

Физическая аппаратура и ее элементы

УДК 621.383:535.08

Исследование точности измерения спектральной характеристики методом Монте-Карло матричных ИК-фотоприемников диапазона 0,9-1,7 мкм

А. Д. Деомидов, А. В. Полесский, Н. А. Семенченко, В. К. Тресак, А. А. Смирнов

Проведена оценка точности измерения основных параметров спектральной характеристики: границ спектральной чувствительности по уровню сигнала 0,1, длины волны, соответствующей максимальной чувствительности, коэффициента использования и скорости его изменения от температуры для матричных фотоприемных устройств на основе InGaAs. Исходными данными для расчета являлись требования нормативной документации к точности измерения фотосигнала и данные о точности измерения опорного фотоприемного устройства. Оценка точности, полученная с помощью математического моделирования методом Монте-Карло, показала наличие систематической погрешности при выполнении измерений.

PACS: 02.30.Cj; 85.60.Gz, 84.37.+q

Ключевые слова: точность измерения, спектральная характеристика, матричное фотоприемное устройство, SWIR, InGaAs.

Введение

Для диапазона 0,9-1,7 мкм можно выделить два основных типа матричных фотоприемных устройств (МФПУ): МФПУ, предназначенные для приема лазерного излучения, и МФПУ, предназначенные для приема сигналов в широком оптическом диапазоне спектра. При этом вторые — «обычные», наиболее распространенные МФПУ.

Измерение параметров МФПУ, предназначенных для приема сигналов в широком оптическом диапазоне спектра, начинается с контроля сигналов и шумов еще на ранних стадиях изготовления. На финальных этапах контроль параметров начинается с контроля относительной спектральной характеристики чувствительности (далее ОСХ или спектральная характеристика), поскольку именно она используется для вычисления полезного потока, попадающего на фотоприемное устройство (ФПУ) [1, 2]. Поэтому ошибки измерения

спектральной характеристики в первую очередь влияют на точность измерения удельной обнаружительной способности, вольтовой чувствительности и порогового потока.

Целью данной работы являлось проведение оценки точности измерения основных параметров спектральной характеристики чувствительности МФПУ.

Постановка задачи

Спектральную характеристику можно охарактеризовать следующим набором параметров:

- границы спектральной характеристики (длины волн по уровню 0,1);
- длина волны, соответствующая максимуму чувствительности;
- коэффициент использования при различных температурах АЧТ;
- изменение коэффициента использования при изменении температуры.

Первые два параметра являются паспортными параметрами МФПУ. Третий параметр — коэффициент использования — необходим при измерении основных фотоэлектрических параметров [1, 2] и определяется по формуле:

$$\varphi = \frac{\int_0^{\infty} S_{\text{omi}}(\lambda) \cdot r_{\lambda}(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^{\infty} r_{\lambda}(\lambda, T) d\lambda} \quad (1)$$

Деомидов Александр Дмитриевич, инженер 1 кат.¹
 Полесский Алексей Викторович, главный метролог¹.
 Семенченко Наталья Александровна, инженер¹.
 Тресак Виктория Константиновна, студент².
 Смирнов Александр Александрович, начальник отдела¹.

¹АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

E-mail: orion@orion-ir.ru

²МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

Статья поступила в редакцию 1 июля 2015 г.

© Деомидов А. Д., Полесский А. В., Семенченко Н. А., Тресак В. К., 2015

где $S_{отн}(\lambda)$ — относительная спектральная характеристика чувствительности; $r_\lambda(\lambda, T)$ — спектральная плотность потока излучения при температуре T .

Четвертый параметр необходим при расчете погрешности измерения основных фотоэлектрических параметров.

Методики измерения спектральной характеристики, как и схемы оборудования, их реализующие, приведенные как в отечественном [1], так и в зарубежном [3] стандарте, чрезвычайно близки между собой и реализуют относительную методику измерения.

Стандартная схема стенда для измерения спектральной характеристики представлена на рис. 1.

