

Структура методик измерения параметров инфракрасных и ультрафиолетовых фотоприемных устройств второго поколения

А. В. Полесский

Фотоприемные устройства (ФПУ) второго поколения – это твердотельные многоэлементные фотоприемные устройства с большой интегральной схемой считывания (с топологией в виде матриц или линеек, работающих в режиме временной задержки накопления (ВЗН)). В настоящее время ФПУ второго поколения активно используются в различных отраслях техники и опико-электронных приборах. В России проводятся работы по стандартизации методик измерения, которые приведут к созданию Государственного стандарта. В статье приведены предложения по организации стандарта измерения параметров ФПУ второго поколения и перечень методик, которые в него должны входить. Также приведены входные и выходные метрологические параметры для каждой методики измерения, которые должны быть нормированы. На основе этих входных и выходных параметров должен проводиться расчет погрешностей измерения.

Ключевые слова: ФПУ второго поколения, фотоприемное устройство, методики измерений, погрешность, фотоэлектрические параметры.

Введение

В России к настоящему времени хорошо отработаны методики и схемы измерения параметров ФПУ второго поколения, которые являются результатом развития методик измерения ФПУ первого поколения [1]. На ряде предприятий России сложились предпосылки к формированию стандартов, а, в перспективе, Государственного стандарта по измерению параметров ФПУ второго поколения.

В данной статье приведена структура методик измерения ФПУ второго поколения и даны рекомендации по нормируемым метрологическим параметрам для каждой методики.

Основные положения

Для обеспечения расчета погрешностей измерения помимо основных методик измерения, которые наиболее полно приведены в [2, 3], в стандарт необходимо включить методики контроля вспомогательного оборудования (блоки электронной обработки, программное обеспечение, источники излучения и т. д.), поскольку оно вносит свои дополнительные погрешности в результат измере-

ния. При этом стоит отметить, что для вспомогательного оборудования должны быть нормированы некоторые специфические параметры, не отраженные в нормативной документации на данное оборудование (описании типа, ГОСТ и др.).

Структура и взаимосвязь методик измерения ФПУ второго поколения, включая методики контроля вспомогательного оборудования, приведены на рисунке. Методики измерения параметров ФПУ второго поколения обозначены синим цветом. Зеленым цветом – «базовые» методики измерения сигнала и шума. Красным цветом отмечены методики контроля используемого вспомогательного оборудования. Помимо широко используемых методик измерения, в перечень включена методика проверки качества работы ФПУ с временной задержкой накопления.

Для удобства работы и анализа погрешностей измерения методики измерения ФПУ второго поколения и контроля вспомогательного оборудования поделены на группы.

К первой группе относятся методики, используемые при выполнении всех последующих измерений. К ним относятся следующие позиции: контроль измерительных блоков электронной обработки и ПО; контроль источников излучения (ламп накаливания, светодиодов, абсолютно черных тел). Погрешности измерения, реализуемые данными методиками, должны быть минимальны, поскольку в процессе измерения ФПУ второго поколения данные измерения будут выполняться многократно, и эти погрешности будут многократно суммироваться.

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 28 ноября 2017 г.

