального экранирования

диаметр кружка рассеяния можно определить по формуле из [2]:

$$d(\lambda) = 3,794 \times \lambda \times 2 \times A = 3,794 \times \lambda \frac{D}{f'}, \quad (4)$$

где  $d(\lambda)$  – диаметр кружка рассеяния для уровня 90%-концентрации энергии;  $\lambda$  – длина волны;  $A$  –

числовая апертура оптического зонда;  $D$  – диаметр выходного зрачка;  $f'$  – заднее фокусное расстояние.

Данные о предельно допустимой величине пятна рассеяния по уровню 90 %-концентрации энергии в зависимости от длины волны и относительного отверстия приведены в табл. 1 [3].

Таблица 1

**Предельно допустимые величины пятна рассеяния по уровню 90%-концентрации энергии в зависимости от длины волны и относительного отверстия**

| Относительное отверстие | Спектральный диапазон (расчетная длина волны), мкм |               |           |              |
|-------------------------|--|---------------|-----------|--------------|
|                         | 0,25...0,36 (0,33)                                 | 0,9...2,5 (1) | 3...5 (4) | 8...10 (9,4) |
| 0,5                     | 0,63   | 1,90          | 7,59      | 17,83        |
| 0,8                     | 1,00   | 3,04          | 12,14     | 28,53        |
| 1                       | 1,25   | 3,79          | 15,18     | 35,66        |
| 1,4                     | 1,75   | 5,31          | 21,25     | 49,93        |
| 2                       | 2,50   | 7,59          | 30,35     | 71,33        |
| 3                       | 3,76   | 11,38         | 45,53     | 106,99       |
| 4                       | 5,01   | 15,18         | 60,70     | 142,65       |

Из табл. 1 видно, что методика измерения размера фоточувствительной площадки и фотоэлектрической связи с использованием методики, описанной в ГОСТ 17772–88, может быть применима только в УФ- и коротковолновом ИК-диапазонах спектра. При этом в УФ-диапазоне спектра ограничений по размеру измеряемой площадки практически нет (данная методика применима для площадок размером до  $5 \times 5$  мкм).

В коротковолновом ИК-диапазоне спектра контролировать размер площадки для ФПУ с шагом 30 мкм сравнительно легко. Для ФПУ с шагом 15 мкм требуется зонд с очень трудновыполнимыми требованиями по относительному отверстию и качеству изображения. При этом контроль должен проводиться до установки входного окна, поскольку оно довольно сильно окажет влияние на зондирующее пятно. Контролировать размер площадки ФПУ диапазона 0,9...2,5 мкм с шагом 10 мкм данным методом невозможно. Требования по соотношению размера зондирующего пятна и размера фоточувствительной площадки для современных ФПУ второго поколения в диапазонах 3...5 и 8...14 мкм невыполнимо.

Современные фотоприемные устройства второго поколения, производимые за рубежом, имеют площадки размером 30 мкм, 15 мкм, 12,5 мкм, 10 мкм и 8 мкм, причем с перспективой перехода на размер площадки 7,5 мкм и 5 мкм.

В связи с указанными обстоятельствами, в России и за рубежом активно развиваются подходы, основанные на другом принципе измерений. В основе этого принципа измерений лежит следующее положение: при сканировании ФЧЭ изобра-

жением светящейся щели, фотосигнал представляет собой не распределение чувствительности по площадке элемента, а свертку функции распределения энергии в пятне рассеяния оптического зонда и функции распределения чувствительности по площадке элемента [4]. Зависимость сигнала от перемещения изображения щели относительно ФЧЭ определяется интегралом:

$$U(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(x') E(x-x') dx', \quad (5)$$

где  $U(x)$  – зависимость фотосигнала от координаты;  $S(x')$  – функция распределения чувствительности фотоприемника;  $E(x')$  – функция распределения энергии в пятне рассеяния оптического зонда в плоскости ФЧЭ.

