

УДК 621.283.4.5

## Экспериментальное исследование метода расчета параметров ИК МФПУ

А. И. Патрашин, И. Д. Бурлаков, А. А. Лопухин, Н. И. Яковлева

*Исследованы зависимости шума и сигнала ИК МФПУ на основе фотодиодов из антимонида индия от температуры фона и времени накопления сигнала. Проведено сравнение полученных экспериментальных данных с расчетом фотоэлектрических параметров ИК МФПУ. Теоретические зависимости рассчитаны с использованием следующих характеристик ИК МФПУ: размеров ФЧЭ и fotocувствительного поля, спектрального диапазона чувствительности, геометрических размеров холодной диафрагмы, темнового тока и квантовой эффективности ФЧЭ. Экспериментальные и расчетные зависимости показали соответствие друг другу при значениях квантового выхода  $\eta = 0,46$ , и суммарного шума мультиплексора и измерительной системы  $0,26$  мВ, что хорошо согласуется с технологическими, конструктивными и схемотехническими характеристиками МФПУ.*

PACS: 42.79. Ag, 72.20. Jv, 07.57. Kp, 61.80. Va

*Ключевые слова:* ИК МФПУ, сигнал, шум, температура фона, время накопления.

### Введение

Необходимым условием разработки и производства фотоприемных устройств является корректное измерение параметров. На практике основными экспериментально измеряемыми величинами являются сигнал и шум фотоприемника, используя которые рассчитываются все основные фотоэлектрические характеристики прибора. Измерение параметров современных инфракрасных матричных фотоприемных устройств (ИК МФПУ) имеет свои особенности. Они связаны со значительными размерами площади чувствительного поля матрицы fotocувствительных элементов (МФЧЭ), с наличием охлаждаемой диафрагмы, входная апертура которой сравнима или меньше характерных размеров fotocувствительного поля, с влиянием шумов охлаждаемой схемы считывания сигнала МФПУ, шума измерительного тракта и т. д.

При наиболее интересной, с практической точки зрения, температуре абсолютно черного тела (АЧТ), близкой к температуре окружающего фона, паразитные засветки от элементов, окружающих

выходную апертуру АЧТ, негативно сказываются на корректности результатов измерений. В этом случае наиболее правильной схемой измерения параметров охлаждаемых ИК МФПУ является схема с увеличенной излучающей площадью АЧТ так, чтобы на МФЧЭ падало только его излучение. Именно с такой схемой измерения проведены экспериментальные измерения сигнала и шума МФПУ формата  $320 \times 256$  фотодиодов с шагом  $30$  мкм на основе антимонида индия (InSb), имеющих спектральную чувствительность в диапазоне длин волн  $3\text{—}5$  мкм, и выполнены теоретические расчеты этих же характеристик методом, опубликованном в [1].

Сравнение зависимостей шума и сигнала ИК МФПУ, измеренных при температурах фона, близких к комнатным, с расчетными зависимостями проводилось с целью проверки корректности указанного метода расчета параметров.

### Теоретический расчет сигнала и шума

Расчет параметров проводился для ИК МФПУ, включающего МФЧЭ на основе фотодиодов из антимонида индия, состыкованный с кремниевым мультиплексором и расположенный в вакуумированном криостатируемом корпусе. Охлаждение обеспечивалось микрокриогенной системой (МКС) интегрального типа, работающей по циклу Стирлинга. Излучение поступало на МФЧЭ через просветленное германиевое окно и круглую апертуру охлаждаемой диафрагмы. Параметры МФПУ для расчетов приведены в табл. 1.

---

Патрашин Александр Иванович, ведущий научный сотрудник.  
Бурлаков Игорь Дмитриевич, и. о. заместителя генерального директора.

Лопухин Алексей Алексеевич, ведущий научный сотрудник.  
Яковлева Наталья Ивановна, заместитель начальника НИЦ.  
ФГУП «НПО "Орион"».

Россия, 111123, Москва, ш. Энтузиастов, 46/2.  
E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 5 апреля 2012 г.