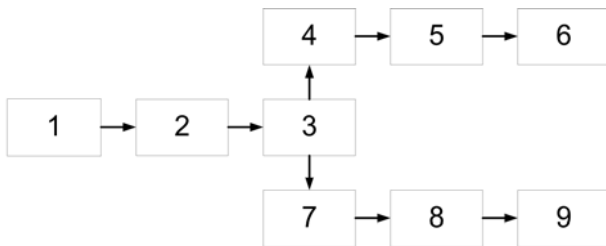


Рис. 1. Схема стенда для измерения спектральной характеристики: 1 — источник света, 2 — модулятор*, 3 — спектральный прибор (монохроматор), 4 — опорное ФПУ, 5 — блок электронной обработки, 6 — устройство отображения/хранения результатов измерения, 7 — измеряемое МФПУ, 8 — блок электронной обработки, 9 — устройство отображения/хранения результатов измерения. * — может не использоваться при измерении ФПУ второго и третьего поколений

В качестве отправной точки исследований был выбран стенд, описанный в [4] в варианте исполнения, предназначенном для измерения МФПУ формата 320×256 на основе InGaAs [5].

Вычисление относительной спектральной характеристики МФПУ при проведении измерений осуществляется по формулам:

$$S_{измер}(\lambda) = S_{отн_опорн}(\lambda) \cdot \frac{U_{измер}}{U_{опорн}}, \quad (2)$$

$$S_{отн_измер}(\lambda) = \frac{S_{измер}(\lambda)}{S_{измер_max}}, \quad (3)$$

где $U_{измер}$ — сигнал с измеряемого МФПУ; $U_{опорн}$ — сигнал с опорного ФПУ; $S_{отн_опорн}(\lambda)$ — спектральная характеристика опорного ФПУ; $S_{измер}(\lambda)$ — спектральная характеристика измеряемого МФПУ до приведения; $S_{отн_измер}(\lambda)$ —

относительная спектральная характеристика измеряемого МФПУ; $S_{измер_max}$ — максимальное значение спектральной характеристики измеряемого МФПУ до приведения.

Существуют два основных способа расчета погрешности: расчет погрешностей через частные производные и расчет путем математического моделирования методом Монте-Карло. Первый метод к решению задачи расчета погрешности сложно применим, поскольку как спектральная характеристика, так и все используемые величины представляют собой кусочно-заданные функции, расчет частных производных от которых затруднен. Поэтому в качестве инструмента для исследования точности измерения спектральной характеристики МФПУ диапазона 0,9-1,7 мкм был выбран метод математического моделирования Монте-Карло, представляющий собой численный метод, основанный на получении большого числа реализаций случайного процесса и их последующей обработке [6]. Несомненным достоинством метода Монте-Карло является возможность решения задачи из основополагающих принципов без привлечения дополнительных эмпирических предположений.

Основными источниками ошибок при измерении спектральной характеристики, как видно из формулы (2), являются следующие факторы:

- шум электрического сигнала опорного ФПУ;
- шум электрического сигнала измеряемого МФПУ;
- погрешность спектральной характеристики опорного ФПУ.

Учитывая особенности функционирования монохроматора (применялся монохроматор, построенный по схеме Черни-Тернера), нужно отметить, что на точность измерения могут также влиять некоторые добавочные аспекты, а именно: ошибка установки ФПУ относительно входной щели, погрешность установки длины волны и наличие вторичных спектров.

Погрешность установки ФПУ относительно входной щели нивелировалась за счет выверки опорного и измеряемого ФПУ по источнику излучения с линейчатым спектром (использовалась аргоновая лампа). Погрешность установки длины волны также контролировалась по аргоновой лампе и составляла незначительную величину. Наличие вторичного спектра контролировалось путем измерения значения фотосигнала на выходе монохроматора с помощью приемника с известной спектральной характеристикой. Вторичный спектр по результатам данных измерений обнаружен не был.

Оценка точности измерения спектральной характеристики с параметрами сигналов и шумов, рекомендованных в [1]

В качестве исходных данных для расчета были выбраны:

- одно из измерений спектральной характеристики МФПУ на основе InGaAs, включающее сигналы с опорного ФПУ, с измеряемого МФПУ и спектральную характеристику опорного ФПУ (измерена в ФБУ «РОСТЕСТ-Москва»);

- погрешность измерения спектральной характеристики опорного ФПУ составляет 6 % с доверительной вероятностью 0,95 (приведено в протоколе калибровки).

