УДК.621.383.4/5

Аналитическая модель МФПУ для коротковолнового диапазона ИК-спектра 0,9—1,7 мкм

А. И. Патрашин, Д. Л. Балиев, К. О. Болтарь, И. Д. Бурлаков, П. С. Лазарев, В. В. Полунеев, Н. И. Яковлева

Построена аналитическая модель коротковолновых инфракрасных матричных фотоприёмных устройств (МФПУ) для работы в диапазоне спектра 0,9—1,7 мкм. С учетом получения высоких выходных характеристик рассчитаны возможные диапазоны изменения темновых токов фоточувствительных элементов (ФЧЭ), допустимый диапазон шумов мультиплексора, сигналы и шумы ФЧЭ, все фотоэлектрические параметры МФПУ. Полученные теоретические значения и зависимости сравниваются с экспериментальными. Получено хорошее совпадение данных, указывающее, с одной стороны, на справедливость модели, а с другой стороны, на корректность проводимой разработки.

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

Ключевые слова: МФПУ, InGaAs, сигнал, шум, температура фона, время накопления, выходные параметры.

Введение

Актуальность построения аналитической модели матричных фотоприёмных устройств (МФПУ) на основе InGaAs для коротковолнового диапазона ИК-спектра (0,9–1,7 мкм) обусловлена проводимыми разработками подобных МФПУ за рубежом [1–5] и в России, в частности, в ОАО «НПО «Орион». Разработка данной модели проводилась с помощью общей аналитической модели МФПУ [6, 7]. Использование полученной аналитической модели позволило рассчитать все выходные параметры и их зависимости от конструктивных и эксплуатационных параметров МФПУ для коротковолнового диапазона спектра 0,9–1,7 мкм с матрицей фоточувствительных элементов (МФЧЭ) на основе InGaAs. Указанные зависимости позволяют определить допустимые диапазоны изменения таких параметров, как темновой ток и квантовая эффективность ФЧЭ, а также шум мультиплексора. Всё это позволяет проводить осмысленную разработку прибора вместе с наладкой контроля параметров отдельных его компонентов на различных этапах технологического процесса.

Для оценки корректности полученной модели было проведено сравнение результатов использования аналитической модели с экспериментальными данными, полученными на изготовленных опытных образцах МФПУ. Экспериментальные результаты показали хорошее совпадение с теоретическими расчётами.

Эти результаты позволяют считать, что все физические предположения, сделанные при разработке модели корректны, как и сама модель.

Конструкция МФПУ

Разрабатываемое МФПУ [8] включает:

- МФЧЭ на основе двойной гетероструктуры InP-InGaAs-InP;
- кремниевый мультиплексор для считывания сигналов с ФЧЭ;
- сапфировый растр;
- термоэлектрический охладитель (ТЭО);
- стандартный корпус с оптическим окном.

МФЧЭ, разработанная в ОАО «НПО «Орион», имеет планарную структуру [9] и состыкована с

Патрашин Александр Иванович, вед. научный сотрудник[1].
Балиев Дмитрий Леонидович, инженер[1].
Болтарь Константин Олегович, начальник НТК[1], профессор[2].
Бурлаков Игорь Дмитриевич, зам. генерального директора[1], профессор[3].
Лазарев Павел Сергеевич, инженер 2 кат[1].
Полунеев Владимир Васильевич, главный специалист[1].
Яковлева Наталья Ивановна, зам. начальника НИЦ[1].
[1]ОАО «НПО «Орион»».
Россия, 111396, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2.
Тел.: (499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru
[2]Московский физико-технический институт.
Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.
[3] МИРЭА (Технический университет).
Россия, 119454, Москва, пр-т Вернадского, 78.

Статья поступила в редакцию 28 июня 2014 г.

© Патрашин А. И., Балиев Д. Л., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Лазарев П. С., Полунеев В. В., Яковлева Н. И., 2014

мультиплексором, также разработанным в ОАО «НПО «Орион» [10]. Растр служит основанием и платой для разварки БИС-мультиплексора, скоммутированного с МФЧЭ. ТЭО предназначен для стабилизации рабочей температуры сборки МФЧЭ-мультиплексор. МФЧЭ, БИС, растр и ТЭО установлены внутри вакуумированного корпуса. Входное окно корпуса и подложка структуры InP-InGaAs-InP просветлены диэлектрическими покрытиями для снижения потерь регистрируемого излучения.

