

УДК 51-74, 53.088.3

Исследование точности измерения спектральной характеристики видимо-слепого фотоприемника на основе AlGaN методом Монте-Карло

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

Проведена оценка точности измерения границ спектральной чувствительности по уровню сигнала 0,1, длины волны максимальной чувствительности и коэффициента использования для матричных фотоприемных устройств на основе AlGaN. Исходными данными для расчета являлись требования нормативной документации к точности измерения спектральной характеристики опорного фотоприемника, а также данные о шумах фотосигналов. Оценка точности, полученная с помощью математического моделирования методом Монте-Карло, показала наличие систематической погрешности при выполнении измерений, а также значительное влияние ошибок измерений на расчет коэффициента использования. Вместе с тем стоит отметить, что в реальных условиях измерения суммарный вклад случайных и систематических ошибок составляет не более 7 %, что существенно меньше величины, приведенной в нормативной документации.

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

Ключевые слова: точность измерения, спектральная характеристика, матричное фотоприемное устройство, видимо-слепая матрица, AlGaN, Монте-Карло.

Введение

Ошибка измерения спектральной характеристики напрямую влияет на точность измерения удельной обнаружительной способности, вольтовой чувствительности и порогового потока [1, 2]. Похожее исследование было сделано в работе [3] для матричного фотоприемного устройства (МФПУ) на основе InGaAs. Отличием данного исследования является то, что в данной работе учтена ошибка установки МФПУ относительно выходной щели монохроматора, а также учтено, что при последующих измерениях используются источники излучения со спектральной характеристикой более узкой, чем относительная спектральная

характеристика чувствительности (далее ОСХ или спектральная характеристика) МФПУ.

Постановка задачи

В качестве объекта исследования был выбран МФПУ на основе AlGaN, предназначенный для приема УФ-излучения в диапазоне 0,32—0,37 мкм. Тройное соединение AlGaN, в части приема УФ-излучения, обладает такими же свойствами, как КРТ, в части приема ИК-излучения, а именно, в зависимости от концентрации отдельных составляющих изменяется спектральный диапазон принимаемого излучения.

Спектральная характеристика определяется следующим набором параметров:

- границы спектральной характеристики по уровню 0,1;
- длина волны, соответствующая максимуму чувствительности;
- коэффициент использования для различных источников излучения.

Границы спектральной чувствительности и длина волны максимума чувствительности являются паспортными параметрами МФПУ. Коэффициент использования необходим при измерении

Деомидов Александр Дмитриевич, инженер 1 кат.
Полесский Алексей Викторович, главный метролог.
Семенченко Наталья Александровна, инженер.
Соломонова Наталья Алексеевна, инженер.
Тресак Виктория Константиновна, инженер.
АО «НПО «Орион».
Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.
E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 3 октября 2016 г.

© Деомидов А. Д., Полесский А. В., Семенченко Н. А., Соломонова Н. А., Тресак В. К., 2016

основных фотоэлектрических параметров МФПУ [1, 2], и определяется по формуле

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

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

Относительная методика измерения спектральной характеристики и схема оборудования её реализующая приведена как в отечественном [1], так и в зарубежном [4] стандарте. Схема измерения спектральной характеристики представлена на рис. 1.

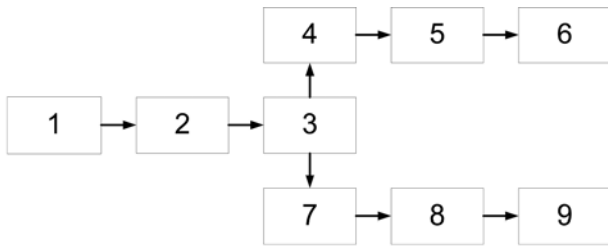


Рис. 1. Схема стенда для измерения спектральной характеристики: 1 — источник света, 2 — модулятор*, 3 — спектральный прибор (монохроматор), 4 — опорное ФПУ, 5 — блок электронной обработки, 6 — устройство отображения/хранения результатов измерения, 7 — измеряемое МФПУ, 8 — блок электронной обработки, 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 работе [5].

