

## Методики измерения основных фотоэлектрических параметров ФПУ второго поколения (обзор)

А. В. Полесский

*Фотоприемные устройства (ФПУ) второго поколения – это твердотельные многоэлементные фотоприемные устройства с большой интегральной схемой считывания (БИС считывания) с топологией в виде линеек (в том числе «многоцветных» и/или с режимом ВЗН) или одноцветных матриц – находят все большее применение в оптико-электронных приборах. Однако вопросы измерения ФПУ второго поколения в литературе освещены сравнительно мало. Данная статья является обзорной и одержит данные о применяемых методиках измерения фотонных ФПУ второго поколения УФ- и ИК-диапазонов спектра, изготовленных на основе специализированных полупроводниковых материалов. В статье рассмотрены вопросы измерения относительной спектральной характеристики чувствительности, размера фоточувствительной площадки, вольтовой чувствительности, удельной обнаружительной способности и эквивалентной шуму разности температур (ЭШРТ). Все приведенные методики измерения используются при измерениях ФПУ второго поколения на ведущих предприятиях в России и мире.*

*Ключевые слова:* ФПУ, МФПУ, спектральная характеристика, фотоприемное устройство, размер фоточувствительной площадки, вольтовая чувствительность, ЭШРТ, удельная обнаружительная способность, фотоэлектрические параметры.

### Введение

Согласно международной классификации [1] к фотоприемным устройствам (ФПУ) второго поколения относятся твердотельные многоэлементные фотоприемные устройства с большой интегральной схемой считывания (БИС считывания) с топологией в виде линеек (в том числе «многоцветных» и/или с режимом ВЗН) или одноцветных матриц.

Основными параметрами ФПУ второго поколения являются:

- относительная спектральная характеристика чувствительности  $S(\lambda)$ ;
- размер фоточувствительной площадки;
- вольтовая чувствительность  $S_u$ ;
- эквивалентная шуму разность температур (ЭШРТ);
- удельная обнаружительная способность  $D^*$ ;

В отличие от ФПУ первого поколения (одно- или малоэлементные ФПУ, в том числе с электронной обработкой на дискретных элементах), где в паспорт заносятся параметры каждого элемента, ФПУ второго поколения, которые имеют большое количество элементов, описываются средним значением и разбросом параметров.

При измерении параметров ФПУ второго поколения производится измерение параметров каждого элемента (для  $S_u$ ,  $D^*$ , ЭШРТ), а потом проводится расчет среднего значения и разброса. На этапе измерения параметра каждого элемента производится поиск неработающих и дефектных элементов. Решение о дефектности того или иного элемента принимается по критерию несоответствия параметров элемента заданным требованиям.

Относительная спектральная характеристика чувствительности (ОСЧХ) и размер фоточувствительной площадки измеряются только для отдельных элементов или блоков элементов.

### Измерение относительной спектральной характеристики чувствительности

ОСЧХ показывает зависимость вольтовой чувствительности от длины волны. При контроле параметров ФПУ она используется для определе-

Полесский Алексей Викторович, главный метролог, к.т.н.  
АО «НПО «Орион».  
Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.  
E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 11 июля 2017 г.

© Полесский А. В., 2017

ния границ чувствительности, так же с её помощью происходит вычисление полезного потока, попадающего на ФПУ [2–4] при измерении вольтовой чувствительности, удельной обнаружительной способности, порогового потока, пороговой освещенности.

Основа методики измерения ОСХЧ идентична для ФП и ФПУ первого и второго поколений и подробно описана как в РФ [2], так и за рубежом [5], и в ней реализован относительный метод измерения. Принципиальная схема измерения ОСХЧ ФПУ второго поколения приведена на рис. 1.

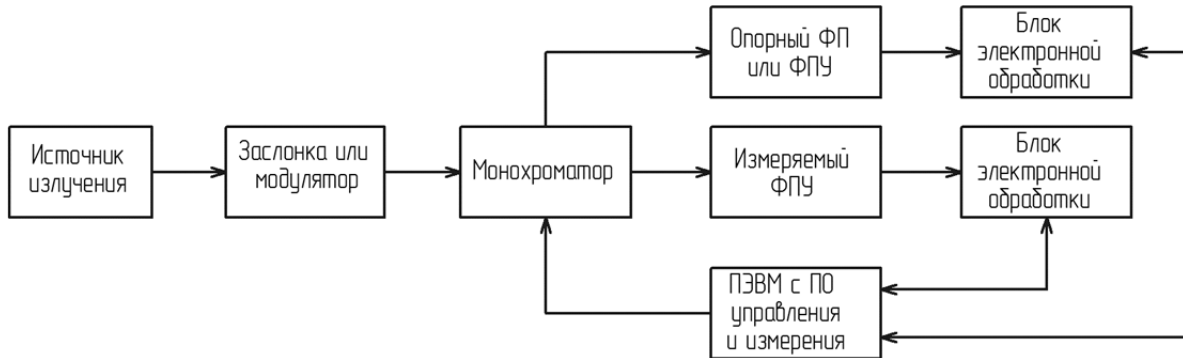


Рис. 1. Принципиальная схема измерения ОСХЧ ФПУ второго поколения.

