

Исследование погрешности определения параметров спектральной характеристики ИК и УФ фотоприемных устройств

А. В. Полесский, Н. А. Соломонова, Н. А. Семенченко

При измерении фотоприемных устройств (ФПУ) на практике используется не сама относительная спектральная характеристика (ОСХ), а параметры, которые получаются при ее обработке: коэффициент использования излучения источника приемным устройством, граничные длины волн по уровню сигнала 0,1 (или 0,5) и длина волны, соответствующая максимуму спектральной чувствительности. При этом вопрос ошибки измерения этих параметров в литературе слабо освещен, а за ошибку измерения принималась точность измерения ОСХ. Целью данной работы являлось определение точности измерения основных параметров ОСХ, используемых на практике, путем моделирования процесса измерения ОСХ и ее последующей обработки. Особое внимание было уделено коэффициенту использования, который применяется в расчетах основных фотоэлектрических параметров ФП и ФПУ (вольтовая чувствительность, удельная обнаружительная способность, пороговый поток). В результате проведенных исследований был сделан вывод о том, что ошибка определения коэффициента использования при согласовании диапазонов спектральной чувствительности источника излучения и приемного устройства и ОСШ не менее 100 составляет не более 10 %. Ошибка измерения граничных длин волн составляет примерно 2 %. Ошибка определения длины волны соответствующей максимуму чувствительности составляет 3 % при явно выраженном максимуме и при невыраженном – 30 %.

Ключевые слова: ошибка измерения, спектральная характеристика, фотоприемное устройство, метод Монте-Карло.

Введение

Относительная спектральная характеристика (ОСХ) является важным параметром фотоприемников (ФП) и фотоприемных устройств (ФПУ). На практике при измерении ФПУ используется не сама ОСХ, а параметры, которые получаются при ее обработке: коэффициент использования излучения источника приемным устройством, граничные длины волн по уровню сигнала 0,1 (или 0,5) и длина волны, соответствующая максимуму чувствительности. При этом вопрос ошибки измерения этих параметров в литературе слабо освещен, а за ошибку измерения принималась точность измерения ОСХ [1], которая представляет собой величину смещения каждой точки графика спек-

тральной чувствительности по четырем направлениям: вверх, вниз, влево, вправо.

Целью данной работы являлось определение точности измерения основных параметров ОСХ, используемых на практике, путем моделирования процесса измерения ОСХ и ее последующей обработки.

Данная работа является частичным обобщением более ранних исследований [2, 3], расширенных на все ФПУ ультрафиолетового (УФ), коротковолнового, средневолнового и дальнего ИК-диапазонов, выпускаемых АО «НПО «Орион» [4–7].

Постановка задачи

Как говорилось ранее, при измерении ФПУ используют следующие параметры, получаемые из ОСХ:

- границы спектральной характеристики по уровню сигнала 0,1 (или 0,5);
- длина волны, соответствующая максимуму чувствительности;
- коэффициент использования излучения источника ФПУ.

Полесский Алексей Викторович, главный метролог, к.т.н.

Соломонова Наталья Алексеевна, инженер.

Семенченко Наталья Александровна, инженер.

АО «НПО «Орион».

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

E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 28 июня 2017 г.

© Полесский А. В., Соломонова Н. А., Семенченко Н. А., 2017

Коэффициент использования излучения показывает, какую долю излучения источника использует приемник.

Вычисление коэффициента использования φ производится по следующей формуле:

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

При расчетах коэффициента использования падающего на приемник излучения для УФ ФПУ в качестве источников использовались светоизлучающие диоды с максимумами спектральной плотности излучения на 300 нм, 335 нм и 355 нм, для ИК ФПУ – АЧТ при $T = 300, 500, 800, 1000$ К.

Расчет погрешностей проводился методом математического моделирования Монте-Карло, который представляет собой численный метод, основанный на получении большого числа реализаций случайного процесса и их последующей обработке [4–7].

