

УДК 621.283.3/4

Универсальный автоматизированный стенд измерения основных параметров многорядных матричных ФПУ

К. В. Козлов, Я. С. Бычковский, И. С. Кондюшин, А. В. Матвеев,
В. Н. Соляков, Д. А. Пожидаев, Д.Л. Балиев

В работе представлена универсальная автоматизированная установка для проведения комплексного исследования параметров матричных фотоприемных устройств (ФПУ) как «смотрящего» типа, так и работающих в режиме временной задержки и накопления (ВЗН). В качестве тестового сигнала используется излучение абсолютно черного тела (АЧТ), равномерно засвечивающего матрицу фоточувствительных элементов (ФЧЭ). Приведены результаты анализа основных конструктивных и программных особенностей, позволяющих достичь необходимой точности измерения входных сигналов, а также расширить спектр решаемых задач.

PACS: 42.79.Sz, 85.30.— Z

Ключевые слова: ВЗН, ФПУ, ФЧЭ, БИС считывания.

Введение

При разработке и изготовлении многоэлементных ИК-фотоприемников, возникает необходимость промежуточного контроля фотоэлектрических параметров ФПУ [1], которые определяют временные и пространственные характеристики конечных устройств. В числе таких параметров: пороговая мощность излучения $\Phi_{\text{п}}$, удельная обнаружительная способность D^* , вольтовая чувствительность освещенности S_v .

Ряд фотоприемных устройств (ФПУ) предназначен для приема точечных источников оптических сигналов и имеет особенности, не позволяющие осуществить контроль их параметров классическим способом. Для их контроля необходимо создание специализированного измерительного стенда, в состав которого должна входить сканирующая система, источник точечного опти-

ческого сигнала, система обработки данных и т. д. При этом, расчет фотоэлектрических параметров должен быть осуществлен непосредственно в режиме сканирования при известных характеристиках падающего на каждый чувствительный элемент излучения. Данный способ измерений сопряжен со значительными трудностями, в число которых входят задачи синхронизации, формирования точечного оптического сигнала, расчета мощности оптического излучения в пятне и т. д.

В представленной работе предлагается метод и аппаратура измерения параметров ФПУ в режиме без сканирования, что существенно снижает сложность используемой измерительной системы. Суть метода заключается в исследовании реакции ФПУ на модулированный оптический сигнал, формируемый абсолютно черным телом (АЧТ) и равномерно засвечивающий матрицу фоточувствительных элементов (ФЧЭ).

Для получения корректных результатов, необходимо учитывать ряд важных аспектов, в т. ч. таких как топология матрицы чувствительных элементов ФПУ, структура большой интегральной схемы (БИС) считывания, значение внешней (полезной) фоновой облученности, величина внутренней (паразитной) фоновой облученности, дефектность некоторых ФЧЭ, характер шумов ФПУ и т. д. Таким образом, к автоматической измерительной системе [2–6] предъявляются строгие требования по стабильности параметров, величине шумов, характеру считывания данных и т. д.

В данной работе представлено комплексное техническое решение, позволившее производить исследования целого ряда ФПУ как «сканирующе-

Козлов Кирилл Владимирович, инженер¹ магистрант².

Бычковский Ярослав Сергеевич, вед. инженер¹.

Кондюшин Илья Сергеевич, инженер¹.

Матвеев Алексей Викторович, инженер¹, аспирант².

Соляков Владимир Николаевич, главный научный сотрудник¹, профессор².

Пожидаев Денис Андреевич, инженер¹.

Балиев Дмитрий Леонидович, инженер¹, магистрант².

¹ОАО «НПО «Орион».

Россия, 111123, Москва, ш. Энтузиастов, 46/2.

Тел.: (8495) 373–94–00

E-mail: orion@orion-ir.ru

²Московский физико-технический институт.

Россия, 141700, г. Долгопрудный МО,

Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 3 марта 2014 г.