Принцип измерений ОСХЧ следующий: источник излучения создает оптический поток с непрерывным спектром на входе монохроматора, монохроматор выделяет необходимый узкий спектральный диапазон излучения, который направляется на ФПУ. Поскольку в большинстве случаев спектральная мощность излучения на выходе монохроматора не известна (по причине отсутствия данных о спектральном коэффициенте пропускания монохроматора), то используется приемник с известной относительной спектральной характеристикой (опорный ФП или ФПУ), с помощью которого производится измерение относительной спектральной мощности излучения. Заслонка (модулятор) необходима для селекции полезного и паразитного потоков излучения.

При проведении измерений оптические пути излучения от монохроматора до опорного ФП или ФПУ и измеряемого ФПУ должны быть равными [2], чтобы минимизировать влияние поглощения излучения атмосферой. Точные измерения ОСХЧ в среднем ИК-диапазоне спектра лучше проводить в атмосфере азота. При использовании зеркал или других элементов для перенаправления потока с опорного на измеряемый ФПУ необходимо учитывать их спектральный коэффициент отражения, особенно в УФ-диапазоне спектра.

Вычисление ОСХЧ ФПУ осуществляется по формулам (1) и (2):

$$S_{\text{измер}}(\lambda) = \frac{S_{\text{отн\_опорн}}(\lambda)}{\rho(\lambda)} \times \frac{N(\lambda)_{\text{измер}}}{N(\lambda)_{\text{опорн}}} \quad (1)$$

$$S_{\text{отн\_измер}}(\lambda) = \frac{S_{\text{измер}}(\lambda)}{S_{\text{измер\_max}}} \quad (2)$$

где  $N_{\text{измер}}(\lambda)$  – сигнал с измеряемого фотоприемника;  $N_{\text{опорн}}(\lambda)$  – сигнал с опорного фотоприемника;  $\rho(\lambda)$  – коэффициент, учитывающий наличие зеркал и других элементов;  $S_{\text{отн\_опорн}}(\lambda)$  – спектральная характеристика опорного приемника;  $S_{\text{измер}}(\lambda)$  – спектральная характеристика измеренного приемника до приведения;  $S_{\text{отн\_измер}}(\lambda)$  – ОСХ измеренного приемника;  $S_{\text{измер\_max}}$  – максимальное значение ОСХ измеренного приемника.

Допускаются некоторые изменения в принципиальной схеме измерения (рис. 1) при сохранении идеологии работы:

- ПЭВМ с программным обеспечением управления и измерения можно заменить на одно или два устройства индикации, например, осциллограф или вольтметр, правда, в этом случае, будет много ручных вычислений;

- в случае использования в опорном канале ФП или ФПУ первого поколения возможен отказ в этом канале от блока электронной обработки;

- допускается объединение некоторых элементов схемы: у некоторых ФПУ второго поколения блок электронной обработки конструктивно объединен с самим ФПУ, возможно использование вместо блока электронной обработки специализированных плат ввода, заслонка или модулятор бывают встроены в монохроматор, монохроматор может быть частью спектрометра или спектрофотометра, в этом случае опорный ФП или ФПУ с блоком электронной обработки может так же входить в состав спектрального прибора.

В большинстве случаев (и в России, и в мире) ОСХЧ не измеряется для всех элементов матрицы,

а только для отдельных элементов или блоков элементов. Такой подход оправдывается высоким качеством исходного материала, которое приводит к хорошему постоянству ОСХЧ по фоточувствительным элементам ФПУ, так и определёнными техническими проблемами измерений, а именно, при использовании «щелевых» спектральных приборов невозможно обеспечить одновременную засветку всей матрицы, а при использовании Фурье-спектрометров требуется большой объем трудоемких вычислений.

При проведении аттестации оборудования для измерения спектральной характеристики чувствительности необходимо:

- иметь данные о точности установки длины волны на выходе из монохроматора, например путем проведения калибровки по стандартному образцу (специальной пленке или газоразрядному источнику излучения)

- иметь данные о ОСХЧ опорного ФП или ФПУ, полученные также калибровкой;

При проведении измерений необходимо обращать внимание на следующие условия проведения измерений:

- отношение сигнал/шум в максимуме спектральной характеристики должно быть не менее 100 как для опорного ФП или ФПУ, так и для измеряемого ФПУ [3, 4];

- для «щелевых» спектральных приборов необходимо обеспечить одинаковую минимально возможную ширину входной и выходной щелей для снижения погрешности установки длины волны, но при сохранении заданного отношения сигнал/шум;

- для приборов с дифракционными решетками убедиться в отсутствии «вторичного» спектра;

- измеряемые сигналы с опорного ФП или ФПУ и измеряемого ФПУ должны находиться в линейной зоне, т. е. они не должны выходить за динамический диапазон;

- для ФПУ с логарифмической входной ячейкой [6–9] необходимо знать зависимость отклика от величины падающего потока для введения соответствующей поправки на нелинейность работы.