Вычисление относительной спектральной характеристики МФПУ при проведении измерений производится по формулам

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

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

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

тральная характеристика измеряемого МФПУ; $S_{\text{измер_max}}$ — максимальное значение спектральной характеристики измеряемого МФПУ до приведения.

Исследования точности измерения спектральной характеристики МФПУ на основе AlGaIn диапазона 0,32—0,37 мкм проводились на основе метода математического моделирования Монте-Карло, который представляет собой численный метод, основанный на получении большого числа реализаций случайного процесса и их последующей обработке [6].

При измерении использовался монохроматор, построенный по схеме Черни-Тернера. Поэтому, с учетом особенной его функционирования, на точность измерения также окажет влияние ошибка установки ФПУ относительно входной щели, погрешность установки длины волны и наличие вторичных спектров.

Вторичный спектр по результатам измерений обнаружен не был, хотя его учет представляет интерес, поскольку данное исследование позволит уточнить требования к фильтрам, с помощью которых происходит его устранение.

С учетом вышесказанного, основными источниками ошибок при измерении спектральной характеристики, как следует из формулы (2), являются:

- шум электрического сигнала измеряемого МФПУ;
- шум электрического сигнала опорного ФПУ;
- погрешность спектральной характеристики опорного ФПУ;
- ошибка установки измеряемого МФПУ относительно выходной щели монохроматора.

Оценка точности измерения спектральной характеристики

В качестве исходных данных для расчета были выбраны:

- одно из измерений спектральной характеристики МФПУ на основе AlGaIn, 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 7 % с достоверностью 0,95 (приведено в протоколе калибровки);
- погрешность установки МФПУ относительно выходной щели монохроматора, которая приводит к ошибке установки длины волны ± 1 нм, имеющей равномерный закон распределения.

В работе были рассмотрены два случая: выполнение требований [1] в части погрешностей измерения сигнала с опорного и измеряемого ФПУ, а также реальные условия измерения.

Для первого случая были введены следующие допущения:

- погрешность измерения сигнала с измеряемого МФПУ — 7 % с достоверностью 0,95 [1];
- погрешность измерения сигнала с опорного ФПУ — 7 % с достоверностью 0,95 [1];
- шум обоих ФПУ определяется погрешностью измерения сигнала.

Аналогично, для второго случая:

- величина шума обоих ФПУ (опорного и измеряемого) не зависит от длины волны и отношение сигнал/шум в максимуме спектральной чувствительности равно 500.

Измерение спектральной характеристики, включающее данные о напряжениях фотосигнала

с опорного ФПУ и измеряемого МФПУ, использовалась в качестве «эталонной» величины, и относительно нее проводились все последующие расчеты.

Измерение представляет собой четыре массива, в которых содержатся следующие данные:

- 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 — 76 значений, соответствующих измерениям в диапазоне 0,27—0,42 мкм с шагом 2 нм. Графические отображения используемых массивов представлены на рис. 2. Похожесть характеристик обусловлена относительно равномерным распределением светового потока по длинам волн.