© Патрашин А. И., Бурлаков И. Д., Лопухин А. А., Яковлева Н. И., 2012

Таблица 1

## Параметры МФПУ, использованные для расчетов

№ п/п	Параметр, единица измерения	Обозначение	Значение
1	Формат МФЧЭ, элементов	$M \times N$	320×256
2	Диагональ фоточувствительного поля, мм	$d_1$	12,3
3	Площадь ФЧЭ, мкм <sup>2</sup>	$A_S$	800
4	Высота охлаждаемой диафрагмы над плоскостью МФЧЭ, мм	$l$	24,8
5	Диаметр апертуры охлаждаемой диафрагмы, мм	$d$	12,6
6	Длинноволновая граница спектральной чувствительности, мкм	$\lambda_2$	5,4
7	Коротковолновая граница спектральной чувствительности, мкм	$\lambda_1$	2,9

Облученность от АЧТ с температурой  $T$  определяется формулой Планка [2], которая в спектральном диапазоне  $[\lambda_1; \lambda_2]$  и телесном угле, соответствующем полусфере, записывается в следующем виде:

$$N(T, \lambda_1, \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi c}{\lambda^4 \left[ \exp\left(\frac{ch}{\lambda k_B T}\right) - 1 \right]} d\lambda, \quad (1)$$

где  $k_B = 1,381 \cdot 10^{-23}$  Дж·К<sup>-1</sup> — постоянная Больцмана;  
 $c = 2,998 \cdot 10^{10}$  см·с<sup>-1</sup> — скорость света в вакууме;  
 $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с — постоянная Планка.

Для фотонных детекторов значение облученности  $N$  обычно выражают в размерности фотон·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>. Тогда при  $T = 300$  К и выбранном спектральном диапазоне (см. табл. 1) получаем из формулы (1) значение  $N = 2,34 \cdot 10^{16}$  фотонов·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>.

Излучение от АЧТ попадает на МФЧЭ сквозь круглую апертуру охлаждаемой диафрагмы диаметра  $d$ , установленную на расстоянии  $l$  от плоскости МФЧЭ и имеющую коэффициент пропускания  $K_{пр}$ , определяемый следующим выражением [3]:

$$K_{пр}(x, y, l) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{d/2} \frac{\rho^2 d\rho d\varphi}{\left[ l^2 + (\rho \cdot \cos \varphi - x)^2 + (\rho \cdot \sin \varphi - y)^2 \right]^2}, \quad (2)$$

где  $\varphi$  — угол интегрирования в полярной системе координат в плоскости диафрагмы;

$\rho$  — радиус интегрирования в полярной системе координат в плоскости диафрагмы;

$x, y$  — координаты точки в плоскости МФЧЭ.

Для заданных параметров МФПУ в центральной точке МФЧЭ  $K_{пр} = 0,061$ .

Соответственно, эффективная облученность МФЧЭ вычислялась по формуле

$$W_{bgn}(x, y, l) = K_{пр}(x, y, l)N(T, \lambda_1, \lambda_2), \quad (3)$$

и в нашем случае эффективная облученность центра МФЧЭ равна  $1,42 \cdot 10^{15}$  фотонов·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>.

Однородность облученности по площади МФЧЭ определялась по формуле

$$\Delta W_{bgn} = \frac{W_{bgn}(0, 0, l) - W_{bgn}\left(\frac{a}{2}, \frac{b}{2}, l\right)}{2W_{bgn}(0, 0, l)} \cdot 100\% \quad (4)$$

и оказалась равной 5 %.

Фототок, генерируемый в ФЧЭ, рассчитывался из выражения [1]

$$I_{\phi} = K_{пр}(x, y, l)N(T, \lambda_1, \lambda_2)\eta A_S q, \quad (5)$$

где  $\eta$  — средняя квантовая эффективность ФЧЭ в диапазоне спектральной чувствительности от  $\lambda_1$  до  $\lambda_2$ , а  $q$  — заряд электрона.