Поскольку каноническое понимание точности измерения ОСХЧ – это погрешность положения каждой измеренной точки зависимости, то в сертификате калибровки ФП или ФПУ приводятся данные о точности каждой точки ОСХЧ по амплитуде и по длине волны. Однако при контроле параметров ФПУ ОСХЧ напрямую не используется, однако на её основе определяются и рассчитываются следующие параметры:

- границы спектральной характеристики чувствительности по уровню сигнала 0,1 или 0,5;
- длина волны, соответствующая максимуму чувствительности;
- коэффициент использования [2].

Коэффициент использования [2] рассчитывается по формуле (3)

$$\varphi = \frac{\int_0^{\infty} S_{\text{отн\_измер}}(\lambda) r_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} r_{\lambda}(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

где  $S_{\text{отн\_измер}}(\lambda)$  – ОСХЧ измеряемого ФПУ;  $r_{\lambda}(\lambda)$  – спектральная плотность потока излучения источника, применяемого в стенде измерения основных фотоэлектрических параметров.

На практике в большинстве случаев коэффициент использования рассчитывается при измерении ОСХЧ. Характерная ошибка измерения коэффициента использования составляет 5–10 % [3, 4] при учете использования «согласованного» по спектральной характеристике источника излучения. Использование «несогласованного» источника приводит к ухудшению точности измерения коэффициента использования до 30 % и более. Мерой согласованности источника можно считать значение коэффициента использования, который должен быть более 0,1.

### Измерение размера фоточувствительной площадки и коэффициента фотоэлектрической связи

Основной задачей измерения размера фоточувствительной площадки и коэффициента фотоэлектрической связи является построение зависимости чувствительности фоточувствительного элемента от координат по двум осям, т. е. определение распределения чувствительности по площадке элемента, из которой производится вычисление размера площадки и коэффициента фотоэлектрической связи.

Наиболее простая реализация данного измерения представляет собой создание на поверхности фоточувствительного элемента зондирующего пятна малого размера, которое перемещается по поверхности фоточувствительного элемента (ФЧЭ) ФПУ, а далее производится измерение зависимости фотосигнала с ФПУ от координаты с последующей обработкой. Именно такой метод измерения и приведен в [2], при этом размер зондирующего пятна должен составлять не более 0,2

от размера фоточувствительной площадки по уровню концентрации энергии 90 % [2]. Будем называть эту методику – методикой измерения размера фоточувствительной площадки и фотоэлектрической связи «малым» пятном. Принципиальная схема измерения приведена на рис. 2.

Стоит отметить, что текущий шаг фоточувствительной площадки ФПУ второго поколения в России составляет 30×30 и 15×15 мкм, причем с перспективой перехода на 10×10 мкм. Поэтому в некотором приближении можно принять, что размер зондирующего пятна для ФПУ 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.

Теоретический достижимый размер пятна рассеяния определяется дифракцией. Для осесим-

метричных систем без центрального экранирования и уровня концентрации энергии 90 % его можно определить по формуле из работы [10].

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

где  $d(\lambda)$  – диаметр кружка рассеяния для уровня концентрации энергии 90 %;  $\lambda$  – длина волны;  $A$  – числовая апертура оптического зонда;  $D$  – диаметр выходного зрачка;  $f'$  – заднее фокусное расстояние.

Данные о предельно допустимой величине пятна рассеяния по уровню концентрации энергии 90 % в зависимости от длины волны и относительного отверстия приведены в таблице.

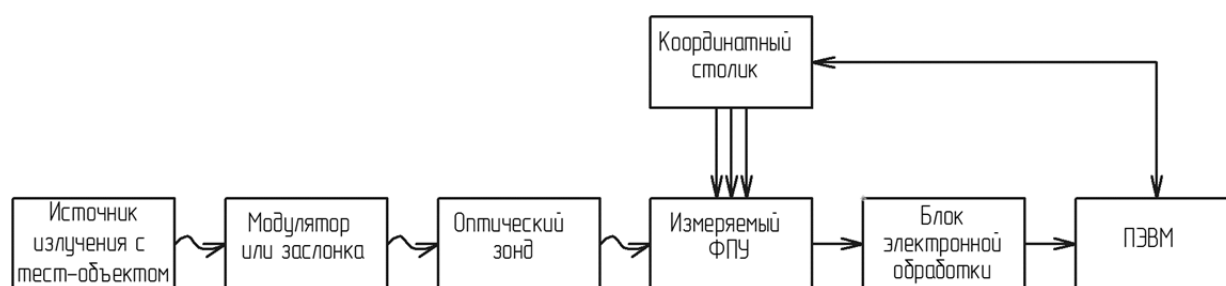


Рис. 2. Принципиальная схема измерения размера фоточувствительной площадки и коэффициента фотоэлектрической связи.

Таблица

Предельно допустимая величина пятна рассеяния

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 таблицы видно, что методика измерения размера фоточувствительной площадки и фотоэлектрической связи «малым» пятном 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 5×5 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 трудновыполнимыми требованиями по относительному отверстию и каче-

ству изображения, при этом контроль должен проводиться до установки входного окна, поскольку оно довольно сильно испортит зондирующее пятно. Контролировать размер площадки ФПУ диапазона 0,9–2,5 мкм с шагом 10 мкм данным методом невозможно.