Также были введены следующие условия:

- погрешность измерения сигнала с измеряемого МФПУ — 7 % с доверительной вероятностью 0,95 [1];

- погрешность измерения сигнала с опорного ФПУ — 7 % с доверительной вероятностью 0,95 [1];

- шум обоих ФПУ определяется погрешностью измерения сигнала.

Измерение спектральной характеристики, включающее данные о напряжениях фотосигнала с опорного ФПУ и измеряемого МФПУ, использовалось в качестве «эталонной» величины, и относительно нее проводились последующие расчеты. Измерение представляет собой четыре массива, в которых содержатся:

- напряжение сигнала с опорного ФПУ;
- напряжение сигнала с измеряемого МФПУ;
- спектральная характеристика опорного ФПУ;
- спектральная характеристика измеряемого МФПУ (использовалась для проверки правильности некоторых расчетов).

Длина каждого массива — 450 значений, соответствующих измерениям в диапазоне 800–1700 нм с шагом 2 нм. Графические отображения используемых массивов представлены на рис. 2.

Моделирование проводилось в программе MathCad. На схеме алгоритма моделирования, приведенной на рис. 3, стоит обратить внимание на то, что оператор «pnorm» — оператор добавления шума с гауссовым распределением, переменная «Coeff» позволяет связать погрешность измерения и СКО шума и определяется из закона распределения Гаусса для вероятности 0,95. Также стоит обратить внимание на выполнение приведения к единице, т.е. «нормирование» опорной спектральной характеристики после её зашумления. Определение граничных длин волн происходит методом линейной интерполяции.

Результаты моделирования погрешности измерения границ спектральной характеристики по уровню 0,1 и длины волны максимума чувствительности для 1000 «бросков» приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, наибольшая случайная погрешность измерения наблюдается для длины волны максимума спектральной чувствительности. Это происходит из-за отсутствия выраженного максимума при сравнительно большом уровне шумов (при шуме 7 % отношение сигнал/шум составляет всего ~14,3). Довольно интересным выводом также является то, что при уменьшении шага сканирования нет падения систематической составляющей погрешности измерения для длины волны максимума спектральной чувствительности. Анализ показал, что данный эффект объясняется высоким уровнем шумов.

Как видно, при точности измерения сигналов [1] и погрешности измерения параметров опорного ФПУ, равного 6 %, точность измерения длины волны максимума спектральной чувствительности составит около $\pm(16-17)$ % (т. е. ± 233 нм). Погрешность измерения «синей» границы спектральной чувствительности лежит в диапазоне от $\pm 0,07$ % до $\pm 1,85$ % ($\pm 0,68$ – ± 18 нм). Погрешность измерения «красной» границы спектральной чувствительности составляет примерно $\pm 0,19$ % ($\pm 3,3$ нм).