© Полесский А. В., 2017

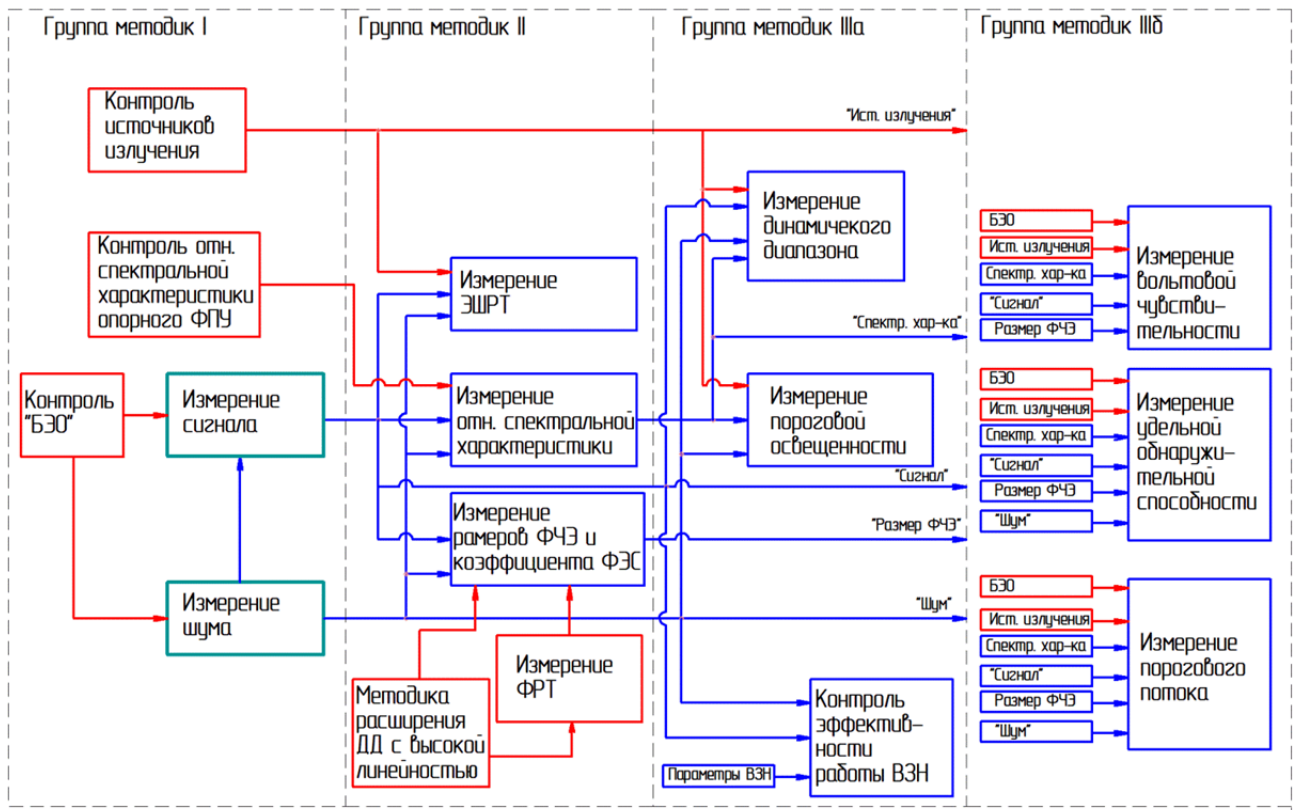


Рис. Структура и взаимосвязь методик измерения ФПУ второго поколения.

Вторая группа методик – это методики измерения эквивалентной шуму разницы температур (ЭШРТ), относительной спектральной характеристики, размеров фоточувствительного элемента и коэффициента фотоэлектрической связи. Также ко вторым группам методик относятся методики расширения динамического диапазона (ДД) с высокой линейностью и измерения пятен рассеяния. Для определения погрешности измерения методик данной группы необходимо знать погрешности измерения методик первой группы.

К третьей группе методик относятся измерения контроля эффективности работы ВЗН, пороговой освещенности, вольтовой чувствительности, порогового потока и удельной обнаружительной способности. Пороговая освещенность и динамический диапазон выделены в отдельную подгруппу, поскольку для их определения не нужно выполнять чрезвычайно сложные и трудоемкие измерения размера фоточувствительной площадки. Погрешности определения данных параметров ФПУ будут максимальными, поскольку в них входят погрешности измерения первых двух групп методик.

При изучении ФПУ второго поколения происходит измерение характеристик каждого фоточувствительного элемента, далее часть элементов по тем или иным причинам признается дефектными, после чего происходит определение среднего значения и дисперсии параметров ФПУ в целом.

Описание методик измерения первой и второй групп и их входных и выходных параметров

Методика контроля блоков электронной обработки (БЭО)

Основной задачей БЭО является оцифровка сигнала с заданным коэффициентом преобразования и линейностью, при этом БЭО не должны вносить дополнительных шумов. Поэтому к нормируемым метрологическим параметрам блоков электронной обработки относятся коэффициент преобразования, равный величине напряжения в единице отсчета АЦП, и величина собственного шума (мВ), приведенная к входу. Нелинейность преобразования аналогового сигнала в цифровой удобнее всего учитывать как шум БЭО.