Для ФПУ средневолнового и дальневолнового ИК-диапазона спектра контроль данным методом невозможен принципиально.

Для обеспечения измерений размера площадки ФЧЭ пятном «большого» размера в России и мире используется иная методика [11]. В её основе лежит следующее положение: при сканировании

ФЧЭ изображением 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. 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 расположения фотоприемника.

Интеграл  $U(x)$  представляет собой одномерную свертку функции распределения чувствительности фотоприемника  $S(x')$  и функции распределения энергии в пятне рассеяния оптического зонда в плоскости расположения фотоприемника  $E(x')$ .

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 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.

Принципиальная схема измерения данным методом аналогична схеме измерения с «малым» пятном. При сохранении общего принципа действия в схеме можно изменить подвижный элемент, за счет которого осуществляется сканирование, например:

- размещение на координатном столе оптического зонда совместно с измеряемым ФПУ;
- размещение источника излучения с диафрагмой, модулятора и заслонки на координатном столе, при этом измеряемый ФПУ и оптический зонд неподвижен;
- размещение на координатном столе диафрагмы, при этом остальные части неподвижны.

Основными сложностями реализации данного метода являются:

- необходимость знать функцию распределения энергии в пятне рассеяния оптического зонда с высокой точностью в заданном спектральном диапазоне;
- необходимость обеспечения высокоточного перемещения зондирующего пятна;
- наличие зависимости распределения энергии в пятне рассеяния от качества фокусировки;
- значительное влияние качества входных окон на распределения энергии в пятне рассеяния.
- наличие зависимости фиксируемого размера пятна рассеяния оптического зонда от соотношения сигнал/шум при проведении измерений.

Наиболее сложной проблемой является определение функции распределения энергии в пятне рассеяния оптического зонда. Наиболее простым методом контроля в ИК-диапазоне спектра может быть измерение остаточных аберраций интерференционным методом с последующим пересчетом в функцию рассеяния точки. Однако применение данного метода затруднено, поскольку функция распределения энергии в пятне рассеяния оптического зонда является результатом свертки функции рассеяния оптического зонда с функцией описывающей форму тест-объекта. При использовании тест-объекта в виде точки или линии измерение качества изображения оптического зонда интерференционным способом решает задачу определения функции распределения энергии в пятне рассеяния не в полной мере, поскольку не учитывает влияние тест-объекта. Поэтому при использовании тест-объекта в виде точки или линии измерение функции распределения энергии в пятне рассеяния необходимо проводить прямым методом совместно с тест-объектом.

Измерение качества изображения оптического зонда интерференционным способом возможно при использовании тест-объекта в виде «полуплоскости», что ввиду простоты формы не представляет проблемы, также при использовании такого тест-объекта можно обеспечить наиболее высокого соотношения сигнал/шум.

### **Измерение основных фотоэлектрических параметров ФПУ без охлаждаемых диафрагм**

Данная методика применима для ФПУ коротковолнового ИК-диапазона спектра и УФ ФПУ. Также с помощью этой методики можно измерять ФПУ с охлаждаемыми диафрагмами, для которых отсутствует виньетирование потока излучения от

источника для всех элементов матрицы, т. е. выполняется следующее условие: диаметр отверстия холодной диафрагмы больше диагонали матрицы.

Данная методика позволяет измерять следующие параметры ФПУ второго поколения:

- вольтовая чувствительность;
- пороговая освещенность;

- пороговый поток;
- удельная обнаружительная способность;

Схема измерения основных фотоэлектрических параметров УФ ФПУ приведена на рис. 3, а ИК ФПУ на рис. 4.

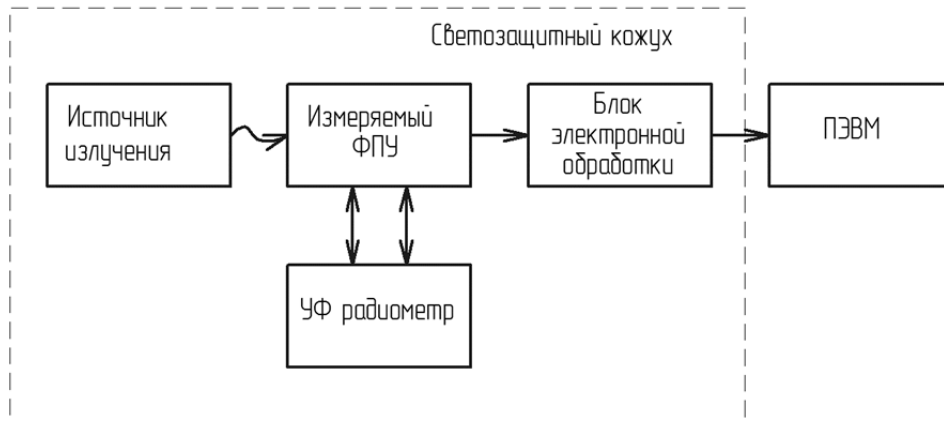


Рис. 3 Принципиальная схема измерения основных фотоэлектрических параметров УФ ФПУ.