В каждой ячейке МФПУ темновой ток и фототок ФЧЭ интегрируются на емкости накопления  $C_H$ . За время накопления  $\tau_0$  в каждой ячейке мультиплексора считываемый сигнал определяется следующим количеством носителей заряда:

$$S(x, y, l) = \left( K_{дд}(x, y, l)N(T, \lambda_1, \lambda_2)\eta A_S + \frac{I_d}{q} \right) \tau_0, \quad (6)$$

где  $I_d$  — величина темнового тока, которая для ФЧЭ на основе фотодиодов из антимионидов индия имеет величину  $\sim 10^{-11}$  А.

При расчете шума учитывалась независимость шумов, обусловленных темновым и фототоком ФЧЭ, шумов мультиплексора и измерительной установки. Измеряемый шум каждой ячейки МФЧЭ для времени накопления  $\tau_0$  составляет в электронных

$$N(x, y, l) = \sqrt{\left[ K_{пр}(x, y, l)\eta A_S N(T, \lambda_1, \lambda_2) + \frac{I_d}{q} \right] \tau_0}. \quad (7)$$

Напряжения сигнала и шума ячейки МФЧЭ определялись из следующих выражений:

$$U_{C\_яч}(x, y, l) = \frac{qS(x, y, l)}{C_H}, \quad (8)$$

$$U_{ш\_яч}(x, y, l) = \frac{qN(x, y, l)}{C_H}. \quad (9)$$

Суммарный сигнал (с постоянной составляющей  $U_{пост}$ ) и суммарный шум (с шумом мультиплексора  $U_{мульти}$  и измерительной схемы  $U_{изм\ сх}$ ) рассчитывались из следующих выражений:

$$U_C = \frac{qS}{C_H} + U_{пост}, \quad (10)$$

$$U_{ш} = \sqrt{\left(\frac{qN}{C_H}\right)^2 + U_{мульти}^2 + U_{изм\ сч}^2} \quad (11)$$

Полученные выражения (6)—(11) позволяют для известных  $K_{пр}$ ,  $A_s$ ,  $\tau_0$  и измеренных величин  $\eta$ ,  $I_d$ ,  $U_{пост}$ ,  $U_{мульти}$  и  $U_{изм\ сч}$  рассчитать и построить графики зависимостей  $U_C(\tau_0; T)$  и  $U_{ш}(\tau_0; T)$  и сравнить их с экспериментальными результатами.

### Экспериментальные результаты

Основным условием для измерений являлись размеры излучающей поверхности АЧТ, обеспечивающие засветку МФЧЭ только от него. Оно выполняется, если минимальный размер  $D$  излучающей поверхности АЧТ удовлетворяет следующему соотношению:

$$D \geq \frac{Ld + d_1(L - l)}{l}, \quad (12)$$

или расстояние  $L$  от МФЧЭ до АЧТ удовлетворяет следующему условию:

$$L \leq l \frac{D + d_1}{d + d_1}, \quad (13)$$

где  $L$  — расстояние от АЧТ до МФЧЭ.

В используемой установке АЧТ имеет размер излучающей поверхности 15×5 см, а расстояние от МФЧЭ до АЧТ не превышало 14 см, что соответствует условиям (12) и (13). Таким образом, МФЧЭ "видит" сквозь диафрагму только излучающую поверхность АЧТ [4]. Температура фона соответствовала температуре АЧТ, а время накопления обеспечивалось заданием количества тактовых импульсов МФПУ. При измерениях температура АЧТ выбиралась в диапазоне от 20 до 30 °С с интервалом в 1 °С. Время накопления задавалось величинами 0,0026; 0,198; 0,393; 0,588 и 0,788 мс.

Измеряемый сигнал представлял собой выходное напряжение МФПУ, определяемое фототоком, темновым током ФЧЭ и постоянной составляющей мультиплексора. Ее величина определялась по пересечению графика сигнала с осью ординат при  $\tau_0 = 0$  и оказалась равна 2,06 В.

Измеренный шум включал шум заряда, накопленного от фототока и темнового тока ФЧЭ, шум мультиплексора и шум измерительной установки. Как и в случае сигнала, пересечение графика шума с осью ординат при  $\tau_0 = 0$  дало возможность определить суммарный шум мультиплексора и измерительной установки, который составил 0,26 мВ.