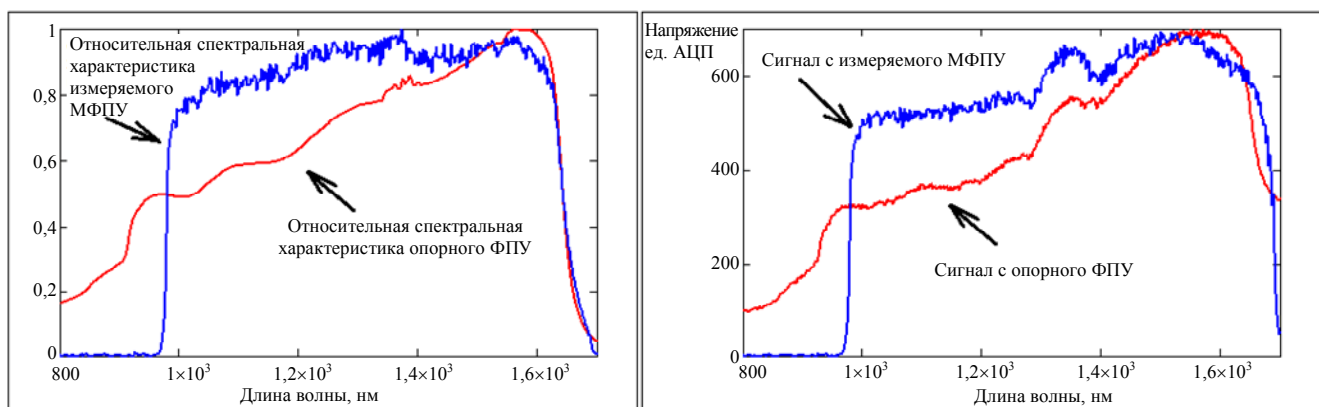


Рис. 2. Графическое отображение используемой при моделировании информации

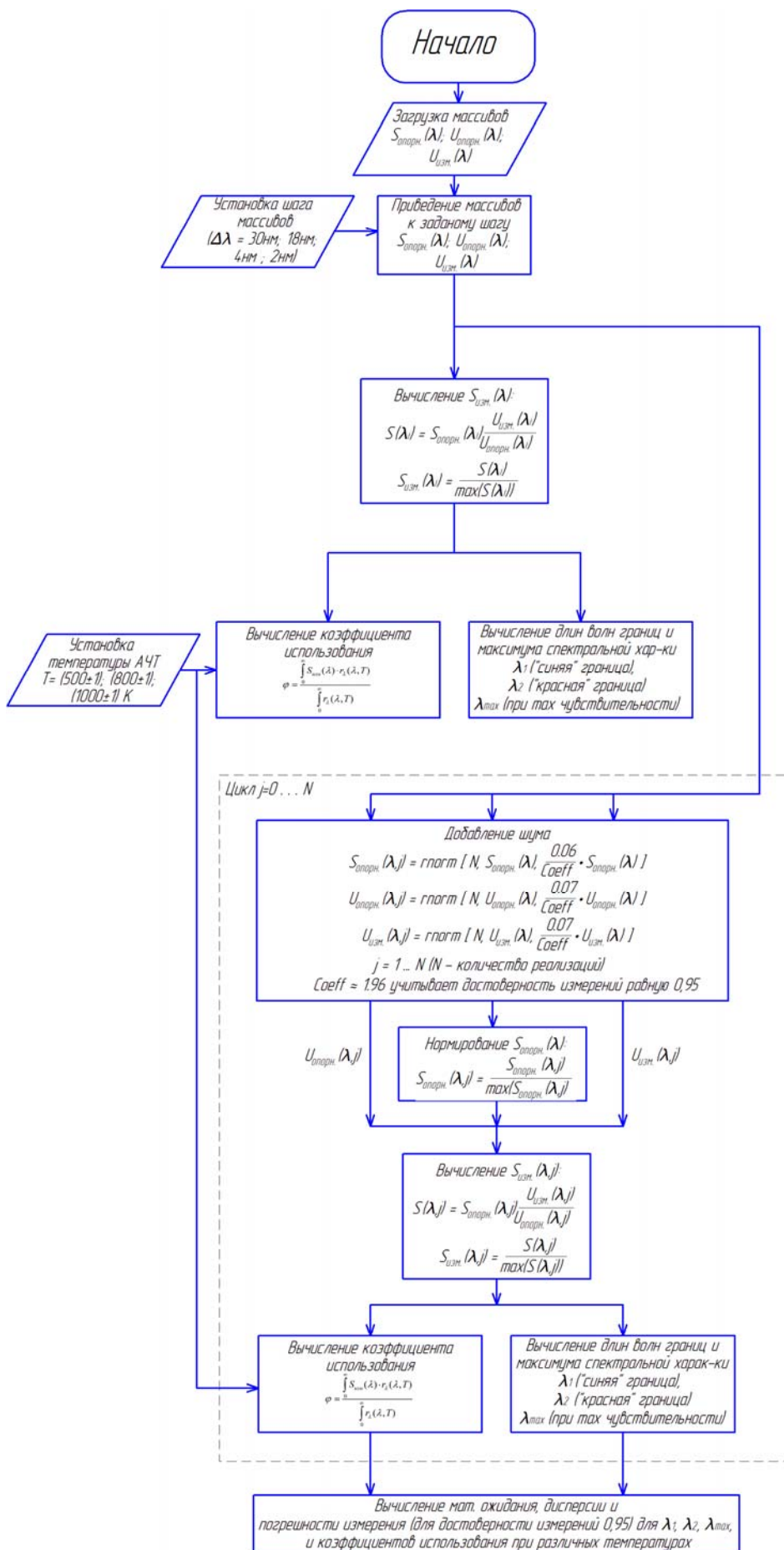


Рис. 3. Схема процесса моделирования измерения спектральной характеристики

Таблица 1

Результаты моделирования точности измерения границ по уровню 0,1 и длины волны максимума чувствительности

Шаг сканирования по длине волны	Длина волны максимума спектральной чувствительности			«Синяя» граница спектральной чувствительности			«Красная» граница спектральной чувствительности		
	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %
30 нм	1391,0	16,1	1,38	955,5	0,083	1,83	1681,6	0,16	0,108
18 нм	1417,9	16,9	3,35	965,2	0,046	0,84	1680,6	0,12	0,053
4 нм	1416,9	15,4	3,27	973,2	0,038	0,017	1678,0	0,12	0,102
2 нм	1410,8	15,3	2,83	973,9	0,048	0,057	1678,5	0,107	0,077
Исходная ОСХ	1372			973,389			1679,754		

* — указано для доверительной вероятности, равной 0,95.

Результаты моделирования точности определения коэффициента использования для 1000 «бросков» приведены в табл. 2.

Наиболее интересным результатом является то, что для используемых исходных данных наблюдается значительная систематическая погрешность измерения, которая увеличивается с уменьшением шага и при малом шаге сканирования превосходит случайную. Данный эффект также объясняется значительными величинами шумов, при наличии которых коэффициент использования

получается меньше реального, что приводит к занижению вольтовой чувствительности и удельной обнаружительной способности МФПУ на 4-10 % при проведении измерений. Погрешность вычисления коэффициента использования не выходит за пределы ± 12 % при отсутствии ошибки установки температуры абсолютно черного тела.

Зависимость измерения коэффициента использования от температуры АЧТ представлена в табл. 3.