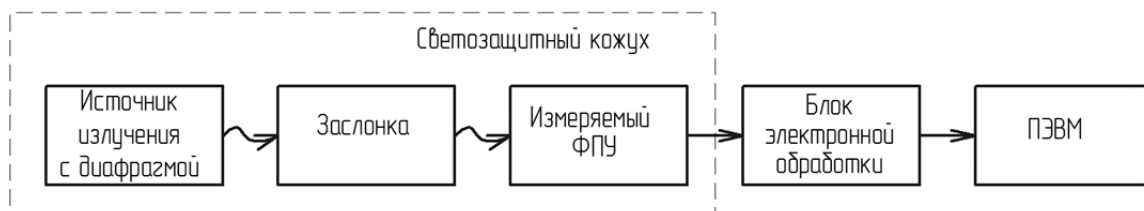


Рис. 4 Принципиальная схема измерения основных фотоэлектрических параметров ИК ФПУ.

Схемы, приведенные на рис. 3 и 4, по своему принципу построения практически идентичны, отличием является только принцип создания на поверхности ФПУ заданной освещенности: в ИК-диапазоне используется, как правило, высокотемпературное АЧТ (500–1000 К) с набором диафрагм, в УФ-диапазоне используются специализированные источники (светодиоды или газоразрядные лампы). Опыт показывает, что в УФ-диапазоне наиболее удобно использование УФ-светодиодов со стабилизацией протекающего через них тока. По сравнению с газоразрядными лампами они имеют больший ресурс работы, менее подвержены старению и могут быстро переходить из включенного состояния в выключенное и обратно [12]. Для периодической проверки величины освещенности, создаваемой УФ-источниками излучения, используются специализированные радиометры.

Для данной схемы измерения важно обеспечить равномерную освещенность всей фоточувствительной плоскости ФПУ (неравномерность менее 0,5–1 %). Малую неравномерность освещенности в ИК-диапазоне можно обеспечить за

счет удаления АЧТ от ФПУ. Поскольку АЧТ является источником излучения, близким к ламбертовскому, то неравномерность можно рассчитать по формуле из [13, 14]:

$$\Delta E = 1 - \cos^4 \left( \arctg \left( \frac{a}{2L} \right) \right), \quad (7)$$

где  $a$  – диагональ МФПУ;  $L$  – расстояние от диафрагмы АЧТ до ФПУ.

В УФ-диапазоне малую неравномерность освещенности можно так же обеспечить за счет удаления ФПУ от источника, однако расчет по формуле (7) невозможен ввиду сильного отличия излучения светодиодов от ламбертовского, т. е. остаточную неравномерность необходимо измерять экспериментально.

Для определения фотоэлектрических параметров ФПУ требуется провести измерения сигнала и шума каждого элемента, для чего производится запись последовательности кадров при отсутствии излучения от источника. Далее в плоскости измеряемого ФПУ создается известная освещенность, и снова производится запись по-

следовательности кадров. Измерение сигнала и шума каждого элемента производится путем обработки массива кадров, причем для измерения сигнала в большинстве случаев достаточно 64 кадров, шума – 1024 кадров.

Расчет значения сигнала  $ij$ -го ФЧЭ ФПУ проводится по формуле:

$$S_{ij} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (B_{ij} - A_{ij}), \quad (8)$$

где  $K$  – число измеренных кадров;  $A_{ij}$  – величина сигнала при отсутствии излучения;  $B_{ij}$  – величина сигнала при наличии излучения;  $i$  – номер элемента в столбце;  $j$  – номер элемента в ряду.

Расчет значения шума  $N_{ij}$   $ij$ -го ФЧЭ ФПУ производится по формуле:

$$N_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^K (B_{ijk} - \bar{B}_{ij})^2 / K}, \quad (9)$$

где  $B_{ijk}$  – величина сигнала при отсутствии излучения в  $k$ -ом кадре;  $\bar{B}_{ij}$  – средняя величина сигнала для  $ij$ -го ФЧЭ, определяемая по следующей формуле:

$$\bar{B}_{ij} = \sum_{k=1}^K (B_{ijk}) / K, \quad (10)$$

где  $K$  – число кадров.

Для ФПУ ИК-диапазона энергетическая освещённость в рабочем спектральном диапазоне чувствительности в плоскости ФЧЭ, рассчитывается по формуле:

$$E = \frac{\sigma(\varphi_1 \varepsilon_1 T_1^4 - \varphi_0 \varepsilon_0 T_0^4) D^2}{4L^2}, \quad (11)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $\varepsilon_1$  – коэффициент излучения излучателя АЧТ;  $\varepsilon_0$  – коэффициент излучения заслонки;  $T_1$  – температура АЧТ;  $T_0$  – температура заслонки;  $D$  – диаметр диафрагмы АЧТ;  $L$  – расстояние между АЧТ и плоскостью ФЧЭ МФПУ;  $\varphi_1$ ,  $\varphi_0$  – коэффициенты использования излучения при температуре  $T_1$  и  $T_0$  соответственно, определяемые по формуле (3).