Значения коэффициента черноты материала входного окна (стекло, сапфир) при 300 К и коэффициента черноты внутренней полости корпуса (никелевое покрытие) при 300 К приведены в [11].

В табл. 1 указаны конструктивные параметры МФПУ формата 320×256 элементов на основе InGaAs.

черноты 0,96, с диафрагмой диаметром 2,4 мм и расстоянием от МФЧЭ 9,8 см.

Второй источник – окружающая среда с температурой 300 К (фоновое излучение в апертуре каждого ФЧЭ).

Третий источник – входное окно МФПУ с температурой окружающей среды (источник излучения в апертуре каждого ФЧЭ).

Четвёртый источник – поверхность внутренней полости корпуса с температурой окружающей среды (источник излучения в апертуре каждого ФЧЭ).

Пятый источник – окружающая среда с температурой 300 К (фоновое излучение вне апертуры ФЧЭ, т. е. не попадающее прямо на МФЧЭ, а отражённое от внутренней поверхности корпуса).

Шестой источник – темновой ток ФЧЭ.

Уровень паразитной засветки плоскости ФЧЭ этим фоновым излучением всегда ниже, чем уро-

Таблица 1

Параметр, единица измерения	Величина
Шаг ФЧЭ; мкм	30×30
Площадь ФЧЭ A_s; см^2	$9\cdot10^{-6}$
Размеры фоточувствительного поля МФЧЭ; см	0,96×0,72
Радиус окна МФПУ; см	0,8
Расстояние окно – МФЧЭ; см	0,67
Коэффициент черноты внутренней поверхности корпуса	0,11
Коэффициент пропускания материала входного окна	0,85
Коэффициент черноты материала входного окна	0,94
Коэффициент пропускания входного окна (центр МФЧЭ)	0,59
Спектральный диапазон чувствительности; λ_1; λ_2; мкм	0,9–1,7
Внешний квантовый выход ФЧЭ; η	0,2–0,9
Величина емкости накопления в ячейке; $C_н$; Ф	$1\cdot10^{-14}$
Шум мультиплексора; N_M; электронов	$10–10^3$

Коэффициент пропускания входного окна (центр МФЧЭ), являющегося одновременно и диафрагмой, рассчитывался с использованием выражения для коэффициента пропускания диафрагмы [12].

Эксплуатационные параметры МФПУ

Эксплуатационными параметрами мы называем параметры, которые могут изменяться в процессе работы МФПУ. В первую очередь, к ним относится интегральная облучённость МФЧЭ. Эта облучённость включает источники полезного и паразитных сигналов.

Для проведения расчетов полезной и паразитных облучённостей и сигналов необходимо определить все источники, дающие вклад в интегральный сигнал МФПУ.

Первый источник – абсолютно чёрное тело (АЧТ) с температурой 505 К и коэффициентом

вень паразитной засветки фоновым излучением от второго источника. Это обусловлено тем, что этот вид излучения испытывает не менее одного отражения, прежде чем попадает на ФЧЭ.

В результате расчетов установлено, что суммарный уровень облучённости, создаваемый источниками от второго до пятого, составляет, примерно, 7 % от уровня АЧТ, составляющего $1{,}668\cdot10^{10}$ фот·см$^{-2}$·с$^{-1}$. Уровень облучённости – эквивалентный темновому току ФЧЭ — зависит от величины тока. При темновом токе $1\cdot10^{-14}$ А он, например, составляет $8{,}68\cdot10^{10}$ фот·см$^{-2}$·с$^{-1}$, что ненамного ниже уровня АЧТ. Таким образом, основной вклад в интегральный сигнал ФЧЭ вносят АЧТ и темновой ток, но остальные источники также были учтены в расчётах.

В табл. 2 указаны эксплуатационные параметры МФПУ формата 320×256 элементов с МФЧЭ из фотодиодов на основе InGaAs.