Для восстановления распределения чувствительности фотоприемника необходимо знать функцию распределения энергии в пятне рассеяния оптического зонда  $E(x')$  и измерить зависимость сигнала от перемещения изображения щели относительно ФЧЭ  $U(x)$ . Далее осуществить расчет по следующей формуле:

$$S(x') = F^{-1} \left( \frac{F(U(x'))}{F(E(x'))} \right), \quad (6)$$

где  $F^{-1}(\dots)$  – обратное Фурье-преобразование;  $F(\dots)$  – прямое Фурье-преобразование.

Реализация данного метода в России была проведена АО «НПО «Орион» в специализирован-

ной установке измерения размера фоточувствительной площадки и коэффициента фотоэлектрической связи. К недостаткам установки можно отнести то, что в качестве тест-объекта используется щель, и по этой причине нет возможности проводить измерения по всей поверхности ФЧЭ, а возможно только по одной из координат. Также в качестве функции распределения энергии в пятне рассеяния используется гауссоида, что приводит к увеличению погрешности измерения.

### Обзор зарубежной КИА для измерения фотоэлектрических характеристик ФП второго поколения

Вышеизложенный принцип измерения распределения чувствительности по площадке элемента приведен в описании процесса измерения, применяемого в компании Sofradir (Франция) [5]. Особенностью является то, что компания Sofradir при вычислении выражения (6) не проводит обратное Фурье-преобразование. Вследствие этого выполняется не измерение размера фоточувствительной площадки, а измерение частотно-контрастной характеристики (ЧКХ). Принципиальная схема измерительной установки приведена на рис. 2.

Как видно, схемы измерения, приведенные на рис. 1 и 2, фактически идентичны. Единственным отличием является тест-объект: для схемы на рис. 1

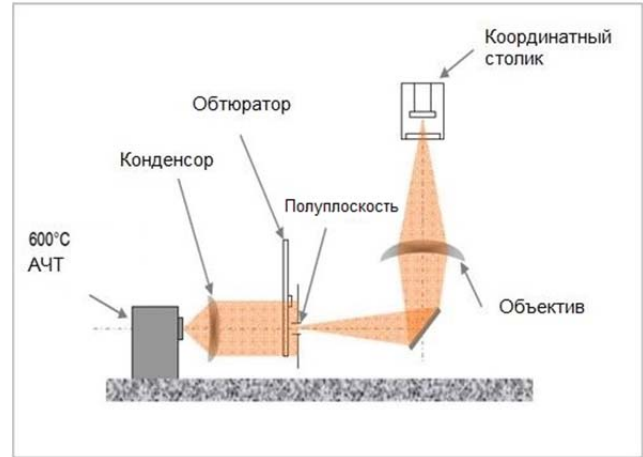


Рис. 2. Принципиальная схема измерения ЧКХ ФПУ второго поколения компании Sofradir.

он представляет собой точечную диафрагму, а на рис. 2 – полуплоскость. В качестве источника излучения в видимом и коротковолновом ИК-диапазоне спектра используются керамические нагреватели с температурой более 1500 °С, в средневолновом и длинноволновом ИК-диапазоне – АЧТ с температурой 600 °С. Также между источником излучения и тест-объектом (полуплоскостью) могут быть установлены фильтры для выбора спектрального диапазона.

Внешний вид установок, применяемых в компании Sofradir, приведен на рис. 3.



а



б

Рис. 3. Внешний вид установок для измерения ЧКХ ФПУ второго поколения, применяемых в компании Sofradir (Франция), (а) – в видимом, коротковолновом и средневолновом ИК-диапазонах; (б) – в длинноволновом ИК-диапазоне.

Подобный метод измерения распределения чувствительности по поверхности ФЧЭ используется и в «Национальном институте стандартов и технологии США» (NIST) [6]. В приводимых информационных материалах используется методика, аналогичная применяемой компанией Sofradir. Однако имеется существенное дополнение, приведенное в материалах NIST, а именно, существуют рекомендации по поводу ориентации тест-объекта в виде полуплоскости: её рекомендуется располагать под углом  $5^\circ$  к ориентации ФЧЭ (см. рис. 4).

В пояснениях NIST отражено, что такое расположение тест-объекта позволяет определить положение полуплоскости по её изображению с субпиксельной точностью. Расчеты распределения чувствительности по поверхности ФЧЭ проведены

с учетом аппроксимации функции концентрации энергии в пятне рассеяния оптического зонда функцией Гаусса. Стоит отметить, что данное приближение не совсем корректно, поскольку в действительности данная функция является результатом свертки функции рассеяния точки (для дифракционно-ограниченной оптической системы описывается функцией Бесселя) и функции, описывающей форму тест-объекта.