© Козлов К.В., Бычковский Я.С., Кондюшин И.С., Матвеев А.В., Соляков В.Н., Пожидаев Д.А., Балиев Д.Л., 2014



Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки

го» [7–8], так и «смотрящего» типа на одной универсальной установке. В описываемой системе отсутствует оптико-механическое сканирование, а в роли источника тестового оптического сигнала выступает АЧТ, равномерно засвечивающее матрицу ФЧЭ. При исследовании сканирующих ФПУ процесс сканирования заменяется математическим расчетом коэффициентов, учитываемых при вычислении конечных значений сигналов. Таким образом, подготовка к исследованию очередного ФПУ требует лишь помещения нового образца внутрь криостата и настройки универсального программного обеспечения.

Описание структуры измерительного стенда

Экспериментальную установку (рис. 1 и 2) можно функционально разделить на 4 основных подсистемы, а именно, формирования оптического излучения, формирования сигналов управления, обработки сигналов, охлаждения и поддержания заданной температуры.

Первая подсистема состоит из «точечного» АЧТ с регулируемым диаметром диафрагмы, зачерненной металлической шторки с датчиком температуры и модулятора оптического излучения с модулем управления. Изменяя температуру АЧТ и скорость вращения диска модулятора можно осуществлять выбор параметров формируемого оптического сигнала. Центр матрицы ФЧЭ совмещен с центром диафрагмы АЧТ в процессе юстировки. Для уменьшения влияния фоновой составляющей падающего сигнала над матрицей ФЧЭ находится охлаждаемая диафрагма. Изменение мощности фонового излучения осуществля-

ется путем варьирования температуры внешней зачерненной диафрагмы — «шторки».

Вторая подсистема состоит из блока формирования сигналов (БФС) управления ФПУ. БФС осуществляет подачу цифровых и аналоговых сигналов для работы ФПУ, а также управляет работой АЦП. Цифровая часть данного блока реализована с помощью программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС), запрограммированной на языке *verilog*. Аналоговая часть осуществляет усиление и фильтрацию сигналов на выходе ФПУ, а также формирует заданные напряжения питания фотоприемника с помощью микросхем цифро-аналогового (ЦАП) преобразования, управляемых ПЛИС.

Третья подсистема состоит из платы АЦП с дополнительными цифровыми входами—выходами и персонального компьютера с соответствующим программным обеспечением (ПО), написанным на языках ANSI C и Lab View. Плата АЦП преобразует выходные сигналы ФПУ в цифровой код, который используется в измерительных программах. Синхронизация моментов оцифровки с выходными сигналами ФПУ осуществляется с помощью цифровых последовательностей, формируемых ПЛИС и подаваемых на цифровые входы платы АЦП. Автоматизация измерений реализуется благодаря непрерывному взаимодействию компьютерной измерительной программы и микросхемы ПЛИС по цифровым линиям связи. По окончании измерений компьютерная программа формирует отчет об измерениях, в котором содержатся основные параметры ФПУ в выбранном режиме работы.

Четвертая подсистема состоит из сосуда Дьюара с жидким азотом, через который проходит трубка с газом, криостата и датчика температуры матрицы ФЧЭ внутри криостата.

Важной технической особенностью рассматриваемой системы является ее универсальность, что достигается введением избыточного количества конфигурируемых цифровых и аналоговых выходов БФС. Для проведения исследований ФПУ нового типа, необходимо записать в память ПО необходимые тактовые диаграммы и изменить в интерфейсе программы значения подаваемых напряжений питания (после помещения образца в криостат).

Параметры системы

В табл. 1 представлены физические параметры, обеспечиваемые рассматриваемой системой при температуре окружающей среды 300 К и атмосферном давлении 1 атм.