Таблица 2

Параметр, единица измерения	Величина
Температура фонового излучения; К	213–333
Степень серости фонового излучения	0,96
Температура входного окна МФПУ; К	213–333
Температура корпуса; К	213–333
Температура МФЧЭ; К	253
Интегральная облученность МФЧЭ; фотон·см$^{-2}$·с$^{-1}$	$1{,}8\cdot10^{10}$
Сигнальная облученность МФЧЭ; фотон·см$^{-2}$·с$^{-1}$	$1{,}67\cdot10^{10}$
Время накопления МФПУ при 300 К; мс	1–166
Темновой ток ФЧЭ; А	10^{-15}–10^{-13}
Напряжение зарядки ёмкости накопления; В	2,5
Коэффициент разряда ёмкости накопления	0,5

Температура МФЧЭ стабилизировалась с помощью ТЭО с точностью до 0,1 К. Время накопления задавалось аппаратным методом.

В табл. 1 и 2 указаны два параметра, значения которых могут лежать в достаточно широких диапазонах и пока неизвестны. Это темновой ток ФЧЭ и шум БИС-мультиплексора. Они будут определены ниже.

Определение величины темнового тока ФЧЭ и шума мультиплексора

Для определения величины темнового тока ФЧЭ и шума мультиплексора воспользуемся тем, что величина паразитных компонент оптического сигнала много меньше сигнала АЧТ и сигнала, обусловленного темновым током. При выключенном сигнале АЧТ в интегральном сигнале остаётся лишь одна значимая компонента – темновой ток, а в интегральном шуме возникает независимая от времени накопления компонента – шум мультиплексора. Тогда измерение зависимости от времени накопления отношения суммарного сигнала оставшихся источников к шуму, обусловленному ими же и мультиплексором, и сравнение её с теоретической зависимостью этого же отношения даст возможность определить величину темнового тока ФЧЭ и шума мультиплексора.

Проведено измерение вышеуказанного отношения при разных временах накопления. Экспериментальные значения указаны в табл. 3.

Зависимость измеренного сигнала от времени накопления линейна. Зависимость измеренного шума от корня из времени накопления также линейна. Это означает, что коэффициент передачи мультиплексора (количество накопленных электронов – выходной сигнал МФПУ) является постоянным, что и требуется для корректности измерения.

Графики теоретической и экспериментальной зависимости от времени отношений накопления суммарного сигнала паразитных источников и темнового тока к интегральному шуму представлены на рис. 1 для разных значений темнового тока ФЧЭ при постоянном значении шума мультиплексора и для разных значений шума мультиплексора при постоянном темновом токе.

На рис. 1, *а* представлена указанная зависимость для разных величин темнового тока ФЧЭ при шуме мультиплексора N_m = 140 электронов. На рисунке 1, *б* представлена эта же зависимость для разных величин шума мультиплексора при темновом токе ФЧЭ $I_d = 1{,}5\cdot10^{-14}$ А.

Таблица 3

Шум	Сигнал	$T_{накопл}$, мс	Сигнал – C_0	Отношение сигнал/шум
9,47	2532	3,92	30	2,62
9,72	2551	7,504	50	5,14
9,77	2578	11,088	76	7,78
10	2598	14,672	96	9,6
10,16	2620	18,256	118	11,61
10,3	2641	21,84	139	13,5