К параметрам, которые должны быть проверены, нужно отнести коэффициент межканального прохождения и полосу пропускания.

Методика измерения шума

Измерение шума является одним из основных измерений для фотоприемников и ФПУ всех поколений. Основная задача данной методики – измерение величины шума и определение погрешности измерения шума. Для определения погрешности измерения шума в данной методике должны быть увязаны вопросы соотношения собственных шумов ФПУ и шумами БЭО, а также влияния размера выборки кадров на погрешность измерения шума.

Другими словами, входными данными данной методики являются шум БЭО и размер последовательности кадров, а выходными – величина и погрешность измерения шума.

Методика измерения сигнала

Данная методика также является одной из базовых методик для фотоприемников и ФПУ всех поколений. Основная задача данной методики – это измерение величины сигнала и определение погрешности измерения величины сигнала.

Сигнал ФПУ второго поколения рассчитывается как разность сигналов «горячих» («светлых») и «холодных» («темных») кадров. При этом реализуется методика многократных измерений. При этом за величину сигнала принимается математическое ожидание, полученное в результате обработки последовательности кадров.

Входными данными данной методики являются величина шума ФПУ второго поколения (она используется при определении погрешности измерения сигнала при единичном измерении) и размер выборки кадров.

Выходными данными являются величина и погрешность измерения сигнала.

Методика контроля относительной спектральной характеристики опорного ФПУ (ФП)

Данная методика позволяет определить значение относительной характеристики опорного ФПУ или фотоприемника (ФП). Основы методики приведены в отечественном [1] и зарубежном стандартах [4]. Входными данными являются параметры спектральной характеристики эталона (государственного или первичного). Выходными – величина относительной спектральной характеристики и погрешность её измерения в каждой точке по амплитуде и длине волны.

В настоящее время для измерения относительной характеристики опорного ФПУ (ФП) используется методика, предложенная ФГУП ВНИИОФИ в 1996 г.

Контроль источников излучения

Как правило, для контроля ФПУ второго поколения ИК- и УФ-диапазона используются следующие виды источников излучения:

– «точечное» высокотемпературное АЧТ (для контроля в ИК-диапазоне ФПУ без охлаждаемых диафрагм, как правило, в ближнем, коротковолновом и средневолновом ИК-диапазоне);

– «протяженное» низкотемпературное АЧТ (для контроля в ИК-диапазоне ФПУ с охлаждаемыми диафрагмами);

– светодиоды и лазерные диоды (для контроля УФ ФПУ).

При работе с «точечным» высокотемпературным АЧТ вполне достаточно руководствоваться

данными, приведенными в описании типа средств измерения (точность установки температуры) и знать величину размера диафрагмы и допуск на него.

«Протяженные» низкотемпературные АЧТ используются в дифференциальном режиме: для вычисления параметров ФПУ производятся измерения сигнала при двух различных температурах (как правило, 300 К и 301 К или 300 К и 303 К). В описании типа, как правило, приводится точность установки температуры, которая составляет $\pm 0,6$ К для эталонов 1 разряда и ± 1 К для эталонов 2 разряда [5]. Точность обеспечения дифференциальной разницы температур для АЧТ не всегда является нормируемым параметром. Также для некоторых АЧТ не является нормируемым параметром неравномерность температуры по поверхности, которая влияет на погрешность измерений.

Для светодиодов и лазерных диодов необходимо знать величину освещенности и погрешность её измерения. Неравномерность освещенности в плоскости ФПУ и погрешность спектральной плотности потока излучения. Все эти параметры светодиодов и лазерных диодов необходимо будет учитывать при вычислении погрешности при последующих измерениях.

Измерение ЭШРТ

За эквивалентную шуму разность температур для ФПУ второго поколения принимается среднее арифметическое эквивалентной шуму разницы температур всех работающих элементов. Данный параметр нормируется только для ФПУ с «холодными» диафрагмами, работающими в ИК-диапазоне спектра.