Таблица 2

Результаты моделирования точности определения коэффициента использования

Шаг сканирования по длине волны	Коэффициент использования для температуры:								
	500 К			800 К			1000 К		
	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %	средн. значение	случ. погр. %*	сист. погр. %	средн. значение	случ. погр. %*	сист. погр. %
30 нм	$2,33 \cdot 10^{-5}$	6,96	4,11	$4,34 \cdot 10^{-3}$	6,29	4,19	0,0209	6,09	4,08
18 нм	$2,32 \cdot 10^{-5}$	6,42	4,52	$4,31 \cdot 10^{-3}$	6,08	4,85	0,0208	5,96	4,54
4 нм	$2,20 \cdot 10^{-5}$	5,12	9,46	$4,11 \cdot 10^{-3}$	5,00	9,27	0,0195	4,95	10,51
2 нм	$2,17 \cdot 10^{-5}$	4,99	10,70	$4,05 \cdot 10^{-3}$	4,95	10,6	0,0198	4,99	9,13
Исходная ОСХ	$2,43 \cdot 10^{-5}$			$4,53 \cdot 10^{-3}$			0,02179		

* — указано для доверительной вероятности, равной 0,95.

Таблица 3

Зависимость измерения коэффициента использования от температуры АЧТ

Шаг сканирования по длине волны	Зависимость измерения коэффициента использования от температуры АЧТ, %					
	Для 500 К коэффициент использования принят равным 100 %		Для 800 К коэффициент использования принят равным 100 %		Для 1000 К коэффициент использования принят равным 100 %	
	499К	501К	799 К	801К	999К	1001К
30 нм	97,11	102,89	99,11	101,11	99,4	100,6
18 нм	97,11	102,89	99,11	101,11	99,4	100,6
4 нм	97,01	102,99	98,85	100,92	99,38	100,57
2 нм	96,98	103,02	99,07	101,16	99,38	100,58
Исходная ОСХ	97,12	102,88	98,9	100,88	99,4	100,6

Наиболее важным выводом из табл. 3 является то, что изменение коэффициента использования от температуры АЧТ практически не зависит от шага сканирования. При увеличении температуры АЧТ на этапе измерения фотоэлектрических параметров требования к точности установки температуры уменьшаются.