В комплексе контроля параметров ФПУ второго поколения BIRD 210 компании HGH (Франция) [7] реализована схема измерений, приведенная на рис. 5. В длинноволновом ИК-диапазоне спектра зеркальный оптический зонд с относительным отверстием 1:1,5 заменяется на линзовый с относительным отверстием 1:1.

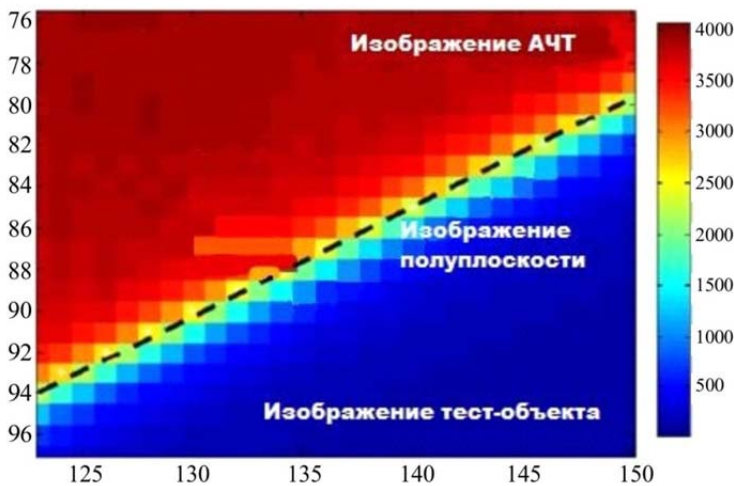


Рис. 4. Расположение тест-объекта при измерении распределения чувствительности по поверхности ФЧЭ по рекомендациям NIST (США).

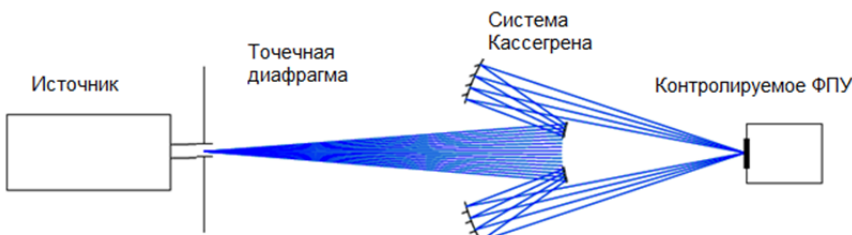


Рис. 5. Схема измерения коэффициента ФЭС в средневолновом ИК-диапазоне спектра, реализованная в комплексе BIRD 210.

Предлагаемая методика измерения коэффициента фотоэлектрической связи полностью повторяет методику, приведенную в отечественном стандарте, что ставит под вопрос корректность результатов измерения ФЧЭ малых размеров.

Вместо измерения размера фоточувствительной площадки в комплексе BIRD 210 проводится измерение ЧКХ; схема измерения аналогична схеме, применяемой компанией Sofradir, только в качестве тест-объекта вместо полуплоскости используется щель, которая перемещается по поверхности ФЧЭ (см. рис. 6).

Измерение распределения чувствительности по поверхности ФЧЭ в комплексе BIRD210 проводится по схеме, представленной на рис. 5. Для из-



Рис. 6. Схема перемещения изображения тест-объекта по поверхности ФЧЭ, при измерении ЧКХ в установке BIRD210.

мерения осуществляется сканирование пятном рассеяния области  $5 \times 5$  пикселей, в центре которой расположен измеряемый ФЧЭ. Схема сканирования приведена на рис. 7.

Еще одной установкой подобного типа является SPOT компании Inframet (Польша) (рис. 8) [8].