Основными источниками ошибок при измерении спектральной характеристики являются:

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

В качестве исходных данных для моделирования процесса определения точности измерения спектральной характеристики были выбраны:

- измерения сигналов ФПУ УФ, коротковолнового, средневолнового и дальнего ИК-диапазонов;
- спектральная характеристика и сигнал с ФПУ, которое использовалось в качестве опорного приемника при измерениях (в качестве опорного приемника использовался пироэлектрический приемник, у которого спектральная характеристика во всем диапазоне примерно равна 1);
- погрешность измерения спектральной характеристики опорного ФПУ составляет 7 % с достоверностью 0,95;
- погрешность измерения сигнала с измеряемого и опорного ФПУ получена из условия, что отношение сигнал/шум в **максимуме спектральной чувствительности** составляет 500, 100 и 20.

В ходе исследования была создана математическая модель процесса измерения спектральной характеристики, учитывающая погрешность измерения контрольного приемника, шумы опорного и

измеряемого фотоприемника, и проведен анализ полученных результатов. Моделирование измерений проводилось в программе MatLab.

Вычисление ОСХ ФПУ 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 спектральная характеристика измеряемого МФПУ;

$S_{\text{измер_max}}$ – максимальное значение спектральной характеристики измеряемого МФПУ до приведения.

Кратко алгоритм определения точности измерения спектральной характеристики можно описать следующим образом: по загружаемым результатам измерения сигналов с опорного и измеряемого ФПУ и спектральной характеристике опорного приемника вычисляется спектральная характеристика исследуемого ФПУ по формуле (2). После чего она нормируется, как показано в формуле (3). Далее по полученной ОСХ рассчитываются длина волны, соответствующая максимуму чувствительности, левая и правая границы чувствительности по уровню сигнала 0,1, а также коэффициент использования выбранного источника излучения ФПУ. Таким образом, получают исходные данные при отсутствии каких-либо шумов. Для зашумления характеристик применяется метод математического моделирования, который реализуется в виде цикла. В данном исследовании использовалось 500 реализаций цикла. На каждом шаге цикла рассчитываются основные параметры, определяющие ОСХ, и, следовательно, на выходе образуются массивы значений этих параметров. После чего проводится обработка полученных результатов при различном шаге сканирования (2 нм, 4 нм, 8 нм) и при использовании различных источников излучения для вычисления коэффициента использования (абсолютно черное тело (АЧТ) для ФПУ ИК-диапазона и светоизлучающих диодов для ФПУ УФ-диапазона):

- определяют среднее значение для каждого параметра;
- вычисляют СКО параметра, и на его основе определяют случайную погрешность;

- рассчитывают систематическую погрешность.
- Графически схема алгоритма вычисления погрешностей отображена на рис. 1.