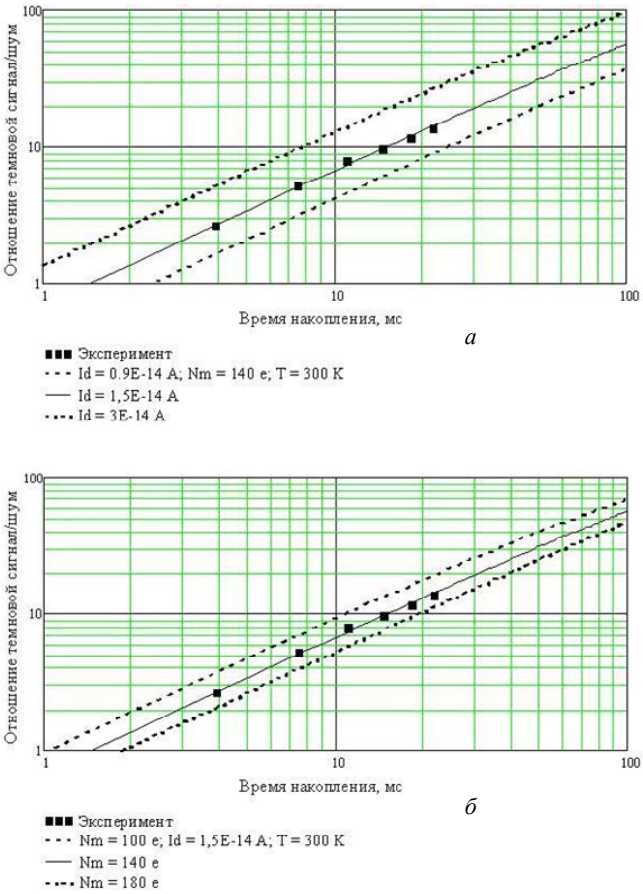

Рис. 1. Теоретические и экспериментальные зависимости от времени отношений накопления суммарного сигнала паразитных источников и темнового тока к интегральному шуму:
а – для разных значений темнового тока; *б* – для разных значений шума мультиплексора

Как на рис. 1, *а*, так и на рис. 1, *б* видно соответствие экспериментальных и теоретических зависимостей при величине темнового тока ФЧЭ I_d = 1,5·10^{-14} А и шума мультиплексора N_m = 140 электронов. Эти величины указанных параметров и будут использованы при определении выходных параметров МФПУ.

Выходные параметры МФПУ

Выходными параметрами называются параметры МФПУ, определяющие его эксплуатационные качества. В данной работе определяются следующие выходные пороговые параметры исследуемого МФПУ: пороговая облучённость, пороговая мощность, удельная обнаружительная способность, пороговая разность температур и динамический диапазон. Определяются также и интегральные выходные параметры МФПУ: токовая, вольтовая и температурная чувствительности.

Экспериментальное значение удельной обнаружительной способности МФПУ, равное 1,24·10^{13} см·Гц$^{1/2}$·Вт$^{-1}$, было получено при 300 К, времени накопления 166 мс, шуме мультиплексора 140 электронов и пока неизвестной величине квантовой эффективности в диапазоне от 0,1 до 0,9.

Расчет выходных параметров проведен с использованием известных и определённых в соответствии с аналитической моделью [6, 7] конструктивных и эксплуатационных параметров МФПУ. Расчёт выполнен при тех же значениях температуры окружающей среды, темнового тока, времени накопления, шума мультиплексора и при различных величинах внешнего квантового выхода до совпадения теоретического и экспериментального значений удельной обнаружительной способности ФЧЭ. В результате определена величина внешнего квантового выхода ФЧЭ η = 0,38. Расчет выходных параметров МФПУ при этих же данных представлен в табл. 4.

Таблица 4

Параметр, единица измерения	Величина
Полезный сигнал в центре МФЧЭ; электроны	1,744·10^{4}
Интегральный шум в центре МФЧЭ; электроны	300
Отношение сигнал/шум в центре МФЧЭ	58,1
Пороговая облученность в центре МФЧЭ; фотон·см$^{-2}$·с$^{-1}$	4,45·10^{8}
Пороговая мощность в центре МФЧЭ; Вт	2,49·10^{-16}
Удельная обнаружительная способность ФЧЭ в центре; см·Гц$^{1/2}$·Вт$^{-1}$	1,24·10^{13}
Пороговая разность температур в центре МФЧЭ; мК	231
Динамический диапазон в центре МФЧЭ; дБ	60
Токовая чувствительность; А·Вт$^{-1}$	0,49
Вольтовая чувствительность в центре МФЧЭ; В·Вт$^{-1}$	8,1·10^{12}
Температурная чувствительность в центре МФЧЭ; мВ·град$^{-1}$	5,36

Далее рассмотрены теоретические зависимости удельной обнаружительной способности от различных параметров, рассчитанные в соответствии с аналитической моделью коротковолнового ИК МФПУ. Они приведены на рис. 2–5.