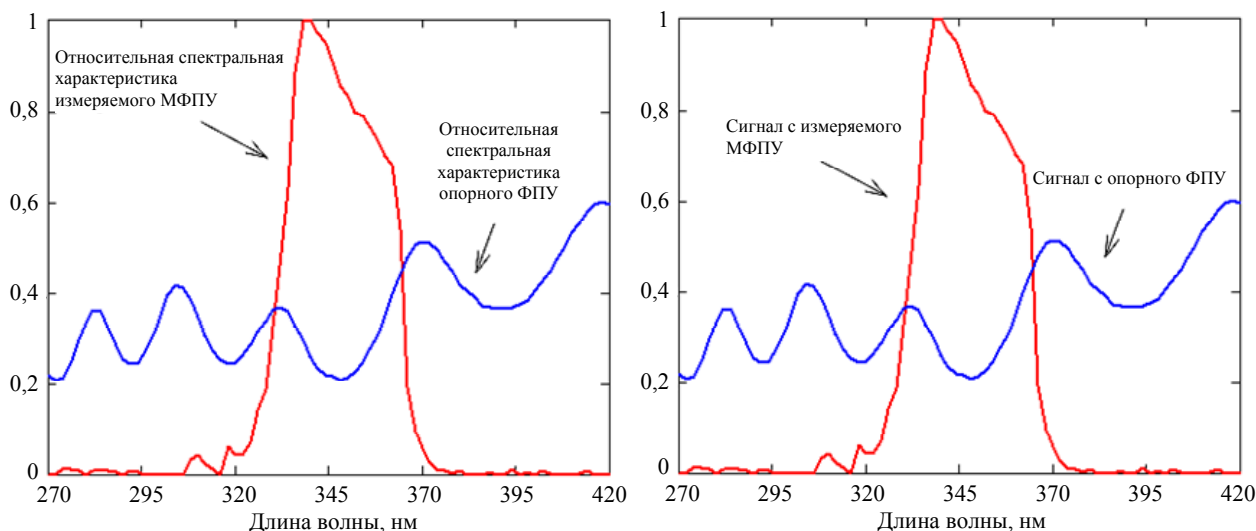


Рис. 2. Графическое отображение сигналов и относительных спектральных характеристик, используемых для моделирования.

Моделирование измерений проводилось в программе MathCad. Схема алгоритма моделирования измерения спектральной характеристики представлена на рис. 3. Операторы «rnorm» и «rnd» — операторы добавления шума с нормальным распределением, переменная «Coeff» позволяет связать погрешность измерения и СКО шума и определяется из закона распределения Гаусса

для вероятности 0,95. Также выполняется приведение к единице, т.е. «нормирования» опорной спектральной характеристики после её зашумления и рассчитанной спектральной характеристики измеряемого МФПУ. Определение граничных длин волн происходит методом линейной интерполяции.