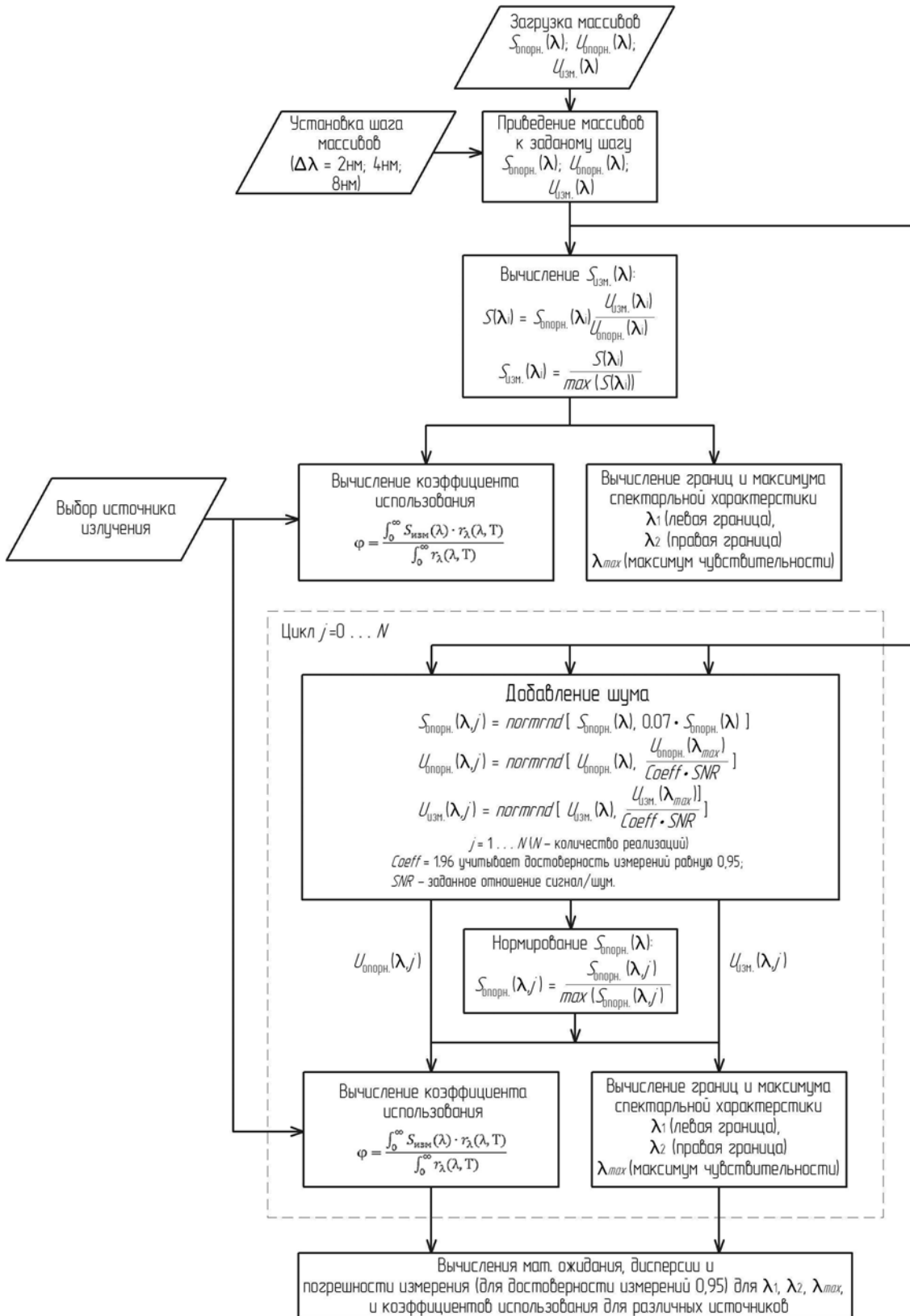


Рис. 1. Схема алгоритма вычисления погрешностей.

Точность определения коэффициента использования излучения ФПУ диапазона 0,32...0,37 мкм

Результаты вычисления погрешности коэффициента использования при 7%-зашумлении спектральной характеристики опорного ФПУ и погрешностях измерения сигналов с опорного и

измеряемого приемников, равных 0,4 %, что соответствует реальным условиям измерения, и 7 %, что соответствует условиям нормативной документации, приведены в табл. 1.

Спектральные характеристики измеряемого приемника, а также светоизлучающих диодов, используемых при вычислении коэффициента использования излучения, приведены на рис. 2.

Таблица 1

Результаты моделирования точности определения коэффициента использования для ФПУ диапазона 0,32...0,37 мкм

	Погрешность измерения сигнала 0,4 % (ОСШ = 500)	Погрешность измерения сигнала 7 %
Случайная ошибка, %	9,2	14,8
Систематическая ошибка, %	19,8	19,8
Суммарная ошибка, если не согласованы спектральные диапазоны ФПУ и источника, %	21,8	24,7
Суммарная ошибка, если спектральные диапазоны ФПУ и источника, %	4,8	8,6

