

**Применение метода Монте-Карло для исследования точности измерения спектральной характеристики фотоприемников коротковолнового ИК диапазона**  
А.А. Колесова<sup>1</sup>, Н.А. Соломонова<sup>1,2</sup>, Е.О. Тренина<sup>1</sup>, Ю.А. Фирсенкова<sup>1,2</sup>, П.В. Храбров<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Научно-производственное объединение «Орион»

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

<sup>3</sup> АО «Швабе-Фотоприбор»

Важным контролируемым параметром матричных фотоприемных устройств (МФПУ) для диапазона 0,9...1,7 мкм, является относительная спектральная характеристика чувствительности (ОСХ). Кроме прочего, она используется для вычисления полезного потока, попадающего на фотоприемное устройство (ФПУ) [1, 2] от эталонного источника излучения при измерении основных параметров. Поэтому ошибки измерения ОСХ влияют на измерения удельной обнаружительной способности, вольтовой чувствительности и порогового потока.

Спектральная характеристика (СХ) характеризуется границей, длиной волны максимума чувствительности, «коэффициентом использования» при различных температурах абсолютно черного тела (АЧТ) (эталонного излучателя, широко используемого для измерения основных фотоэлектрических параметров [1,2]) и изменением коэффициента использования при изменении температуры АЧТ.

Методы измерения СХ сходны в отечественном [1] и в зарубежном [3] стандарте, и реализуют относительную методику измерения. Для исследований был выбран стенд, описанный в [4], в варианте исполнения для измерения МФПУ формата 320x256 на основе InGaAs [5].

Существует 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, постольку 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].

Источники ошибок измерения СХ это шум электрического сигнала и погрешность спектральной характеристики опорного ФПУ, а также шум электрического сигнала

измеряемого МФПУ. В качестве исходных данных для измерения СХ с параметрами сигналов и шумов, рекомендованных в [1], были выбраны: одно из измерений СХ МФПУ на основе InGaAs (включающее сигналы с опорного ФПУ, с измеряемого МФПУ и спектральную характеристику опорного ФПУ) и погрешность измерения СХ опорного ФПУ (составляет 6% с достоверностью 0,95).

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

Таблица 1. Результаты моделирования точности измерения границ по уровню 0,1 и длинны 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.

Как видно из таблицы 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).

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.

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

Таблица 2. Моделирование 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.

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  $\pm 12\%$  при отсутствии ошибки установки температуры абсолютно черного тела. Зависимость измерения коэффициента использования от температуры АЧТ представлена в таблице 3.

Таблица 3. Зависимость измерения коэффициента использования от температуры АЧТ

Шаг сканирования по длине волны	Зависимость измерения коэффициента использования от температуры АЧТ, %					
	Для 500К – коэффициент использования принят равным 100%		Для 800К – коэффициент использования принят равным 100%		Для 1000К – 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 таблицы 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.

В реальности точность измерения сигнала в МФПУ на основе InGaAs всегда выше, чем требуемая согласно [1]. Отношение сигнал/шум МФПУ составляет около 500.

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.

С помощью разработанной математической модели были проведены оценки точности измерения для реальных условий и описанных в [1]. При измерении ОСХ МФПУ на основе InGaAs и выполнении минимальных требований [1] к точности измерения сигналов с опорного ФПУ и измеряемого МФПУ (сигнал/шум ~14,3) ошибка измерения граничных значений длин волн по уровню 0,1 составляет менее  $\pm 2\%$ . Основная проблема – систематическая ошибка в определении коэффициента использования (до 10,7%). При измерении ОСХ в реальных условиях точность определения граничных значений длин волн по уровню 0,1 менее 2% для шага сканирования 30 нм, и до 0,1% и менее для шага  $\leq 4$  нм. Точность измерения коэффициента пересчета составляет  $\pm 4,5\%$  и увеличивается с ростом шага измерений.

С целью минимизации ошибок рекомендуется проводить измерения при температуре АЧТ 1000К, в этом случае погрешность вызванная поддержанием температуры, составит ~1,5%, а общая погрешность не превысит  $\pm 4,8\%$ .

## 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. 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. *Балиев 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. 2-е издание.*