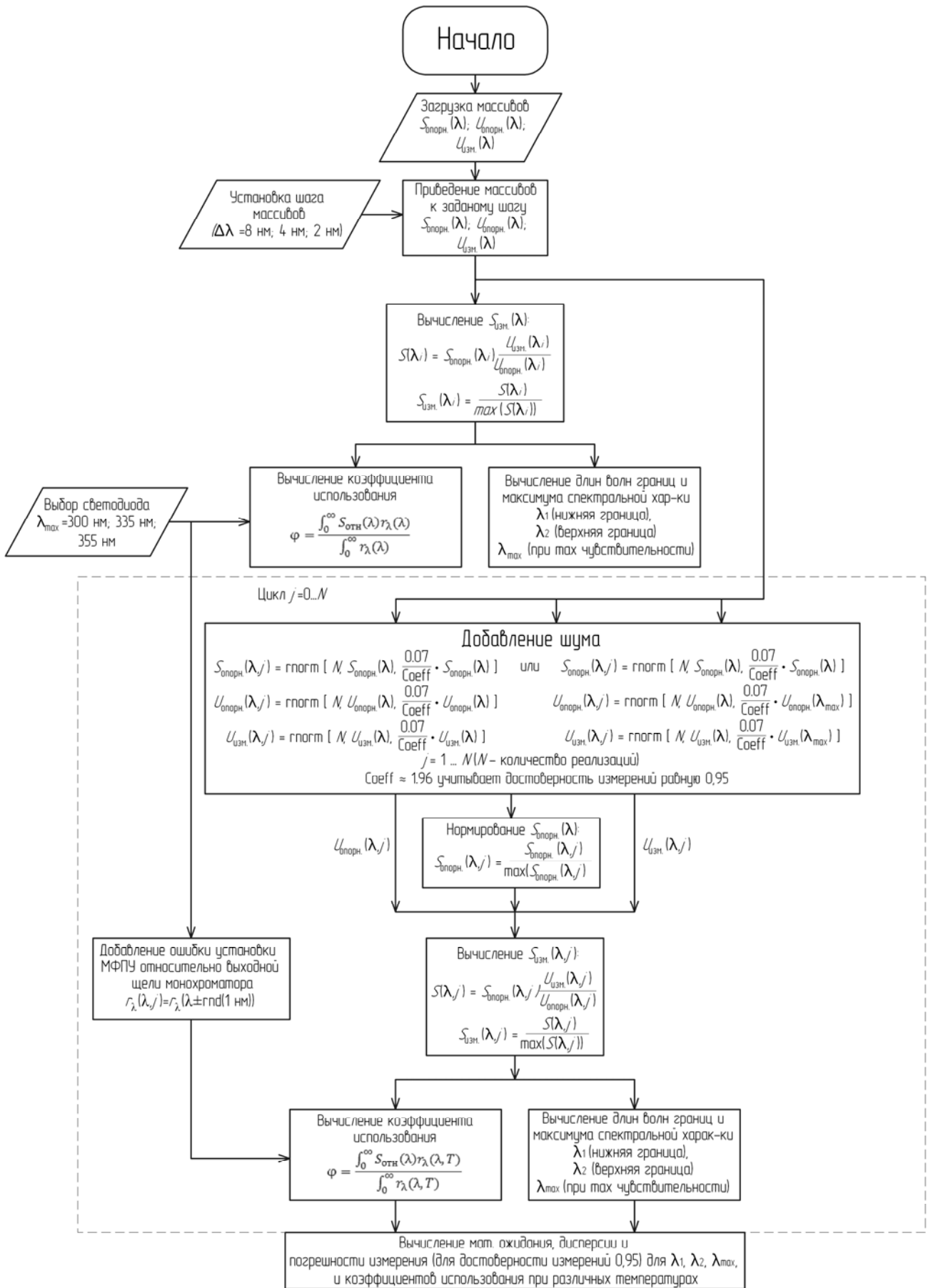


Рис. 3. Схема процесса моделирования измерения спектральной характеристики.

Точность спектральной характеристики при соблюдении условий [1] (наихудший случай)

Результаты моделирования погрешности измерения границ спектральной характеристики по уровню 0,1 и длины волны максимума чувствительности для 500 «бросков» при 7%-зашумлении сигнала опорного и измеряемого ФПУ и спектральной характеристики опорного ФПУ, но без учета ошибки установки МФПУ относительно выходной щели монохроматора, приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что погрешность незначительна и ее наибольшая величина наблюдается для длины волны максимума спектральной чувствительности. Также можно заметить, что при увеличении шага сканирования нет увеличения погрешности измерения данных параметров. Данный

результат можно объяснить формой спектральной характеристики: она имеет ярко выраженный максимум и резкие границы, именно по этой причине шумы, даже такие большие, оказывают незначительное влияние на точность измерения.

В табл. 2 приведены результаты моделирования точности определения коэффициента использования измеряемым МФПУ излучения источника с 7%-зашумлением сигнала с опорного и измеряемого ФПУ и спектральной характеристики опорного приемника для разных источников — светоизлучающих диодов, но без учета ошибки установки МФПУ относительно выходной щели. Спектральные характеристики светоизлучающих диодов с максимумами спектральной плотности излучения на 300 нм, 335 нм и 355 нм и относительная спектральная характеристика измеряемого МФПУ приведены на рис. 4.

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			Нижняя граница спектральной чувствительности			Верхняя граница спектральной чувствительности		
	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %
8 нм	С зашумлением								
	342,336	0,92	0,69	321,593	0,48	1,01	370,138	0,19	0,61
	342			321,568			370,117		
4 нм	С зашумлением								
	340,136	1,56	0,04	324,447	0,18	0,12	368,654	0,11	0,21
	338			324,329			368,738		
2 нм	С зашумлением								
	340,160	1,27	0,05	324,965	0,13	0,04	367,823	0,09	0,02
	340			324,824			367,898		

* — указано для доверительной вероятности равной 0,95.