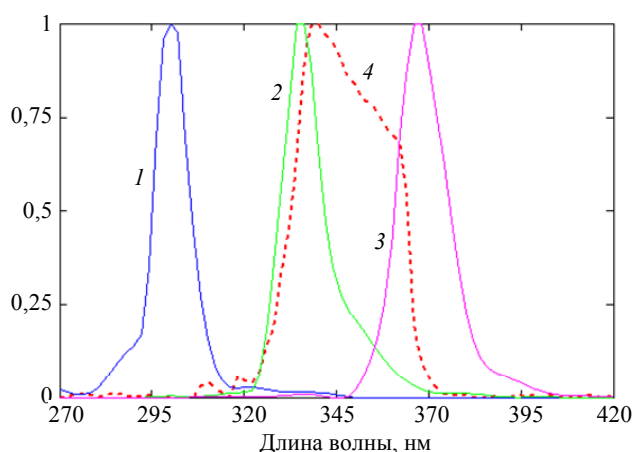


Рис. 2. Спектральные характеристики измеряемого ФПУ и светоизлучающих диодов. Относительная спектральная характеристика диодов с максимумом на длине волны: 1 – 300 нм, 2 – 335 нм, 3 – 355 нм; 4 – относительная спектральная характеристика МФПУ.

Из табл. 1 видно, что точность вычисления коэффициента использования меньше при погрешностях измерения сигналов 7 %. Также можно

сделать вывод, что случайная составляющая погрешности при увеличении шага вычислений от 2 нм к 4 нм и 8 нм увеличивается, одновременно при тех же условиях увеличиваются систематическая составляющая погрешности и суммарная погрешность.

Точность определения коэффициента использования излучения ФПУ диапазона 0,9...1,7 мкм

Результаты определения погрешности коэффициента использования при 7%-зашумлении спектральной характеристики опорного ФПУ и погрешностях измерения сигналов с опорного и измеряемого приемников, равных 0,4 %, что соответствует реальным условиям измерения, и 7 %, что соответствует условиям нормативной документации, приведены в табл. 2.

Графики спектральных характеристик измеряемого и опорного приемника, используемых при вычислениях, приведены на рисунке 3.

Таблица 2

Результаты моделирования точности определения коэффициента использования для ФПУ диапазона 0,9...1,7 мкм

	Погрешность измерения сигнала 0,4 % (ОСШ = 500)	Погрешность измерения сигнала 7 %
Случайная ошибка, %	4,15	7
Систематическая ошибка, %	3,7	10,6
Суммарная ошибка, %	5,6	12,7

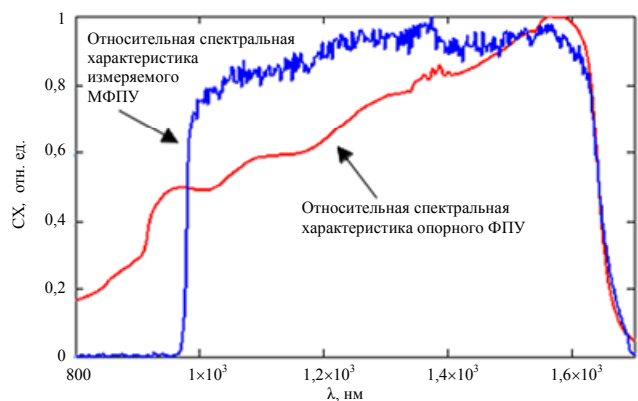


Рис. 3. Спектральные характеристики (CX) измеряемого и опорного приемника.

Из табл. 2 можно сделать вывод, что точность вычисления коэффициента использования меньше при погрешностях измерения сигналов 7 %. Также при увеличении шага вычислений от 2 нм к 4 нм и

8 нм случайная составляющая погрешности увеличивается, но уменьшаются при тех же условиях систематическая составляющая погрешности и суммарная погрешность.

Точность определения коэффициента использования излучения ФПУ диапазона 1,8...3,0 мкм

Результаты вычисления погрешности коэффициента использования при 7%-зашумлении спектральной характеристики опорного ФПУ и погрешностях измерения сигналов с опорного и измеряемого приемников равных 0,4 %, 2 % и 10 %, приведены в табл. 3.