Таблица 1

Параметры установки	
Параметр	Значение
Минимальная температура матрицы ФЧЭ МФПУ (К)	150
Минимальное давление внутри криостата (мТорр)	1.4
Собственные шумы системы, СКО (мВ)	0.3
Максимальное количество контактов ФПУ	60
Максимальное количество аналоговых выходов ФПУ	8
Максимальная частота оцифровки сигналов для каждого из каналов (МГц)	2.5
Разрядность АЦП (бит)	14
Лиафрагма АЧТ (мм)	0.3, 0.5, 0.8, 1.6, 2.5, 5, 8
Температура АЧТ (°С)	0–1000 ± 1,5%
Частота вращения модулятора (Гц)	1–500 ± 0,1
Расстояние от плоскости матрицы ФЧЭ до диафрагмы АЧТ (мм)	255
Температура фона (°С)	-100–25 ± 3
Общая погрешность измерения значений порогового потока (%)	14

Особенности методов исследования

Процесс измерения параметров ФПУ «смотрящего» типа с использованием рассматриваемой установки осуществляется классическим образом [6]. Рассмотрим особенности измерения параметров ФПУ с режимом ВЗН [9–18], предназначенного для регистрации точечного источника излучения. Нередко во входных ячейках большой интегральной схемы (БИС) ФПУ подобного типа производится фильтрация входных сигналов фильтрами верхних частот, что помогает избежать процедуры двухточечной коррекции в процессе эксплуатации изделия.

Измерение значений сигналов производится при включенном модуляторе АЧТ. На выходе ФПУ наблюдаются просуммированные с задержками и отфильтрованные значения меандра, формируемого модулятором (при малом размере диафрагмы АЧТ относительно отверстий диска модулятора). На рис/ 3 представлено теоретически рассчитанное значение ВЗН-сигнала в режиме фильтрации. Значение сигнала с канала ФПУ вычисляется как [1]:

$$U_c = U_{c_amp} \frac{1}{h}, \quad (1),$$

где h — коэффициент ослабления ВЗН-фильтра, а U_{c_amp} — амплитудное значение выходного сигнала. Значение h вычисляется из соотношения:

$$h = \frac{U_{нр}}{U_{полн}} \quad (2),$$

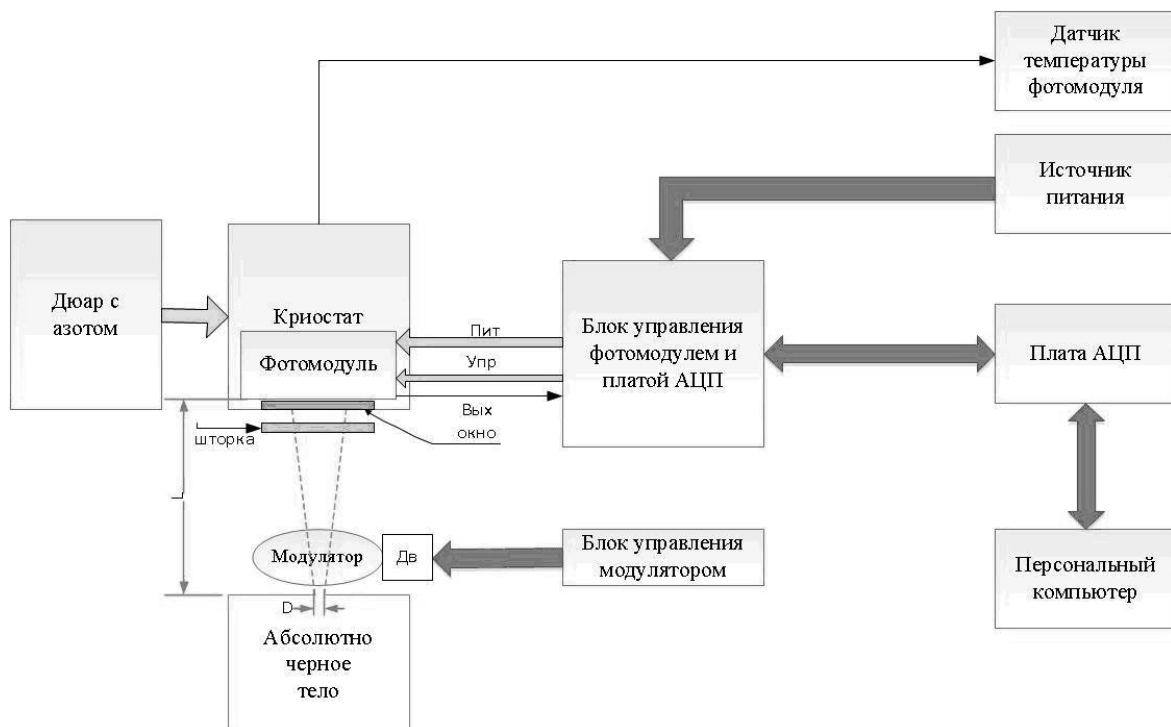


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки

где $U_{нр}$ — значение сигнала с канала ФПУ при суммировании с ВЗН с учетом фильтров верхних частот во входных ячейках, а $U_{полн}$ — значение сигнала, не учитывающее влияние данного фильтра. В случае отсутствия фильтров верхних частот во входных ячейках БИС, коэффициент h следует принять равным 1.

Ток фотодиода $i_{ФД}$ (при отсутствии «полезного» сигнала) состоит из темнового тока i_T и тока $i_{Ф}$, возникающего за счет фоновой облученности. $i_{Ф}$ включает в себя две компоненты: $i_{Фз}$ — ток, вызванный потоком от заслонки и $i_{Фвн}$ — ток, вызванный облученностью от внутренних частей криостата:

$$i_{ФД} = i_{Фз} + i_{Фвн} + i_T \quad (3)$$

Значение суммы $i_{Фвн} + i_T$ вычисляется экспериментальным путем. Расчет значения $i_{Фз}$ удобно производить с использованием метода, подробно описанного в [19, 20].

Для оценки корректности измерения параметров проведено сравнение измеренных экспериментальным путем характеристик с теоретически рассчитанными значениями. На рис. 4 представлена фоновая зависимость тока фотодиода от температуры заслонки. Значение суммы $i_{Фвн} + i_T$ равно 8,1 пА, определяет нижнюю границу представленного графика. На основании полученной зависимости был произведен расчет дробовых шумов канала ФПУ в режиме ВЗН. Результаты представлены на рис. 4. Произведено сравнение измеренных экспериментально значений шумов ФПУ с теоретически рассчитанными значениями дробовых шумов. На основании данных двух зависимостей были вычислены значения собственных шумов ФПУ (и установлена их природа — kTC -шумы), которые оказались равными 0,75 мВ (СКО).

Таким образом, процедура измерения ФПУ с режимом ВЗН свелась к процедуре измерения ФПУ «смотрящего» типа с добавлением лишь дополнительных поправок в конечные выражения, что и является основой производимой унификации измерительного оборудования.

Программные инструменты

Для проведения комплексного исследования параметров фотоприемного устройства, необходим ряд специализированных программных средств, позволяющих произвести предварительную проверку изделия, а также подобрать оптимальные режимы работы. При разработке стенда измерения основных фотоэлектрических параметров были реализованы следующие программные инструменты:

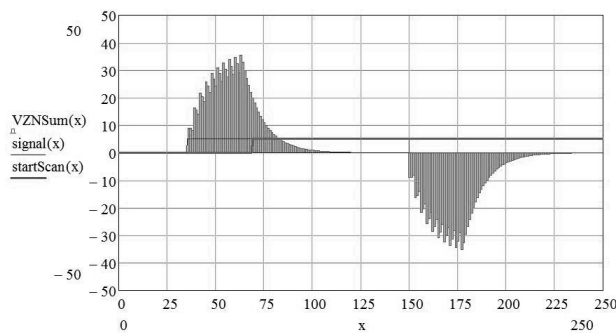


Рис. 3. Выходная характеристика ВЗН-системы

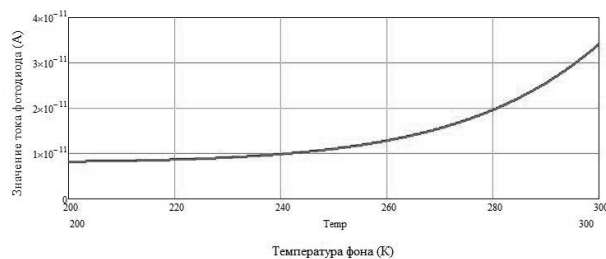


Рис. 4. Теоретически рассчитанная фоновая зависимость темного тока фотодиода

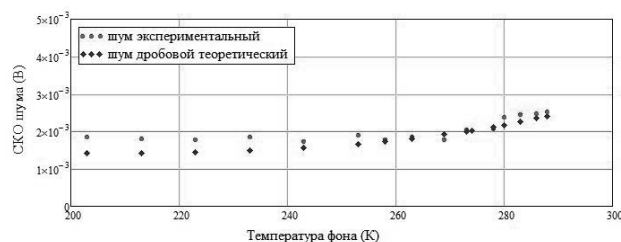


Рис. 5. Зависимости усредненного по каналам значения шума и теоретические расчеты дробового шума на выходе БИС считывания от температуры заслонки

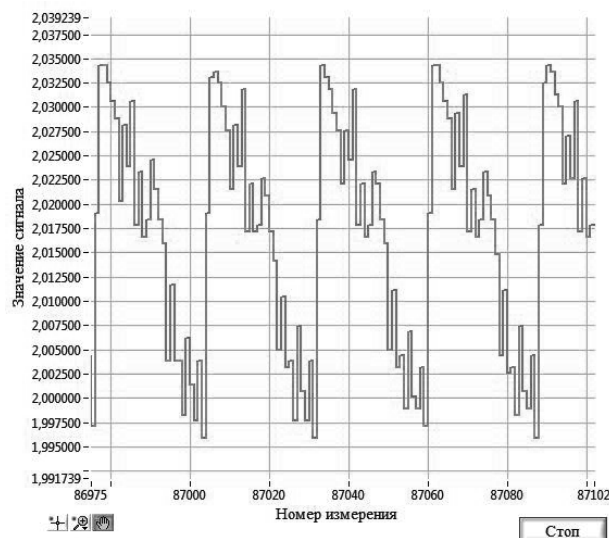


Рис. 6. Выходной сигнал с заданного канала ВЗН-МФПУ в режиме СВХ

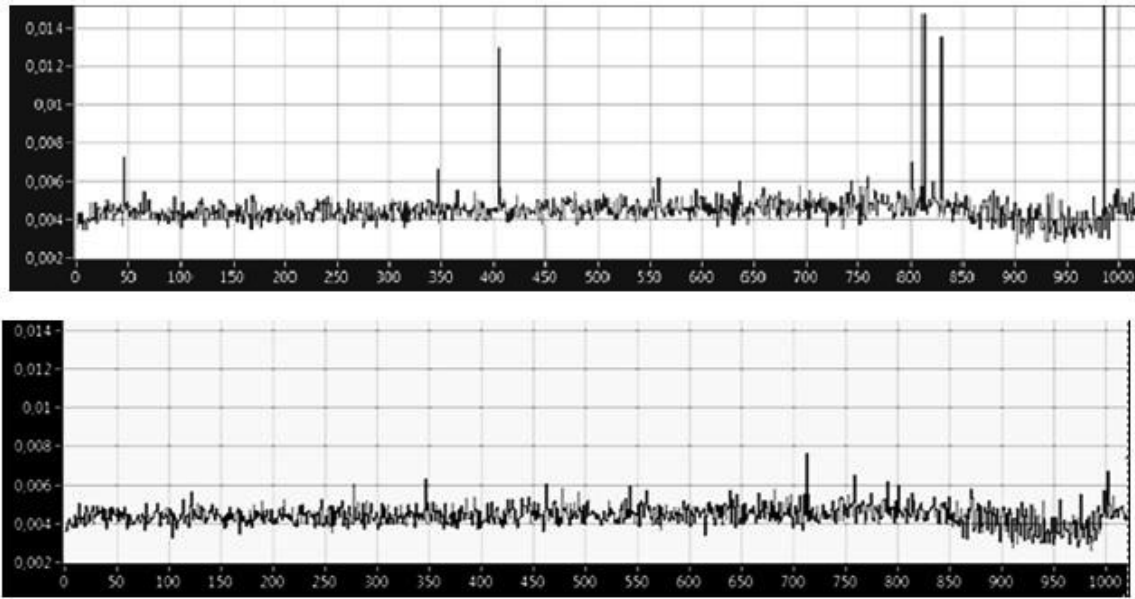


Рис. 7. Значения СКО выходных сигналов для каждого из каналов ВЗН-МФПУ до процедуры деселекции (а) и после (б)