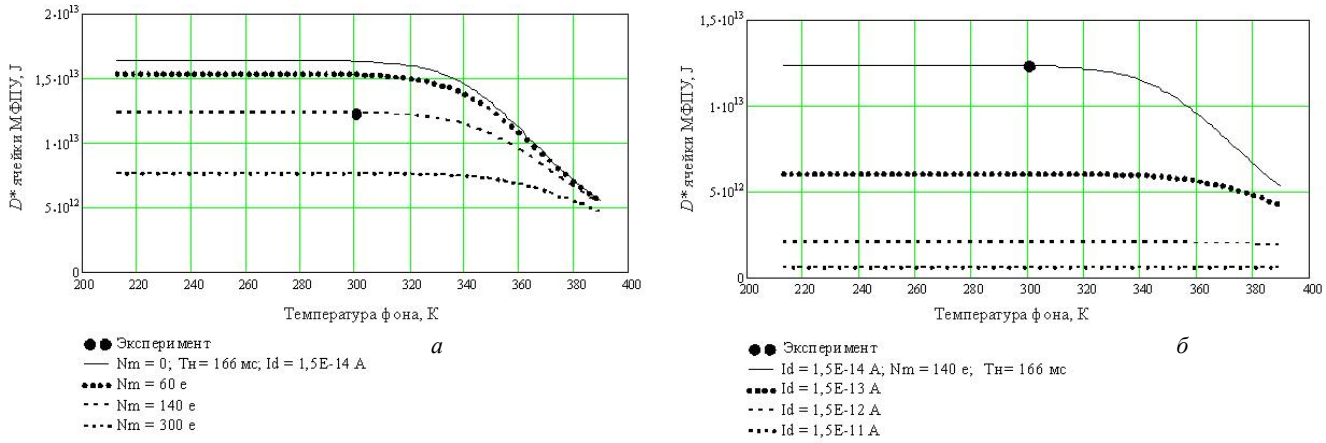

Рис. 2. Значение обнаружительной способности ячейки МФПУ в зависимости от температуры фона при различных шумах мультиплексора и темновых токах

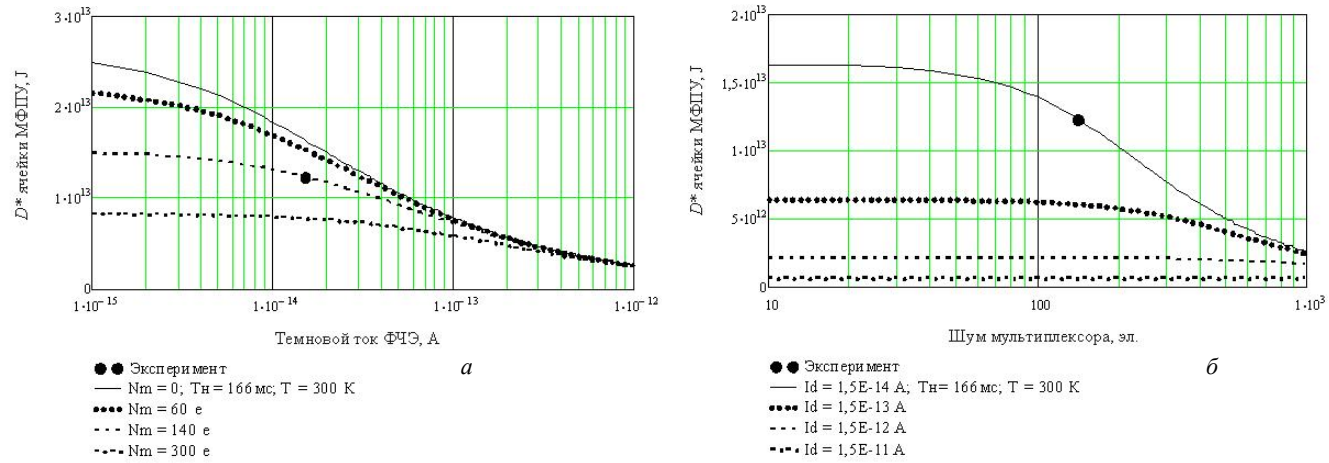

Рис. 3. Значение обнаружительной способности ячейки МФПУ в зависимости:
а – от темнового тока при различных шумах мультиплексора; *б* – от шума мультиплексора при различных значениях темнового тока