Спектральные характеристики измеряемого приемника, а также источника излучения – АЧТ – при различных температурах приведены на рис. 4.

Таблица 3

Результаты моделирования точности определения коэффициента использования для ФПУ диапазона 1,8...3,0 мкм

	Погрешность измерения сигнала 0,4 % (ОСШ = 500)	Погрешность измерения сигнала 2 % (ОСШ = 100)	Погрешность измерения сигнала 10 % (ОСШ = 20)
Случайная ошибка, %	4,7	7,1	9,7
Систематическая ошибка, %	16,9	25,8	30,3
Суммарная ошибка, если не согласованы спектральные диапазоны ФПУ и источника, %	17,5	26,8	31,8
Суммарная ошибка, если спектральные диапазоны ФПУ и источника, %	8,4	6	17,3

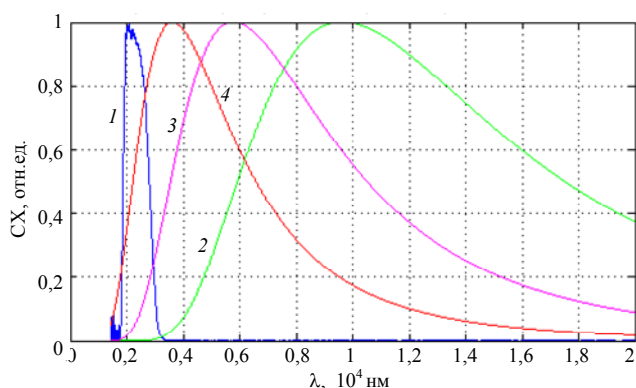


Рис. 4. Спектральные характеристики (CX) измеряемого ФПУ и источника.

Кривая 1 – ОСХ измеренного приемника, 2 – спектральная характеристика источника $T = 300\text{ K}$, 3 – спектральная характеристика источника $T = 500\text{ K}$, 4 – спектральная характеристика источника $T = 800\text{ K}$.

Как видно из табл. 3, с уменьшением отношения сигнал/шум увеличивается погрешность определения коэффициента использования излучения ФПУ. Также стоит отметить, что случайная составляющая погрешности увеличивается при увеличении шага вычислений, а систематическая составляющая погрешности и суммарная погрешность уменьшаются.

Точность определения коэффициента использования излучения ФПУ диапазона 3,0...5,0 мкм

Результаты определения погрешности коэффициента использования при 7%-зашумлении спектральной характеристики опорного ФПУ и погрешностях измерения сигналов с опорного и измеряемого приемников, равных 0,4 %, 2 % и 10 %, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты моделирования точности определения коэффициента использования для ФПУ диапазона 3,0...5,0 мкм

	Погрешность измерения сигнала 0,4 % (ОСШ = 500)	Погрешность измерения сигнала 2 % (ОСШ = 100)	Погрешность измерения сигнала 10 % (ОСШ = 20)
Случайная ошибка, %	5,0	5,2	9,6
Систематическая ошибка, %	6,4	6,9	39,7
Суммарная ошибка, %	8,1	8,6	40,8

Спектральные характеристики измеряемого приемника, а также источника излучения – АЧТ – при различных температурах приведены на рис. 5.

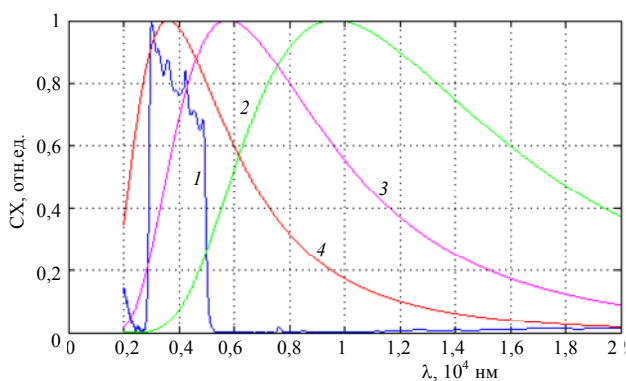


Рис. 5. Спектральные характеристики (CX) измеряемого ФПУ и источника.