Для УФ ФПУ освещённость в плоскости ФЧЭ в рабочем спектральном диапазоне измеряется с помощью УФ-радиометра. В качестве УФ-радиометра можно использовать фотоприемник с известной абсолютной спектральной характеристикой. В этом случае энергетическая освещённость в рабочем спектральном диапазоне чувствительности в плоскости ФЧЭ рассчитывается по формуле:

$$E = E_p \varphi, \quad (12)$$

где  $E_p$  – поток, измеренный с помощью радиометра;  $\varphi$  – коэффициент использования излучения для данного источника излучения (3).

Расчет значения статической вольтовой чувствительности  $ij$ -го ФЧЭ МФПУ  $S_{u ij}$  [В/Вт] проводится по формуле:

$$S_{u ij} = \frac{S_{ij} K_{\text{АЦП}}}{EA_s}, \quad (13)$$

где  $K_{\text{АЦП}}$  – величина одного отсчета АЦП в вольтах;  $A_s$  – размер фоточувствительной площадки;  $S_{ij}$  – сигнал  $ij$ -го ФЧЭ (8);  $E$  – энергетическая освещённость в рабочем спектральном диапазоне чувствительности в плоскости ФЧЭ (см. (11) и (12)).

Среднее значение статической вольтовой чувствительности рассчитывается по недефектным ФЧЭ ФПУ и определяется по формуле:

$$S_u = \frac{\sum S_{u ij}}{M}, \quad (14)$$

где  $M$  – число недефектных элементов измеряемого ФПУ.

Значение удельной обнаружительной способности  $ij$ -го элемента ФПУ в максимуме спектральной чувствительности  $D_{ij}^*$  рассчитывается по формуле:

$$D_{ij}^* = \frac{S_{ij}}{N_{ij}} \frac{1}{EA_s} \sqrt{\frac{A_s}{2\tau}}, \quad (15)$$

где  $S_{ij}$  – значение сигнала  $ij$ -го ФЧЭ МФПУ (2);  $N_{ij}$  – значение шума  $N_{ij}$   $ij$ -го ФЧЭ о МФПУ (3);  $E$  – энергетическая освещённость в рабочем спектральном диапазоне чувствительности в плоскости ФЧЭ создаваемая АЧТ (5);  $A_s$  – площадь фотозлектрической площадки элемента;  $\tau$  – время накопления ФПУ.

Среднее значение удельной обнаружительной способности МФПУ в максимуме спектральной чувствительности рассчитывается только по недефектным ФЧЭ по формуле:

$$D^* = \frac{\sum D_{ij}^*}{M}, \quad (16)$$

где  $M$  – число недефектных ФЧЭ МФПУ.

Объем проверок при проведении аттестации оборудования основных фотозлектрических параметров для ФПУ ИК диапазона должен включать следующие позиции:

- для АЧТ необходима калибровка или поверка, включающая как данные по точности установки и поддержания температуры, так фактическим диаметрам диафрагм;
- должно быть измерено расстояние от АЧТ до ФЧЭ ФПУ;
- должны быть измерены собственные шумы стенда.

Объем проверок при проведении аттестации оборудования основных фотоэлектрических параметров для ФПУ УФ диапазона должен включать следующие позиции:

- необходима калибровка или поверка УФ-радиометра;
- должна быть измерена неравномерность освещенности в плоскости ФЧЭ ФПУ;
- должен быть измерен спектральный состав излучения;
- должны быть измерены собственные шумы стенда.

При проведении измерений следует обращать внимание на необходимость устранения случайных засветок ФЧЭ, особенно при измерении шума.

Наличие засветки приводит к появлению дополнительного шума – шума флуктуации падающего потока излучения, в результате измеренные значения пороговых параметров могут быть существенно ниже их действительных значений.

### Измерение основных фотоэлектрических параметров ФПУ с охлаждаемой диафрагмой

Данная методика применима для ФПУ средневолнового и дальневолнового ИК-диапазонов спектра с «холодными» диафрагмами. Она используется при измерении следующих параметров ФПУ второго поколения:

- вольтовая чувствительность;
- пороговая освещенность;
- пороговый поток;
- удельная обнаружительная способность;
- ЭШРТ.

Принципиальная схема измерения основных фотоэлектрических параметров ФПУ с «холодной» диафрагмой приведена на рис. 5, а оптическая схема измерений на рис. 6.

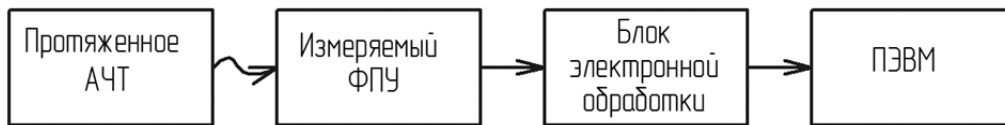


Рис. 5 Принципиальная схема измерения основных фотоэлектрических параметров ИК ФПУ с «холодной» диафрагмой.