- схема выборки и хранения (СВХ) для каждого канала ФПУ. После оцифровки выходных сигналов ФПУ, производится визуализация значений, соответствующих заданному каналу. На рис. 6 представлен выходной сигнал с первого канала ВЗН-МФПУ в режиме СВХ. Данная зависимость является полезной с исследовательской точки зрения, т.к. демонстрирует наличие периодической амплитудной модуляции;

- визуализация графиков зависимостей значений сигналов с каждого канала ФПУ (а также их среднеквадратических отклонений (СКО) данных сигналов) от номера канала фотоприемного устройства в режиме реального времени;

- визуализация значений сигналов с каждого канала ФПУ в виде изображения (в режиме реального времени). Для ВЗН-ФПУ имеется возможность также визуализировать сигнал с каждого чувствительного элемента (т.е. сигналы ФЧЭ до суммирования);

- средства деселекции дефектных элементов ФПУ;

- средства построения зависимостей параметров выходных сигналов от времени накопления фототока в автоматическом режиме;

- средства осуществления одноточечной и двухточечной коррекции.

На рис. 7 представлены графики зависимостей значений СКО выходных сигналов для каждого из каналов ВЗН-МФПУ: а) до процедуры деселекции и б) после.

Заключение

В данной работе представлено комплексное техническое решение, позволившее производить исследования целого ряда ФПУ как «ска-

нирующего», так и «смотрящего» типа на одной универсальной установке. Автоматизация процесса измерений достигается путем непрерывного взаимодействия ПК и блока формирования сигналов для ФПУ по цифровым линиям связи. Универсальность достигается наличием конфигурируемых цифровых и аналоговых выходов блока формирования сигналов, а также возможностью измерения параметров сканирующих систем с режимом ВЗН путем равномерной засветки матрицы ФЧЭ. Имеющаяся возможность исследования фоновых характеристик ФПУ позволяет формировать комплексное заключение о способности изделия решать поставленные задачи в реальных условиях эксплуатации.

Литература

1. Бочков В.Д., Дrajнников Б.Н., Кузнецов П.А., Козлов К.В., Соляков В.Н. // Прикладная физика. 2014. № 1. С. 53
2. Мазин М.Г., Лазарев П.С., Деева Г.Г., Соляков В.Н., Хамидуллин К.А. Юдовская А.Д. // Прикладная физика. 2012. № 5. С. 98
3. Бочков В.Д. Бычковский Я.С. Дrajнников Б.Н. Козлов К.В. Кондюшин И.С. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 2. С.231
4. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. — М.: Мир, 1988.
5. Хадсон Р. Инфракрасные системы. — М.: Мир, 1972.
6. Ллойд Дж. Системы тепловидения. — М.: Мир, 1978.
7. Бочков В.Д., Дrajнников Б.Н., Кузнецов П.А., Козлов К.В., Соляков В.Н. // Прикладная физика. 2014. № 1. С. 58
8. Бовина Л.А. и др. // Прикладная физика. 1999. № 4. С. 31

9. Акимов В.М. и др. // Прикладная физика. 2005. № 2. С. 7
10. Филачев А.М., Таубкин И.И., Тришенков М.А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. — М.: Физматкнига, 2005.
11. Бурлаков И.Д., Пономаренко В.П., Филачев А.М. // Прикладная физика. 2007. № 2. С. 43.
12. Болтарь К.О., Бурлаков И.Д., Филачев А.М., Яковлева Н.И. // Прикладная физика. 2012. № 3
13. Кузнецов П.А., Моцес И.С., Хромов С.С. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 5. С. 606.
14. Кузнецов П.А. Хромов С.С. Зайцев А.А. // Прикладная физика. 2012. № 5. С. 95
15. Соляков В.Н. Дразжников Б.Н. Хамидуллин К.А. Лазарев П.С. Таубкин И.И. Кошавцев Н.Ф. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 506.
16. Филачев А.М., Бурлаков И.Д., Болтарь К.О. Дразжников Б.Н. Хромов С.С. Кузнецов П.А. Фотопри-