Кривая 1 – ОСХ измеренного приемника, 2 – спектральная характеристика источника $T = 300\text{ K}$, 3 – спектральная характеристика источника $T = 500\text{ K}$, 4 – спектральная характеристика источника $T = 800\text{ K}$.

Из таблицы 4 видно, что с уменьшением отношения сигнал/шум уменьшается и точность определения коэффициента использования. Случайная же составляющая погрешности увеличивается при увеличении шага вычислений, а систематическая составляющая и суммарная погрешность уменьшаются.

Точность определения коэффициента использования излучения ФПУ диапазона 7,0...11,0 мкм

Результаты определения погрешности коэффициента использования при 7%-зашумлении спектральной характеристики опорного ФПУ и погрешностях измерения сигналов с опорного и измеряемого приемников, равных 0,4 %, 2 % и 10 %, приведены в табл. 5.

Спектральные характеристики измеряемого приемника, а также источника излучения – АЧТ – при различных температурах приведены на рис. 6.

Таблица 5

Результаты моделирования точности определения коэффициента использования для ФПУ диапазона 7,0...11,0 мкм

	Погрешность измерения сигнала 0,4 % (ОСШ = 500)	Погрешность измерения сигнала 2 % (ОСШ = 100)	Погрешность измерения сигнала 10 % (ОСШ = 20)
Случайная ошибка, %	3,4	4,4	16,1
Систематическая ошибка, %	8,4	8,9	17,9
Суммарная ошибка, %	9,1	9,9	24,1

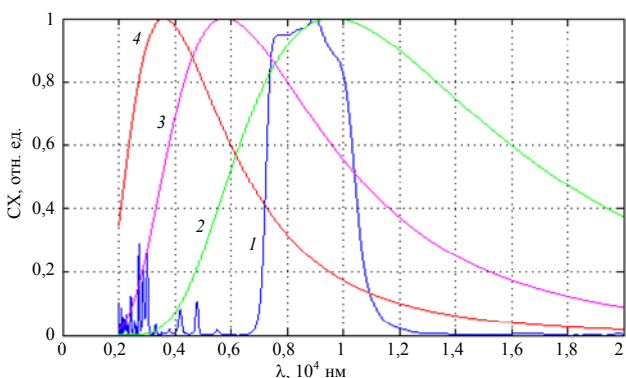


Рис. 6. Спектральные характеристики (CX) измеряемого ФПУ и источника.

Кривая 1 – ОСХ измеренного приемника, 2 – спектральная характеристика источника $T = 300\text{ K}$, 3 – спектральная характеристика источника $T = 500\text{ K}$, 4 – спектральная характеристика источника $T = 800\text{ K}$.

Из табл. 5 видно, что с уменьшением отношения сигнал/шум увеличивается погрешность определения коэффициента использования излучения. Также можно сделать вывод, что случайная составляющая погрешности увеличивается при увеличении шага вычислений от 2 нм к 4 нм и 8 нм, а систематическая составляющая и суммарная погрешность уменьшаются.

Заключение

В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что для увеличения точности измерений необходимо согласовывать диапазоны спектральной чувствительности источника излучения и измеряемого ФПУ. В большинстве случаев измерения следует проводить при ОСШ не менее 100. Дальнейшее увеличение отношения не приводит к существенному увеличению точности. Ошибка определения коэффициента использования при соблюдении выше описанных условий составляет не более 10 %. Ошибка измерения граничных длин волн составляет примерно 2 %. Ошибка определения длины волны, соответствующей максимуму чувствительности, составляет 3 % при явно выраженном максимуме и при невыраженном – 30 %.

Направлениями дальнейших исследований являются следующие позиции:

– анализ применения медианной фильтрации для увеличения точности измерения спектральной характеристики;

– определение влияния «хвостов» на точность измерения (необходимость обрезки лишних данных в полученных ОСХ);

– изучение распределения ОСХ по матрице фоточувствительных элементов ФПУ второго и третьего поколений;

– формализация требований на «согласованность» ФПУ и источника излучения.