Учитывая, что при последующих измерениях используется АЧТ модели Micron M360 [2] с точностью по температуре ± 1 °С и погрешностью считывания $\pm 0,2$ %, (для 500 К погрешность составляет ± 2 °С, для 800 К составляет $\pm 2,6$ °С, а для 1000 К составляет ± 3 °С), можно дать рекомендацию об измерении параметров на МФПУ на основе InGaAs при температуре АЧТ 1000 К. В этом случае погрешность измерения, вызванная погрешностью поддержания температуры, составит $\sim 1,5$ %.

Оценка точности измерения спектральной характеристики с реальными параметрами сигналов и шумов

В реальности точность измерения сигнала в МФПУ на основе InGaAs всегда выше, чем требуемая согласно [1]. Отношение сигнал/шум

МФПУ с учетом коммутации, оцифровки и передачи сигнала в максимуме спектральной чувствительности составляет около 500. Схожая ситуация наблюдается в опорном ФПУ. При использовании указанных параметров и учета погрешности измерения относительной спектральной характеристики, равной 6 %, были получены следующие результаты, отображенные в табл. 4.

Для реальных условий точность определения границ является высокой и увеличивается по мере уменьшения шага сканирования. Для длины волны в максимуме спектральной чувствительности точность возросла по сравнению с первичными исходными данными.

Для реальных условий точность измерения суммарного коэффициента использования от температуры АЧТ составляет около 4,5 %. Также при уменьшении шага сканирования возрастает систематическая ошибка, однако она не является доминирующей, как в случае больших шумов.

Таблица с данными о зависимости измерения коэффициента использования от температуры АЧТ для реальных условий в статье не приводится, поскольку она с высокой точностью совпадает с табл. 3.

Таблица 4

Результаты моделирования точности измерения границ по уровню 0,1 и длины волны максимума чувствительности для реальных условий

Шаг сканирования по длине волны	Длина волны максимума спектральной чувствительности			«Синяя» граница спектральной чувствительности			«Красная» граница спектральной чувствительности		
	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %
30 нм	1388,2	13,3	1,18	955,3	0,05	1,85	1682,4	0,10	0,16
18 нм	1435,1	14,9	4,60	965,0	0,03	0,86	1681,3	0,07	0,092
4 нм	1412,2	13,9	2,93	973,0	0,02	0,034	1679,1	0,07	0,039
2 нм	1417,1	13,9	3,23	973,6	0,04	0,022	1679,3	0,05	0,027
Исходная ОСХ	1372			973,389			1679,754		

* — указано для доверительной вероятности, равной 0,95.

Таблица 5

Результаты моделирования точности определения коэффициента использования для реальных условий

Шаг сканирования по длине волны	Коэффициент использования для температуры:								
	500 К			800 К			1000 К		
	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %
30 нм	$2,44 \cdot 10^{-5}$	4,15	0,41	$4,54 \cdot 10^{-3}$	3,83	0,22	0,0218	3,74	0,22
18 нм	$2,44 \cdot 10^{-5}$	3,62	0,41	$4,54 \cdot 10^{-3}$	3,51	0,22	0,0218	3,45	0,13
4 нм	$2,36 \cdot 10^{-5}$	3,01	2,47	$4,40 \cdot 10^{-3}$	2,96	2,87	0,0216	2,95	2,89
2 нм	$2,34 \cdot 10^{-5}$	2,66	3,70	$4,37 \cdot 10^{-3}$	2,64	3,52	0,0210	2,63	3,58
Исходная ОСХ	$2,43 \cdot 10^{-5}$			$4,53 \cdot 10^{-3}$			0,02179		

Выводы

С помощью разработанной математической модели были проведены оценки точности измерения для условий, описанных в [1], и для реальных условий.