Входными данными являются данные о величинах и погрешностях измерения сигнала и шума, а также данные об источнике излучения в виде «протяженного» черного тела.

Выходными данными являются среднее значение ЭШРТ ФПУ по рабочим элементам и погрешность его определения, разброс ЭШРТ и погрешность определения разброса.

Методика измерения относительной спектральной характеристики

Спектральная характеристика чувствительности описывает эффективность преобразования в электрический сигнал падающего светового излучения в зависимости от длины волны. При измерении параметров ФПУ она используется для вычисления величины полезного потока.

Выходными данными являются следующие параметры: величина измеряемого сигнала и шума, данные об относительной спектральной характеристике опорного ФПУ и данные об источнике излучения, который будет применяться при после-

дующих измерениях параметров ФПУ (по 3-й группе методик). Все перечисленные параметры необходимы, в первую очередь, для определения величины и погрешности измерения коэффициента использования. Пример расчетов погрешности коэффициента использования приведен в [6].

Выходными параметрами методики измерения относительной спектральной характеристики чувствительности являются коэффициент использования [1], длины волн краев спектральной чувствительности (как правило, по уровню 0,1 или 0,5) и её максимума, а также погрешности измерения всех перечисленных параметров. Причем для ФПУ должны быть приведены две погрешности измерения коэффициента использования: погрешность, определяемая условиями измерений (отношение сигнал/шум, погрешность измерения относительной спектральной характеристики опорного ФПУ), и вторая, вызванная неопределённостью данных об источнике излучения (для АЧТ – погрешностью установки температуры, для источников излучения на основе светодиодов – погрешностью спектральной плотности потока излучения).

Методика расширения динамического диапазона с высокой линейностью

Как показано в [7], для объективного измерения ФРТ необходимо иметь динамический диапазон приемного тракта не менее ~8000 раз. Подобных требований к ДД можно ожидать и при измерении размера фоточувствительной площадки, и коэффициента фотоэлектрической связи. Вместе с тем, динамический диапазон приемных трактов составляет порядка 1000 раз, а реально используемый при проведении измерений ДД, скорее всего, составит 100–500 раз.

Для решения данной проблемы необходим метод расширения динамического диапазона (ДД) с высокой линейностью. Входными параметрами метода является требуемая величина динамического диапазона и требуемая линейность.

Выходными – методика обеспечения заданного ДД и погрешность линейности.

Методика измерения функции концентрации энергии (ФКЭ) в пятне рассеяния

Основы данной методики приведены в [7]. Её задача – измерения ФКЭ в пятне рассеяния оптического зонда с заданной погрешностью. Полученные результаты (ФКЭ и погрешность её определения) будут использоваться для расчета размера фоточувствительной площадки и коэффициента фотоэлектрической связи.

Входными данными являются параметры системы, с помощью которой производятся измерения ФКЭ, выходными – погрешность измерения ФКЭ по величине и координате.

Методика измерения эффективного размера фоточувствительного элемента (ФЧЭ) и коэффициента фотоэлектрической связи

Основы данной методики приведены в [2]. Её отличие от методик измерения параметров ФП и ФПУ 1 поколения – использование инструментов прямого и обратного Фурье-анализа для измерения функции распределения чувствительности по поверхности фоточувствительного элемента и последующего пересчета её в эффективный размер фоточувствительной площадки ФЧЭ и коэффициент фотоэлектрической связи.

Входными данными являются функция концентрации энергии в пятне рассеяния и погрешность её измерения, методика расширения ДД с высокой линейностью, данные о погрешности определения координат положения пятна рассеяния оптического зонда относительно фоточувствительных элементов ФПУ.

Выходными данными являются функция распределения чувствительности по поверхности фоточувствительного элемента по величине и координате и результаты её пересчета в эффективный размер фоточувствительной площадки ФЧЭ и коэффициент фотоэлектрической связи.

Описание методик измерения третьей группы и их входных и выходных параметров

Методика контроля эффективности работы ВЗН

ФПУ второго поколения с временной задержкой накопления (ВЗН) – это класс ФПУ второго поколения, который используется для оптико-электронных систем сканирования пространства. По своим характеристикам ФПУ второго поколения с ВЗН превосходят ФПУ на основе матриц за счет суммирования сигнала, однако при неправильном суммировании их эффективность резко падает.