Таблица 2

Результаты моделирования точности определения коэффициента использования при 7 % зашумлением спектральной характеристики опорного приемника, сигнала с опорного и измеряемого ФПУ без учета ошибки установки МФПУ относительно выходной щели

Шаг сканирования по длине волны	Коэффициент использования измеряемым ФПУ излучения источника, для разных источников — светоизлучающих диодов								
	300 нм			335 нм			355 нм		
	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %
8 нм	0,0224	9,44	14,87	0,6887	9,27	2,12	0,1961	14,76	19,76
4 нм	0,0187	7,44	4,11	0,6883	6,81	2,18	0,2332	11,57	4,58
2 нм	0,0186	7,16	4,62	0,6714	7,41	4,54	0,2336	9,31	4,42
Исходная ОСХ	0,0195			0,7036			0,2444		

* — указано для доверительной вероятности равной 0,95.

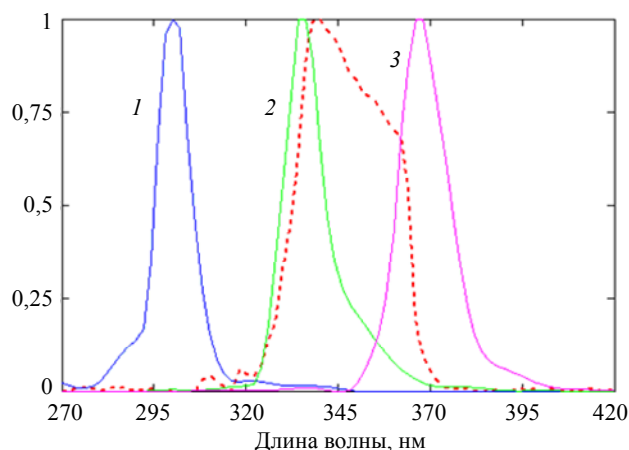


Рис. 4. Спектральные характеристики светоизлучающих диодов и исследуемого МФПУ. Относительная спектральная характеристика МФПУ (пунктирная линия). Основная спектральная характеристика диодов с максимумом на длине волны: 1 — 300 нм; 2 — 335 нм; 3 — 355 нм.

Из табл. 2 можно сделать вывод, что при измерениях предпочтительнее использовать диод с максимумом спектральной плотности потока излучения на 335 нм.

Результаты моделирования точности определения коэффициента использования измеряемым ФПУ излучения источника при 7%-зашумлении сигнала с опорного и измеряемого ФПУ, спектральной характеристики опорного ФПУ, а также при учете ошибки установки МФПУ относительно выходной щели, приводящей к ошибке установки длины волны на ± 1 нм приведены в табл. 3.

Как видно, при учете ошибки установки МФПУ относительно выходной щели, приводящей к ошибке установки длины волны на ± 1 нм, погрешности определения коэффициента использования практически не увеличились.

Таблица 3

Результаты моделирования точности определения коэффициента использования измеряемым ФПУ излучения источника при учете ошибки установки МФПУ относительно выходной щели монохроматора, приводящей к ошибке установки длины волны на ± 1 нм

Шаг сканирования по длине волны	Коэффициент использования измеряемым ФПУ излучения источника, для разных источников — светоизлучающих диодов								
	300 нм			335 нм			355 нм		
	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %
8 нм	0,0228	12,85	16,92	0,6901	10,22	1,92	0,1961	18,10	19,76
4 нм	0,0188	9,91	3,60	0,6896	7,25	1,99	0,2331	14,25	4,62
2 нм	0,0186	9,01	4,62	0,6707	7,75	4,68	0,2345	10,62	4,05
Исходная ОСХ	0,0195			0,7036			0,2444		

* — указано для доверительной вероятности равной 0,95.