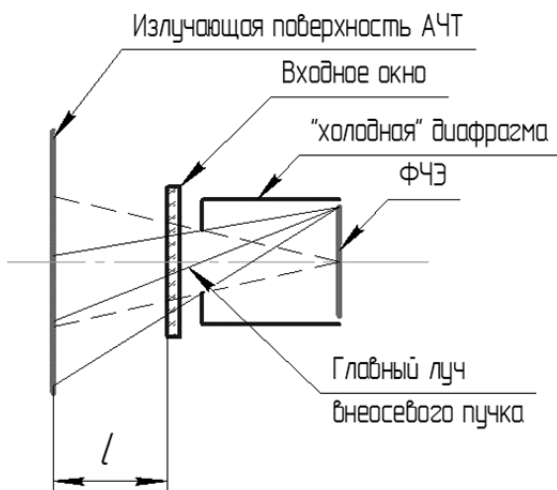


Рис. 6 Оптическая схема измерения основных фотоэлектрических параметров ИК ФПУ с «холодной» диафрагмой.

Основной особенностью данной схемы является, что каждый ФЧЭ видит сквозь отверстие «холодной» диафрагмы ФПУ только излучающую поверхность АЧТ. За счет этого при высоком коэффициенте излучения АЧТ и высоком качестве

изготовления «холодной» диафрагмы практически полностью устраняется влияние боковых засветок на результаты измерений. Поскольку для внеосевых пучков падение главного луча происходит под углом относительно нормали к поверхности ФЧЭ, то наблюдается неравномерность падающего потока по поверхности ФЧЭ – величина потока больше для центральных ФЧЭ, но меньше для ФЧЭ, находящихся на периферии.

Для измерения фотоэлектрических параметров производится запись двух последовательностей кадров для двух разных температур АЧТ ( $T_0$  и  $T_1$ ). Далее производится вычисление сигнала для каждого элемента по формуле (8) и шума по формуле (9). Вычисление ЭШРТ каждого элемента производится по формуле (17):

$$\text{ЭШРТ}_{ij} = \frac{N_{ij}}{S_{ij}} \Delta T, \quad (17)$$

где  $S_{ij}$  – значение сигнала  $ij$ -го ФЧЭ МФПУ (4);  $N_{ij}$  – значение шума  $ij$ -го ФЧЭ МФПУ (5);  $\Delta T$  – разность температур ( $T_1 - T_0$ ) АЧТ.



Среднее значение ЭШРТ рассчитывается по недефектным ФЧЭ ФПУ и определяется по формуле:

$$\text{ЭШРТ} = \frac{\sum \text{ЭШРТ}_{ij}}{M}, \quad (18)$$

$$E_{ij} = \sigma(\phi_1 \varepsilon_1 T_1^4 - \phi_0 \varepsilon_0 T_0^4) \times \frac{1}{\pi} \times \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{\rho l^2}{\left[ l^2 + (\rho \cos \varphi - x)^2 + (\rho \sin \varphi - y)^2 \right]^2} d\rho \times d\varphi, \quad (19)$$

где  $x, y$  – координаты центра ФЧЭ с индексами  $i$  и  $j$ ;  $l$  – расстояние от диафрагмы до матрицы;  $R$  – радиус диафрагмы;  $\rho$  и  $\varphi$  – радиус и угол интегрирования в полярных координатах плоскости диафрагмы.

Расчет удельной обнаружительной способности проводится по формулам (15) и (16), вольтовой чувствительности по формулам (13) и (14) с поправкой на то, что в формулы (13) и (15) для каждого элемента подставляется свое значение освещенности  $E_{ij}$ .

### Заключение

ФПУ второго поколения выпускаются и применяются в РФ уже более 10–15 лет, поэтому у них довольно хорошо устоялась система параметров и сравнительно хорошо отработаны методики измерения. К сожалению, в РФ на федеральном уровне имеется некоторое отставание нормативной базы, описывающей измерение ФПУ второго поколения.

При этом в России и мире идет быстрое развитие ФПУ второго поколения. Направлениями развития ФПУ второго поколения, которые окажут влияние на методики измерения, являются применение оцифровки сигналов в БИС и использование логарифмических усилителей в ячейках. Для метрологии ФПУ второго поколения перенос АЦП в БИС считывания приводит к более простым требованиям к блоку электронной обработки, а применение логарифмических усилителей – к необходимости разработки методик измерения передаточной характеристики для её последующего учета при проведении всех измерений.

В настоящее время в России и в мире началось освоение производства ФПУ третьего поколения, к которым относятся «многоцветные» матричные ФПУ и/или матричные ФПУ со специальными функциями, например, с возможностью измерения дальности в каждом пикселе [1]. Здесь

где  $M$  – число недефектных элементов измеряемого ФПУ.