Падение эффективности происходит по причинам некорректного переноса заряда и проявляется в двух направлениях:

- в падении эффективности накопления сигнала при переносе заряда;
- в падении разрешения ОЭС при включенном ВЗН режиме.

При проведении измерения ФПУ второго поколения данная методика, в первую очередь, отвечает на вопрос эффективности накопления сигнала при переносе заряда. Входными данными методики являются параметры ВЗН ФПУ второго поколения, выходными – эффективность переноса и вносимое падение разрешения.

Методика измерения динамического диапазона

Существенным отличием ФПУ второго поколения от ФП и ФПУ первого поколения является

то, что в ряде ФПУ второго поколения изначально применяется нелинейный выходной тракт (как правило, логарифмический, т. е. ФПУ – нелинейное устройство). Такой тракт используется для увеличения динамического диапазона. В связи с этим методика, используемая для ФП и ФПУ первого поколения, не пригодна для измерения ФПУ второго поколения с нелинейным выходным трактом.

Входными данными методики являются величины сигналов при различных уровнях засветки и погрешности их измерения, величина и погрешность измерения шума. Также входными данными методики являются величина и погрешность коэффициента использования.

Выходными данными являются величина и погрешность измерения динамического диапазона. Для нелинейных ФПУ второго поколения должна быть приведена зависимость величины фототоклика от величины падающего потока с погрешностью её измерения.

Методика измерения пороговой освещенности

Данная методика, как правило, используется для контроля ФПУ УФ-диапазона и ИК ФПУ без «холодных» диафрагм. Для ФПУ с холодными диафрагмами «эквивалентным» параметром является ЭШРТ.

В России, судя по публикациям, ЭШРТ используют довольно редко (применительно к ФПУ), несмотря на сравнительную простоту измерения данного параметра и низкую погрешность. Сравнительно низкая погрешность измерения объясняется тем, что для расчета этого параметра не нужны данные о величине эффективного размера ФЧЭ.

Входными данными методики являются данные о параметрах, полученных при измерении спектральной характеристики, и их погрешности, а также данные об измеренных величинах сигналов и шумов с соответствующими погрешностями, кроме того, данные об источнике излучения при измерениях в УФ-диапазоне.

Выходными данными являются среднее значение пороговой освещенности по рабочим элементам и погрешность его определения, разброс пороговой освещенности и погрешность определения разброса.

Методики измерения вольтовой чувствительности, удельной обнаружительной способности и порогового потока.

Объединение данных методик в единый раздел связано с тем, что измерение основных фотоэлектрических параметров (вольтовой чувствительности, удельной обнаружительной способности и порогового потока) происходит практически одновременно. Для всех типов ФПУ второго поколе-

ния методики измерения основных фотоэлектрических параметров имеют как общие источники погрешностей, так и индивидуальные, вызванные особенностью схемы измерения. Можно выделить три основные схемы измерения: схема измерения УФ ФПУ, схема измерения ИК ФПУ без «охлаждаемых» диафрагм и схема измерения ИК ФПУ с «охлаждаемыми» диафрагмами.

Общими входными метрологическими данными для всех методик измерения основных фотоэлектрических параметров являются:

- результаты измерения спектральной характеристики: значение и погрешность измерения коэффициента использования (как от условий измерения, так и от параметров источника излучения, используемого при измерении основных параметров);
- величины сигнала, шума и погрешности их измерения;
- параметры БЭО: коэффициент преобразования и погрешность его измерения;
- размера эффективной ФЧЭ и погрешность её измерения.

Для УФ ФПУ входными метрологическими параметрами от источника излучения являются неравномерность освещенности в плоскости ФЧЭ, спектральная плотность потока излучения и её погрешность, погрешность измерения энергетической освещенности в плоскости ФЧЭ опорным ФП или ФПУ.

Для ИК ФПУ без «охлаждаемых» диафрагм входными метрологическими параметрами от источника излучения являются погрешность установки температуры АЧТ, диаметр диафрагмы и расстояние от АЧТ до ФЧЭ ФПУ.