Точность спектральной характеристики для реальных условий

Таблица 4

Результаты моделирования точности измерения границ по уровню 0,1 и длины волны максимума чувствительности при 7% зашумлении спектральной характеристики опорного ФПУ и при постоянном уровне шума сигнала с опорного и измеряемого ФПУ (0,2% от величины сигнала в максимуме чувствительности), но без рассмотрения ошибки установки МФПУ относительно выходной щели

Шаг сканирования по длине волны	Длина волны максимума спектральной чувствительности			Нижняя граница спектральной чувствительности			Верхняя граница спектральной чувствительности		
	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %
8 нм	С зашумлением								
	342,016	0,21	0,59	321,579	0,28	0,99	370,118	0,11	0,60
	342			321,568			370,117		
4 нм	С зашумлением								
	339,208	1,11	0,23	324,376	0,11	0,14	368,702	0,07	0,22
	338			324,329			368,738		
2 нм	С зашумлением								
	339,644	0,98	0,11	324,902	0,07	0,02	367,851	0,06	0,01
	340			324,824			367,898		

* — указано для доверительной вероятности равной 0,95.

Из табл. 4 видно, что для реальных условий точность измерения границ по уровню 0,1 и длины волны максимума чувствительности является высокой и увеличивается с уменьшением шага сканирования. Сравнительный анализ результатов, приведенный в таблицах 1 и 4, показывает, что для данной спектральной характеристики величина

отношения сигнал/шум слабо влияет на точность измерения ее границ и максимума.

Для реальных условий измерения погрешность определения коэффициента использования измеряемым МФПУ излучения источника примерно в 1,5 раза ниже, чем для условий, описанных в [1].

Таблица 5

Результаты моделирования точности определения коэффициента использования МФПУ излучения источника при 7%-зашумлении спектральной характеристики опорного приемного устройства и при постоянном уровне шума сигнала с опорного и измеряемого ФПУ (0,2 % от величины сигнала в максимуме чувствительности) без при учета ошибки установки МФПУ относительно выходной щели

Шаг сканирования по длине волны	Коэффициент использования измеряемым ФПУ излучения источника, для разных источников — светоизлучающих диодов								
	300 нм			335 нм			355 нм		
	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %
8 нм	0,0228	9,22	16,92	0,6913	5,61	1,75	0,1959	8,60	19,84
4 нм	0,0196	6,72	0,51	0,6978	4,24	0,82	0,2355	6,85	3,64
2 нм	0,0196	5,63	0,51	0,6876	4,26	2,27	0,2394	6,05	2,05
Исходная ОСХ	0,0195			0,7036			0,2444		

* — указано для доверительной вероятности равной 0,95.

Таблица 6

Результаты моделирования точности определения коэффициента использования МФПУ излучения источника при постоянном уровне шума сигнала с опорного и измеряемого ФПУ (0,2 % от величины сигнала в максимуме чувствительности), 7%-зашумлении спектральной характеристики опорного приемника, а также при включении в модель ошибки установки МФПУ относительно выходной щели, приводящей к ошибке установки длины волны на ± 1 нм

Шаг сканирования по длине волны	Коэффициент использования измеряемым ФПУ излучения источника, для разных источников — светоизлучающих диодов								
	300 нм			335 нм			355 нм		
	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %
8 нм	0,0231	12,74	18,46	0,6919	6,87	1,66	0,1964	13,15	19,64
4 нм	0,0197	9,43	1,03	0,6968	4,86	0,97	0,2355	10,38	3,64
2 нм	0,0196	7,63	0,51	0,6866	4,63	2,42	0,2396	7,93	1,96
Исходная ОСХ	0,0195			0,7036			0,2444		

* — указано для доверительной вероятности равной 0,95.

Описанная модель шумов является наиболее приближенной к реальным условиям измерения. Наиболее важным выводом является то, что для увеличения точности измерений необходимо согласовывать диапазоны спектральной чувствительности источника излучения и МФПУ. Следовательно, предпочтительнее использовать светоизлучающий диод с максимумом плотности потока излучения на 335 нм. А также можно сказать о значительном вкладе зашумления спектральной характеристики светоизлучающего диода в погрешность определения коэффициента использования.