Освещенность каждого ФЧЭ рабочем спектральном диапазоне определяется по формуле [15]:

будет необходимо разрабатывать новые и специфичные методики измерения. К сожалению, в России пока не устоялась система параметров ФПУ третьего поколения, ибо не прошёл этап их внедрения в оптико-электронные приборы и системы и, соответственно, нет опыта использования.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Rogalski A., Antoszewski J., Faraone L. // Journal of Applied Physics 2009. Vol. 105. P. 091101-1.
2. ГОСТ 17772–88. Приемники излучения и устройства приемные полупроводниковые фотоэлектрические. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1988.
3. Деомидов А. Д., Полесский А. В., Семенченко Н. А., Соломонова Н. А., Тресак В. К. // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 5. С. 485.
4. Деомидов А. Д., Полесский А. В., Семенченко Н. А., Тресак В. К., Смирнов А. А. // Прикладная физика. 2015. № 4. С. 94.
5. Photovoltaic devices – Part 8: Measurement of spectral response of a photovoltaic (PV) device. IEC 60904-8 (МЭК 60904-8:1998).
6. Vatteroni M., Valdastris P., Sartori A., et al. // Electron Devices. IEEE Transactions. 2011. Vol. 58. No. 4.
7. Storm G., Henderson R., Hurwitz J. E. D., et al. // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2006. Vol. 41. No. 9.
8. Decker S., McGrath R., Brehmer K., et al. // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1998. Vol. SC-33. No. 12. P. 2081.
9. Choubey B., Cheng H. Y., Collins S. // Proceeding of Use SPIE Electronic Imaging. 2008. Vol. 6816.
10. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973.
11. Болтарь К. О., Яковлева Н. И. // Прикладная физика. 1999. № 2. С. 23.
12. Добродей А. О., Подденежный Н. Е., Бойко А. А., Евминов Л. И. // Электротехника и энергетика. Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. 2008. № 1. С. 37.
13. Балиев Д. Л., Бедарева Е. А., Деомидов А. Д., Полесский А. В., Сидорин А. В., Хамидуллин К. А., Юдовская А. Д., Цыганкова Г. М. // Прикладная физика. 2014. № 6. С. 93.
14. Заказнов Н. П., Кирюшин С. И., Кузичев В. И. Теория оптических систем. – М.: Машиностроение 1992.
15. Патрашин А. И. // Прикладная физика. 2010. № 2. С. 103.

## Methods of measuring the basic photovoltaic parameters of the FPA of the second generation (a review)

A. V. Polesskiy

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

Received July 11, 2017

***The techniques for measuring the photonic second-generation FPAs (starring FPA and TDI FPA) of the UV and IR spectral ranges to be made on the basis of specialized semiconductor materials were described in this article. Consideration is given to the methodic for relative spectral response, sensitive area size of the responsive element, voltage responsivity, specific detectivity and NETD. The basic measurement schematic and basic calculations all methodic were given. All described basics measurements methodic are used on practice.***

***Keywords:*** 2-nd generation of FPA, measurements, methodic, spectral response, sensitive area size of the responsive element, voltage responsivity, specific detectivity, NETD.

### REFERENCES

1. A. Rogalski, J. Antoszewski, and L. Faraone, *Journal of Applied Physics*. **105**, 091101-1 (2009).
2. GOST 17772-88. (USSR Gosstandart, Moscow, 1988) [in Russian].
3. A. D. Deomidov, A. V. Polesskiy, N. A. Semenchenko, N. A. Solomonova, and V. C. Tresak, *Usp. Prikl. Fiz.* **4** (5), 485 (2016).
4. A. D. Deomidov, A. V. Polesskiy, N. A. Semenchenko, V. K. Tresak, and A. A. Smirnov, *Prikl. Fiz.* No. 4, 94 (2015).
5. *Photovoltaic devices – Part 8: Measurement of spectral response of a photovoltaic (PV) device. IEC 60904-8.*
6. M. Vatteroni, P. Valdastri, A. Sartori, et al., *Electron Devices, IEEE Transactions*. **58** (4) (2011).
7. G. Storm, R. Henderson, J. E. D. Hurwitz, et al., *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. **41** (9) (2006).
8. S. Decker, R. McGrath, K. Brehmer, et al., *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. **SC-33** (12), 2081 (1998).
9. B. Choubey, H. Y. Cheng, S. Collins, *Proceeding of Use SPIE Electronic Imaging*, **6816** (2008).
10. Max Born and Emil Wolf, *Principles of Optics* (Pergamon Press, 1970).
11. K. O. Boltar, N. I. Yakovleva, *Prikl. Fiz.* No. 2, 23 (1999).
12. A. O. Dobrodey, N. E. Poddenezniy, A. A. Boiko, and L. I. Evminov, *Electrotechnika and Energetika Vestnik GGTU* by P. O. Sukhoi, No 1, 37 (2008).
13. D. L. Baliev, E. A. Bedareva, A. D. Deomidov, A. V. Polesskiy, A. V. Sidorin, K. A. Khamidullin, A. D. Yudovskaya, and G. M. Tsygankova, *Prikl. Fiz.* No. 6, 93 (2014).
14. N. P. Zakaznov, S. I. Kirushin, and V. I. Kuzichev, *Theory of Optical Systems* (Mashinostroenie, Moscow, 1992) [in Russian].
15. A. I. Patrashin, *Prikl. Fiz.* No. 2, 103 (2010).