Для ИК ФПУ с «охлаждаемыми» диафрагмами входными метрологическими параметрами от источника излучения являются погрешность установки температуры АЧТ, погрешность установки разности температур горячих и холодных кадров, неравномерность температуры по поверхности АЧТ, погрешность коэффициента излучения.

Выходными параметрами методик являются величины и погрешности измерения основных фотоэлектрических параметров (вольтовой чувствительности, удельной обнаружительной способности и порогового потока).

Заключение

Приведенная организационная структура методик измерения параметров ИК и УФ ФПУ второго поколения позволит полноценно решить задачу метрологического обеспечения, в частности, определить состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах измерений (величин) и оценены их неопределен-

ности, в т. ч. когда пределы погрешностей результатов измерений не выходят за установленные пределы.

Данная организационная структура имеет большой потенциал развития и впоследствии может стать основой для разработки соответствующего Государственного стандарта Российской Федерации.

Вместе с тем необходимо отметить, что имеется еще ряд нерешенных метрологических проблем, связанных с определением погрешностей измерения ряда методик, в т.ч. методики измерения сигнала и методики измерения шума, методики измерения ФЭС и эффективного размера ФЧЭ. Все эти проблемы касаются области научной метрологии и, в первую очередь, оптико-физических измерений. Решение этих проблем требует создания новых математических моделей имитирующих процесс измерений, нового измерительного оборудования и накопления и анализа полученных результатов.

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. Поlessкий А. В. // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 4. С. 350.
3. Деомидов А. Д., Кононов М. Е., Поlessкий А. В., Семенченко Н. А., Хамидуллин К. А., Добрунов С. В. // Прикладная физика. 2014. № 6. С. 87.
4. Photovoltaic devices – Part 8: Measurement of spectral response of a photovoltaic (PV) device. IEC 60904-8 (МЭК 60904-8:1998).
5. ГОСТ 8.558-2009. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Государственная поверочная схема для средств измерений температуры – М.: Стандартинформ, 2012.
6. Поlessкий А. В., Соломонова Н. А., Семенченко Н. А. // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 4. С. 360.
7. Поlessкий А. В., Юдовская А. Д. // Прикладная физика. 2017. № 3. С. 115.

PACS: 06.20.fb, 85.60.Gz

Organizational structure of measurement techniques for the IR and UV FPA of the second generation

A. V. Polesskiy

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

Received November 28, 2017

Photodetectors of the second generation are solid-state multi-element photodetectors integrated with a ROIC with a topology in the form of rulers (including "multicolor" and / or with TDI) or monochromatic matrices. At present, the second generation FPA is actively used in various branches of technology and optoelectronic devices. Currently, Russia is working to standardize measurement methods for the second generation photodetectors, which will lead to the creation of the State Standard. The article contains proposals on the organization of a standard for measuring the parameters of the second-generation FPA, and a list of techniques that should be included in it. Input and output metrological parameters for each measurement procedure are also given. Based on these input and output parameters, calculation of measurement uncertainties may be carried out.

Keywords: second generation, FPA, methodic of measurements, measurements uncertainty, photoelectric parameters.

REFERENCES

1. GOST 17772-88. (USSR Gosstandart, Moscow, 1988) [in Russian].
2. A. V. Polesskiy, Usp. Prikl. Fiz. **5** (4), 350 (2017).
3. A. D. Deomidov, M. E. Kononov, A. V. Polesskiy, N. A. Semenchenko, K. A. Khamidullin, and S. V. Dobrunov, Prikl. Fiz. No. 6, 87 (2014).
4. Photovoltaic devices – Part 8: Measurement of spectral response of a photovoltaic (PV) device. IEC 60904-8.
5. GOST 8.558-2009. (Russia Standartinform, Moscow, 2012) [in Russian].
6. A. V. Polesskiy, N. A. Solomonova, and N. A. Semenchenko, Usp. Prikl. Fiz. **5** (4), 360 (2017).
7. A. V. Polesskiy and A. D. Yudovskaya, Prikl. Fiz. No. 4, 115 (2017).