На рис. 1 и 2 представлены экспериментальные результаты измерений и теоретические результаты

расчетов зависимостей среднего значения сигнала ИК МФПУ от времени накопления (см. рис. 1) и от температуры фона (см. рис. 2). Как и следовало ожидать, это линейные зависимости, наклон которых определяется величиной фоновой облученности, квантовой эффективности и темновым током.

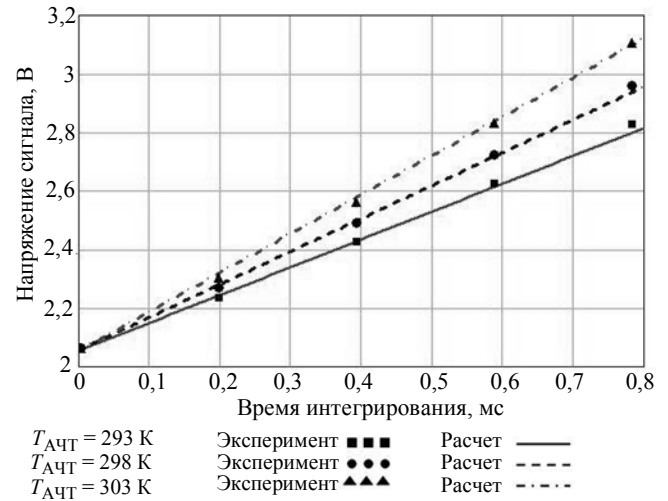


Рис. 1. Зависимость сигнала МФПУ от времени интегрирования для трех температур АЧТ

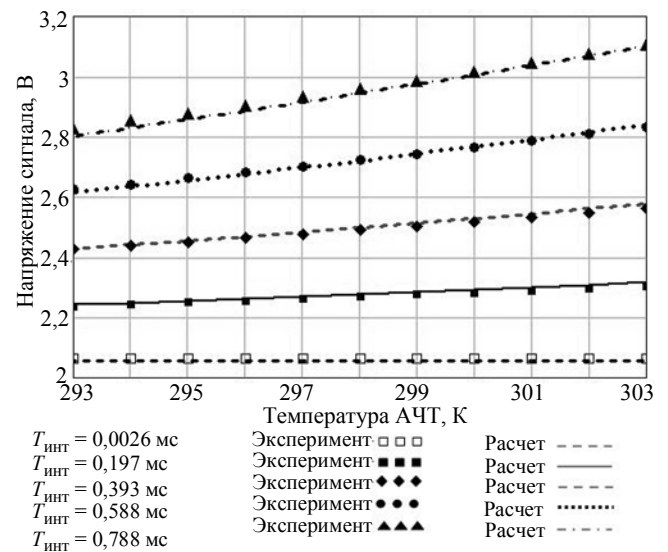


Рис. 2. Зависимость сигнала МФПУ от температуры АЧТ для пяти значений времени интегрирования

На рис. 3 и 4 представлены экспериментальные результаты измерений и теоретические результаты расчетов зависимостей среднего значения шума ИК МФПУ от времени накопления (см. рис. 3) и от температуры фона (см. рис. 4).

В теоретических результатах учтено, что эффективная величина накопительной емкости в ячейке мультиплексора имеет слабую зависимость от величины накопленного заряда. Так, при  $S$ , обеспечивающем в ячейке напряжение 2,6—3,2 В, реализуется значение  $C_{н1} \approx 0,88$  пФ, а при  $S$ , соответствующем 0,2—0,35 мВ, имеем  $C_{н2} \approx 1,07$  пФ.