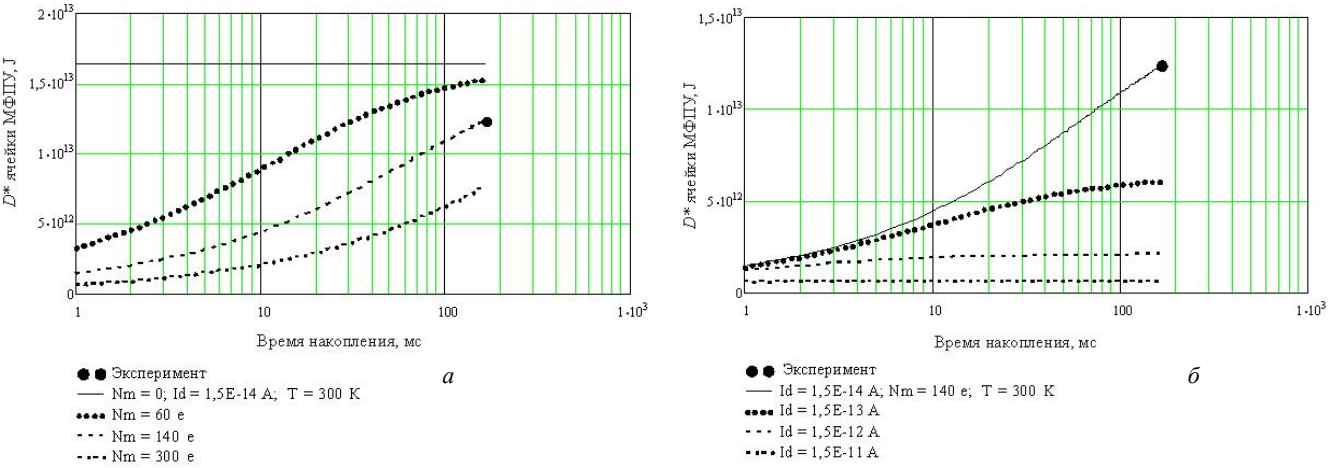

Рис. 4. Значение обнаружительной способности ячейки МФПУ в зависимости от времени накопления:
а – при различных шумах мультиплексора; *б* – при различных темновых токах

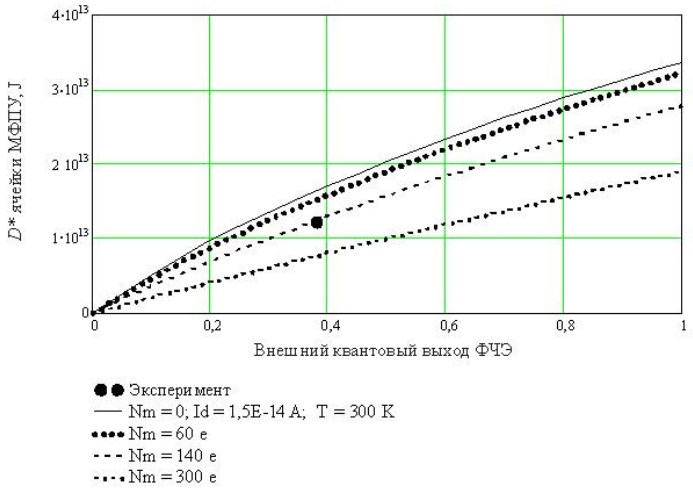

Рис. 5. Значение обнаружительной способности ячейки МФПУ в зависимости от внешнего квантового выхода

На всех этих графиках показано и экспериментальное значение удельной обнаружительной способности ФЧЭ. Оно совпадает со всеми теоретическими кривыми при темновом токе ФЧЭ I_d = = $1{,}5\cdot10^{-14}$ А, шуме мультиплексора N_m = 140 электронов, времени накопления $\tau_{нак}$ = 166 мс и внешнем квантовом выходе ФЧЭ η = 0,38. Невысокое значение внешнего квантового выхода ФЧЭ обусловлено, по-видимому, недостаточно хорошим просветлением входного окна и подложки МФЧЭ или низким значением сквозного коэффициента передачи мультиплексора, что будет специально исследовано в дальнейшем.

Расчеты показывают, что темновые токи ФЧЭ, превышающие 10^{-13} А, вообще нежелательны в коротковолновых ИК МФЧЭ, т.к. в этом случае время накопления будет слишком коротким, полезный выходной сигнал слишком мал, выходные параметры низкие.