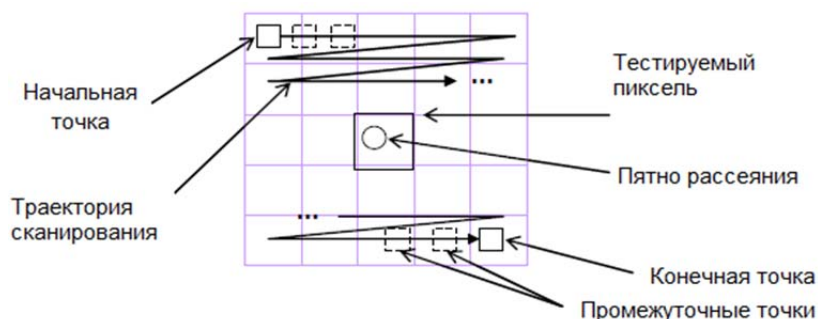


Рис. 7. Схема сканирования изображения тест-объекта по поверхности ФЧЭ, при измерении распределения чувствительности по поверхности ФЧЭ в установке BIRD210.

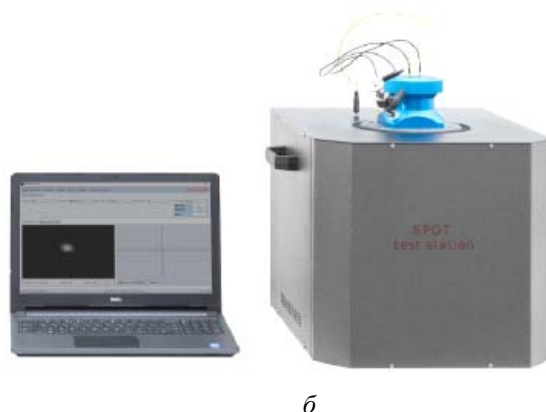
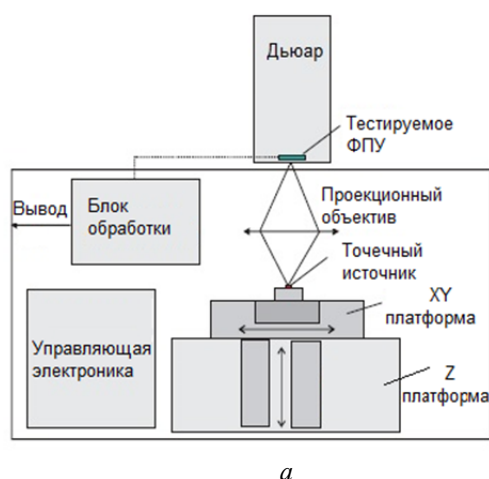


Рис. 8. Установка SPOT компании Inframet: а – принципиальная схема, б – внешний вид.

Таблица 2

Основные технические характеристики установки SPOT

| Наименование параметра, единица измерения                             | Значение                                   |
|---|--|
| Измеряемые ФПУ  |  |
| Спектральный диапазон, мкм  | 1...5,5                                    |
| Дополнительные спектральные диапазоны                                 | УФ, видимый, ближний и коротковолновый ИК  |
| Минимальный шаг <sup>**</sup> , мкм                                   | 8  |
| Максимальный формат, px   | 1280×1024                                  |
| Чувствительность, не менее, А/Вт                                      | 0,1  |
| Источник излучения  |  |
| Максимальная энергия в пятне рассеяния, не более, мВт                 | 4  |
| Диаметр пятна рассеяния <sup>*</sup> , мкм                            | 6  |
| Динамический диапазон регулировки энергии в пятне рассеяния, не менее | 100  |
| Качество изображения оптического зонда                                | Дифракционно-ограниченное                  |
| Система сканирования  |  |
| Поле сканирования, не менее, мм                                       | 10×10                                      |
| Точность позиционирования по поверхности ФЧЭ, мкм                     | 2,5/0,5 при быстром/медленном сканировании |
| Диапазон перемещения механизма фокусировки, мм                        | 18   |
| Точность позиционирования механизма фокусировки, мкм                  | 0,5  |

\* Концентрация энергии в пятне рассеяния 70%.

\*\* Возможно меньше по дополнительному запросу.

### Заключение

Проведенный анализ отечественных и зарубежных разработок показал, что в России может быть решена задача измерения размера фоточувствительной площадки, неравномерности чувствительности и коэффициента фотоэлектрической связи для ФПУ второго поколения, работающих в УФ и коротковолновом ИК-диапазонах, за счет применения методик контроля для ФП и ФПУ первого поколения.