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. Деомидов А. Д., Полесский А. В., Семенченко Н. А., Тресак В. К. // Прикладная физика. 2015. № 4. С. 94.
3. Деомидов А. Д., Полесский А. В., Семенченко Н. А., Соломонова Н. А., Тресак В. К. // Успехи прикладной физики. 2016. том 4. № 5. С. 485.
4. Болтарь К. О., Таубкин И. И., Седнев М. В., Чинарева И. В., Лопухин А. А., Смирнов Д. В., Мармалюк А. А., Мазалов А. В., Сабитов Д. Р., Курешов В. А., Падалица А. А. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 71.
5. Балиев Д. Л., Болтарь К. О., Власов П. В., Киселева Л. В., Ложников В. Е., Лопухин А. А., Мансветов Н. Г., Полунов В. С., Рудневский В. С., Савостин А. В. // Прикладная физика. 2014. № 2. С. 41.
6. Филячев А. М., Никонов А. В., Болтарь К. О., Моисеев А. Н., Чилиясов А. В., Степанов Б. С. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 37.
7. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Власов П. В., Лопухин А. А., Чалый В. П., Кацавец Н. И. // Прикладная физика. 2016. № 6. С. 37.
8. Ермаков С. М. Метод Монте-Карло и смежные вопросы. – М.: Физматлит, 1975.

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

The study of the error of determination of parameters of spectral characteristics of IR and UV photodetectors

A. V. Polesskiy, N. A. Solomonova, and N. A. Semenchenko

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

Received June 28, 2017

The following parameters related with a spectral response are really used for the FPA measurement: wavelengths of the spectral sensitivity by level 0.1 (0.5), wavelength of maximum spectral response and utilization factor. The results of uncertainty analysis for really used parameters of IR and UV FPA were given in this paper. The uncertainty analysis was carried out using the Monte Carlo simulation method. As a result, it was revealed that the error in determining the utilization factor less than 10 %. The error in determining wavelengths of the spectral sensitivity by level 0.1 less

than 2 %. The error in determining wavelength of maximum spectral response less than 3 %. Conditions for minimize the measurement errors of FPA D*, sensitivity, threshold flux were also determined.

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

REFERENCES

1. GOST 17772-88. (USSR Gosstandart, Moscow, 1988) [in Russian].
2. A. D. Deomidov, A. V. Poleskiy, N. A. Semenchenko, and V. K. Tresak, *Prikl. Fiz.*, No. 4, 94 (2015).
3. A. D. Deomidov, A. V. Poleskiy, N. A. Semenchenko, N. A. Solomonova, and V. C. Tresak, *Usp. Prikl. Fiz.*, No. 5, 485 (2016).
4. K. O. Boltar, I. V. Chinareva, I. I. Taubkin, M. V. Sednev, A. A. Lopukhin, D. V. Smirnov, A. A. Marmalyuk, A. V. Mazalov, D. R. Sabitov, V. A. Kureshov, and A. A. Padalitsa, *Prikl. Fiz.*, No. 6, 71 (2013).
5. D. L. Baliev, K. O. Boltar, P. V. Vlasov, L. V. Kiseleva, V. E. Lozhnikov, A. A. Lopuhin, N. G. Mansvetov, V. V. Poluneev, V. S. Rudnevsky, and A. V. Savostin, *Prikl. Fiz.*, No. 2, 41 (2014).
6. A. M. Filachev, A. V. Nikonov, K. O. Boltar, A. N. Moiseev, A. V. Chilyasov, and B. S. Stepanov, *Prikl. Fiz.*, No. 6, 37 (2013).
7. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, P. V. Vlasov, A. A. Lopukhin, V. P. Chaliy, and N. I. Katsavec, *Prikl. Fiz.*, No. 6, 37 (2016).
8. S. M. Ermakov, *Monte-Carlo Method and Related Problems* (Fizmatlit, Moscow, 1975) [in Russian].