Заключение

Результаты исследований показали, что аналитическая модель МФПУ на основе InGaAs для коротковолнового диапазона ИК-спектра 0,9–1,7 мкм хорошо соответствует экспериментальным данным, что указывает как на её справедливость, так и на достаточно хорошее качество изготовленного образца МФПУ.

Выяснено, что с помощью аналитической модели МФПУ на основе InGaAs для коротковолнового диапазона спектра 0,9–1,7 мкм возможна оптимизация МФПУ по конструктивным и эксплуатационным параметрам.

Кроме того, анализ результатов показал, что необходимо провести дополнительные исследования зависимости коэффициента передачи от времени накопления и свойств просветляющих покрытий на входном окне и тыльной поверхности МФЧЭ.

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации НШ-2787.2014.9

Литература

1. *Бурлаков И. Д., Гринченко Л. Я., Дирочка А. И. и др.* // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 131.
2. *Fraenkel R. et al.* // Proc. SPIE. 2012. V. 8353. P. 835305-1.
3. *De Borniol Eric et al.* // Proc. SPIE. 2012. V. 8353. P. 835307-1.
4. *Rouvié A. et al.* // Proc. SPIE. 2012. V. 8353. P. 835308-1.
5. *Hood Andrew D. et al.* // Proc. SPIE. 2012. V. 8353. P. 83530A-1.
6. *Патрашин А. И., Бурлаков И. Д., Корнеева М. Д. и др.* // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 1. С. 50.
7. *Патрашин А. И., Бурлаков И. Д.* // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 64.
8. *Болтарь К. О., Чинарёва И. В., Лопухин А. А. и др.* // Прикладная физика. 2013. № 5. С. 10.
9. *Андреев Д. С., Болтарь К. О., Власов П. В. и др.* // Прикладная физика. 2014. № 4. С. 47.
10. *Зайцев А. А., Хромов С. С., Болтарь К. О. и др.* // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 97.
11. Sources of Radiation. The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook. V. 1. – SPIE Optical Engineering Press, 1978.
12. *Патрашин А. И.* // Прикладная физика. 2010. № 3. С. 123.

Analytical model of the 0.9—1.7 μm FPA

A. I. Patrashin, D. L. Baliev, K. O. Boltar, I. D. Burlakov,
P. S. Lazarev, V. V. Poluneev, N. I. Yakovleva

Received June 28, 2014

Analytical model of the 0.9—1.7 μm FPA has been created. Theoretical magnitudes and relationships correlate well with experimental data.

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

Keywords: FPA, InGaAs, signal, noise, background temperature, accumulation time, output parameters.

References

1. I. D. Burlakov, L. Ya. Grinchenko, A. I. Dirochaka, et al., Uspekhi Prikladnoi Fiziki **2,** 131 (2014).
2. R. Fraenkel et al., Proc. SPIE **8353,** 835305-1 (2012).
3. Eric de Borniol et al., Proc. SPIE **8353,** 835307-1 (2012).
4. A. Rouvié et al., Proc. SPIE **8353,** 835308-1 (2012).
5. Andrew D. Hood et al., Proc. SPIE **8353,** 83530A-1 (2012).
6. A. I. Patrashin, I. D. Burlakov, M. D. Korneeva, et al., Uspekhi Prikladnoi Fiziki **2,** 50 (2014).
7. A. I. Patrashin and I. D. Burlakov, Prikladnaya Fizika, No. 6, 64 (2013).
8. R. O. Boltar, I. V. Chinareva, A. A. Lopukhin, et al., Prikladnaya Fizika, No. 5, 10 (2013).
9. D. S. Andreev, K. O. Boltar, P. V. Vlasov, et al., Prikladnaya Fizika, No. 4, 47 (2014).
10. A. A. Zaitsev, S. S. Khromov, K. O. Boltar, et al., Prikladnaya Fizika, No. 2, 97 (2011).
11. *Sources of Radiation. The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook. Vol. 1* (SPIE Optical Engineering Press, 1978).
12. A. I. Patrashin, Prikladnaya Fizika, No. 3, 123 (2010).