Заключение

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

Погрешности определения граничных длин волн по уровню 0,1, длины волны максимума чувствительности, а также коэффициента использования были получены для различных видов шумов. Эти исследования показали, что при добавлении шума, уровень которого зависит от величины сигнала с опорного и измеряемого ФПУ, и шума, независящего от него, получаются похожие данные.

При выполнении условий нормативной документации погрешность измерения максимума и границ ОСХ не превышает 1 %. Для реальных условий стоит также отметить, что погрешность не увеличивается при увеличении шага сканирования, и это можно объяснить формой ОСХ исследуемого МФПУ. Погрешность определения коэффициента использования измеряемого МФПУ без учета ошибки его установки составляет 9,5 % и 10,4 % при учете ошибки установки. В точках 0,1 величина приращения спектральной характеристики $\Delta S_{\lambda}/\Delta\lambda = 0,035 \text{ nm}^{-1}$ больше величины шума, поэтому наблюдается хорошая воспроизводимость измерений граничных длин волн.

При измерении в реальных условиях ошибка определения граничных значений длин волн по уровню 0,1 и длины волны максимума составляет менее 1 %. Погрешность измерения коэффициента пересчета без учета ошибки установки МФПУ составляет 5,9 % и 7 % с учетом ошибки.

С целью минимизации ошибок измерения необходимо согласовывать диапазоны спектральной

чувствительности источника излучения и измеряемого МФПУ. Это позволяет уменьшить ошибку в 1,5 раза. Следовательно, для данного МФПУ предпочтительнее использовать светоизлучающий диод с максимумом плотности потока излучения на 335 нм.

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. Балиев Д. Л., Бедарева Е. А., Деомидов А. Д. и др. // Прикладная физика. 2014. № 6. С. 93.
3. Деомидов А. Д., Полесский А. В., Семенченко Н. А., Тресак В. К. // Прикладная физика. 2015. № 4. С. 94.
4. Photovoltaic devices — Part 8: Measurement of spectral response of a photovoltaic (PV) device. IEC 60904-8 (МЭК 60904-8:1998).
5. Деомидов А. Д., Кононов М. Е., Полесский А. В. и др. // Прикладная физика. 2014. № 6. С. 87.
6. Ермаков С. М. Метод Монте-Карло и смежные вопросы. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 1975.

Using the Monte Carlo method for an uncertainty analysis of a spectral response measurement of FPA based on AlGaIn

A. D. Deomidov, A. V. Polesskiy, N. A. Semenchenko, N. A. Solomonova, and V. C. Tresak

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

Received October 3, 2016

Consideration is given to results of the uncertainty analysis of the UV FPA (0.32—0.37 μm) spectral response measurement using the Monte Carlo method. The following parameters of spectral response were controlled: wavelengths of the spectral sensitivity by level 0.1, wavelength of maximum spectral response, utilization factor. Initial data for calculation were the demands of the Russian standard for PV devices measurement and spectral response measurement uncertainty of reference FPA. It was found that in both cases there is a significant systematic error in determining utilization factor (almost 7 % in case of low signal/noise ratio) which understate a value of FPA photoelectric parameters. Conditions of minimize the measurement errors have been determine.

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

Keywords: uncertainty analysis, spectral response, UV FPA, Monte Carlo, AlGaIn.

REFERENCES

1. GOST 17772-88. (USSR, 1988).
2. D. L. Baliev, E. A. Bedarevam A. D. Deomidov, et al., Prikl. Fiz. No. 6, 93 (2014).
3. A. D. Deomidov, A. V. Polesskiy, N. A. Semenchenko, and V. K. Tresak, Prikl. Fiz. No. 4, 94 (2015).
4. Photovoltaic devices — Part 8: Measurement of spectral response of a photovoltaic (PV) device. IEC 60904-8 (MEK 60904-8:1998).
5. A. D. Deomidov, M. E. Kononov, A. V. Polesskiy, et al., Prikl. Fiz. No. 6, 87 (2014).
6. S. M. Ermakov, *The Monte Carlo Method and Adjacent Questions* (FIZMATLIT, Moscow, 1975) [in Russian].