Для измерения данных параметров у ФПУ второго поколения средневолнового и длинноволнового ИК-диапазонов в России и за рубежом используются идентичные методики измерения. Для реализации данных методик обязательными данными являются функция распределения энергии в пятне рассеяния, измерение которой не является тривиальной задачей. Наиболее современная КИА, применяемая в России, позволяет с приемлемой погрешностью измерять ФПУ с шагом до 28 мкм. Для ФПУ с меньшим шагом задача контроля не решена по причине сравнительно низкой точности измерения пятна рассеяния оптического зонда.

Зарубежная КИА позволяет проводить измерения размера фоточувствительной площадки, неравномерности чувствительности и коэффициента фотоэлектрической связи ФПУ второго поколения

с шагом до 8 мкм, однако ее применение не решает задачу обеспечения единства измерений, поскольку неизвестны погрешности (неопределенности) измерений, т. е. все получаемые результаты носят лишь оценочный характер. Важно также отметить, что в открытых источниках для ФПУ второго поколения нет перечня метрологически значимых параметров и требований к ним.

### 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. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973.
3. Полюсский А. В. // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 4. С. 350.
4. Болтарь К. О., Яковлева Н. И. // Прикладная физика. 1999. № 2. С. 23.
5. Sofradir Group. URL: <http://www.sofradir.com/>
6. The National Institute of Standards and Technology (NIST). URL: <https://www.nist.gov/>
7. HGH Infrared Systems. URL <https://www.hgh-infrared.com/ru/Produkty/Isпытание-i-izmerenie/BIRD-universalnyj-optiko-elektronnyj-ispytatel-nyj-stend-dlya-priiomnikov-infrakrasnogo-izlucheniya/>
8. INFRAMET. URL: [http://www.inframet.com/ir\\_fpa.htm](http://www.inframet.com/ir_fpa.htm)

PACS: 06.90.+v

## Methods for measuring the size of the photosensitive area, Uneven sensitivity and coefficient photovoltaic communication (a review)

*A. I. Andosov, A. A. Batsheva, A. V. Polesskiy, V. K. Tresak, and K. A. Khamidullin*

Orion R&P Association  
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia  
E-mail: [orion@orion-ir.ru](mailto:orion@orion-ir.ru); [av22236@bk.ru](mailto:av22236@bk.ru)

*Received March 28, 2018*

***This article is a review and contains data on methods for measuring the photoelectric characteristics of the first and second generation FPU, such as the size of the sensitive area of the responsive element, the spacing response nonuniformity and the coefficient of pixel crosstalk. All the above measurement methods are used for measurements of the first and second generation FPU at leading enterprises in Russia and the world. Also in the article are considered foreign installations for carrying out measurements of photoelectric characteristics of the second generation FPU and the principles of their operation.***

**Keywords:** photodetector, measurement parameters, methods, coefficient, pixel crosstalk, size, sensitive area, responsive element, spacing response nonuniformity.

## REFERENCES

1. *GOST 17772–88*. (USSR Gosstandart, Moscow, 1988) [in Russian].
2. Max Born & Emil Wolf, *Principles of Optics* (Pergamon Press 1970; Nauka, Moscow, 1973).
3. A. V. Polesskiy, *Usp. Prikl. Fiz.* **5** (4), 350 (2017).
4. K. O. Boltar and N. I. Yakovleva, *Prikl. Fiz.*, No. 2, 23 (1999).
5. Sofradir Group. URL: <http://www.sofradir.com/>
6. The National Institute of Standards and Technology (NIST). URL: <https://www.nist.gov/>
7. HGH Infrared Systems. URL: <https://www.hgh-infrared.com/ru/Produkty/Ispytanie-i-izmerenie/BIRD-universalnyj-optiko-elektronnyj-ispytatel-nyj-stend-dlya-priiomnikov-infrakrasnogo-izlucheniya/>
8. INFRAMET. URL: [http://www.inframet.com/ir\\_fpa.htm](http://www.inframet.com/ir_fpa.htm)