При измерении относительной спектральной характеристики МФПУ на основе InGaAs и выполнении минимальных требований [1] к точности измерения сигналов с опорного ФПУ и измеряемого МФПУ (отношение сигнал/шум составляет ~14,3) ошибка измерения граничных значений длин волн по уровню 0,1 составляет менее $\pm 2\%$. Основной проблемой измерений является систематическая ошибка в определении коэффициента использования, достигающая 10,7%. Эта ошибка приводит к занижению порогового потока, вольтовой чувствительности и удельной обнаружительной способности на 10,7%.

При измерении в реальных условиях относительной спектральной характеристики МФПУ на основе InGaAs (наилучшее отношение сигнал/шум составляет около 500, неопределенность измерения спектральной характеристики опорного ФПУ 6%), точность определения граничных значений длин волн по уровню 0,1 составляет менее 2% для шага сканирования 30 нм, и падает до 0,1% и менее при измерении для шага 4 нм и менее. Точность измерения коэффициента пересчета составляет $\pm 4,5\%$ и увеличивается с ростом шага измерений. Последний результат требует проведения дополнительного исследования.

С целью минимизации ошибок измерения фотоэлектрических параметров рекомендуется проводить измерения при температуре АЧТ 1000 К. В этом случае погрешность измерения, вызванная погрешностью поддержания температуры, составит ~1,5%, а общая погрешность измерения основных фотоэлектрических параметров, вызванная погрешностью измерения спектральной характеристики, не превысит $\pm 4,8\%$ при условии правильной юстировки измеряемого МФПУ относительно выходной щели монохроматора.

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации НШ-2787.2014.9

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. — 65 с.
2. Балев Д. Л., Бедарева Е. А., Деомидов А. Д. и др. // Прикладная физика. 2014. № 6. С. 93.
3. Photovoltaic devices — Part 8: Measurement of spectral response of a photovoltaic (PV) device. IEC 60904-8 (МЭК 60904-8:1998).
4. Деомидов А. Д., Кононов М. Е., Полесский А. В. и др. // Прикладная физика. 2014. № 6. С. 87.
5. Балев Д. Л., Лазарев П. С., Болтарь К. О. // Прикладная физика. 2014. № 5. С. 54.
6. Ермаков С. М. Метод Монте-Карло и смежные вопросы. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 1975.

Using Monte Carlo method for uncertainty analysis of SWIR FPA spectral response measurement

A. D. Deomidov¹, A. V. Polesskiy¹, N. A. Semenchenko¹, V. C. Tresak², and A. A. Smirnov¹

¹Orion R&P Association, Inc.
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

²Bauman Moscow State Technical University
5 2-nd Bauman str., Moscow, 105005, Russia

Received July 1, 2015

The results of the uncertainty analysis of SWIR FPA spectral response measurement using Monte Carlo method were given. The following parameters of a spectral response were controlled: wavelengths of the spectral sensitivity by level 0.1, wavelength of maximum spectral response, utilization factor for 500, 800 and 1000 K, and dependence of utilization factor from temperature. Initial data for calculation

were the demands of the Russian standard for PV devices measurement and spectral response measurement uncertainty of reference FPA.

PACS: 02.30.Cj; 85.60.Gz, 84.37.+q

Keywords: uncertainty analysis, spectral response, FPA, SWIR, InGaAs.

REFERENCES

1. *GOST 17772-88*. (USSR Gosstandart, Moscow, 1988) [in Russian].
2. D. L. Baliev, E. A. Bedareva, A. D. Deomidov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 93 (2014).
3. *Photovoltaic devices — Part 8: Measurement of spectral response of a photovoltaic (PV) device. IEC 60904-8* (MEK 60904-8:1998).
4. A. D. Deomidov, M. E. Kononov, A. V. Poleskiy, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 87 (2014).
5. D. L. Baliev, P. S. Lazarev, and K. O. Boltar, *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 54 (2014).
6. S. M. Ermakov, *Monte-Carlo Method and Related Problems* (Fizmatlit, Moscow, 1975) [in Russian].