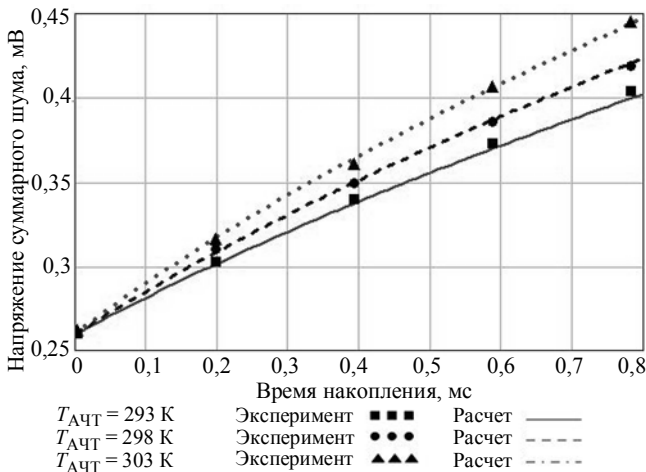


Рис. 3. Зависимость суммарного шума от времени накопления для трех температур АЧТ

Теоретические зависимости полностью согласуются с экспериментальными при квантовой эффективности  $\eta = 0,46$  и суммарном шуме мультиплексора и измерительной установки  $U_{\text{сум шум}} = 0,26$  мВ.

### Заключение

Проведено сравнение экспериментально измеренных зависимостей среднего значения шума и сигнала МФПУ на основе антимонида индия от температуры фона для разных времен накопления, и от времени накопления для разных температур фона, с зависимостями, рассчитанными по методу [1].

Расчетные зависимости шума и сигнала ИК МФПУ достаточно точно совпадают с экспериментальными данными. Метод позволяет также

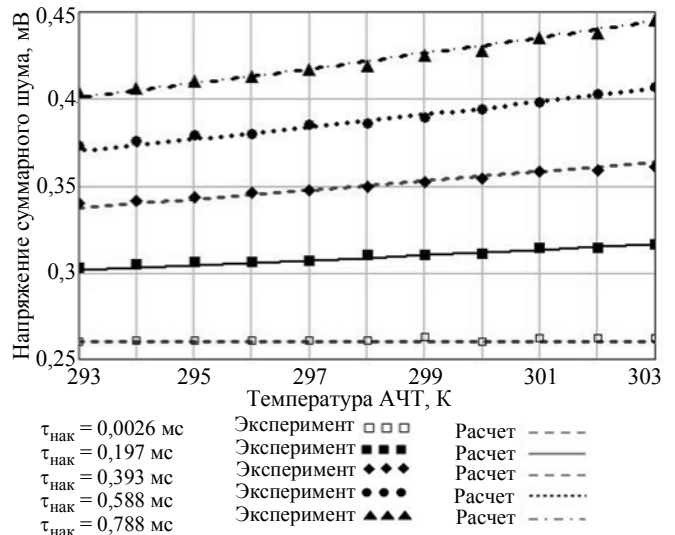


Рис. 4. Зависимость суммарного шума от температуры АЧТ для пяти значений времени накопления

корректно рассчитывать фотоэлектрические параметры (пороговая облученность, пороговая мощность, пороговая разность температур, обнаружительная способность, динамический диапазон, токовая и вольтовая чувствительность и их зависимости от различных параметров) МФПУ на основе фотодиодов, работающих в режиме накопления.

### Литература

1. Патрашин А. И. // Прикладная физика. 2010. № 2. С. 103.
2. Курбатов Л. Н. Оптоэлектроника видимого и инфракрасного диапазонов спектра. — Москва: МФТИ, 1999.
3. Патрашин А. И. // Прикладная физика. 2010. № 3. С. 123.
4. Patrashin A. I., Ivanov G. A. // Proceedings of SPIE. 1998. V. 3379. P. 555.

## Experimental studies of the computing method of IR FPA parameters

A. I. Patrashin, I. D. Burlakov, A. A. Lopukhin, N. I. Yakovleva  
Orion R&P Association  
46/2 Enthusiasts highway, Moscow, 111123, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

*Investigated are dependences of the IR FPA noise and signal from temperature and storage time. Experimental data reading comparison has been made with the calculated parameters of the IR FPA on the base of the InSb photodiodes.*

PACS: 42.79.Ag, 72.20.Jv, 07.57.Kp, 61.80.Ba

Keywords: IR FPA, signal, noise, background temperature, storage time.

Bibliography — 4 references.

Received April 5, 2012