емный модуль формата 1024×10 для приборов космического применения на основе КРТ на область спектра 1–3 мкм / Труды 22-й Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 22–25 мая 2012 г., Москва, ФГУП «НПО «Орион»,

17. Соляков В. Н., Дразжников Б. Н., Хамидуллин К. А., Лазарев П. С. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 4. С. 506.

18. Martin R.J., Riley G.E. // Proc. SPIE. 1988. V. 930. P. 26

19. Патрашин А.И. Метод расчета фоновой облученности МФПУ с холодной диафрагмой произвольной формы / Тез. докл. XX Междунар. науч.— техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. — М.: ФГУП «НПО «Орион"», А02, 2008.

20. Патрашин А.И. Бурлаков И.Д. Лопухин А.А. Яковлева Н.И. // Прикладная физика. 2012. № 5. С. 91

The universal automated equipment for measuring the main parameters of an infrared FPA

K. V. Kozlov, J. S. Bychkovsky, I. S. Kondushin, A. V. Matveev,
V. N. Solyakov, D. A. Pozhidaev and D. L. Baliev

Orion Research-and-Production Association,
46/2 Enthusiasts highway, Moscow, 111123, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru
Received March 3, 2014

The paper describes the universal automated installation for comprehensive studying of main parameters of infrared FPA. The both types: classical and TDI FPA can be measured using the equipment. The blackbody radiation, which uniformly illuminates the array of photosensitive elements is used as test signal. The analysis of main constructive and software features, which helps to increase the accuracy of measurements and to expand the range solving tasks, is done. The most significant results are showed

PACS: 42.79.Sz, 85.30.— Z

Keywords: TDI, FPA, photodetector, multiplexer

References

1. V. D. Bochkov, B. N. Drazhnikov, P. A. Kuznetsov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 53 (2014).
2. M. G. Mazin, P. S. Lazarev, G. G. Deeva, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 98 (2012).
3. V. D. Bochkov, Ya. S. Bychkovsky, B. N. Drazhnikov, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1**, 231 (2013).
4. Gilbert Gaussorgues. *La Thermographie Infrarouge* (Lavoisier, Paris; Mir, Moscow, 1988).
5. Richard D. Hudson, *Infrared System Engineering* (Wiley-Interscience, 1969; Mir, Moscow, 1972).
6. J. M. Lloyd, *Thermal Imaging Systems* (Plenum Press, New York and London, 1975; Mir, Moscow, 1978).
7. V. D. Bochkov, B. N. Drazhnikov, P. A. Kuznetsov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 58 (2014)
8. L. A. Bovina, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 31 (1999).
9. V. M. Akimov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 7 (2005)..
10. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Physical Base*. (Fizmatkniга, Moscow, 2005) [in Russian].
11. I. D. Burlakov, V. P. Ponomarenko, and A. M. Filachev, *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 43 (2007).
12. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, A. M. Filachev, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 3, (2012).
13. P. A. Kuznetsov, I. S. Moshchev, and S. S. Khromov, *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1**, 606 (2013).

14. P. A. Kuznetsov, S. S. Khromov, and A. A. Zaitsev, *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 95 (2012)

15. V. N. Solyakov, B. N. Drazhnikov, K. A. Khamidullin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 506. (2013).

16. A. M. Filachev, I. D. Burlakov, K. O. Boltar, et al., in *Proceedings of the XXII International Conference on Photoelectronics* (NPO Orion, Moscow, May 22–25, 2012), pp. 22–24

17. V. N. Solyakov, B. N. Drazhnikov, K. A. Khamidullin, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1**, 506 (2013).

18. R. J. Martin and G. E. Riley, *Proc. SPIE* **930**, 26 (1988).

19. A. I. Patrashin, in *Proceedings of the XX International Conference on Photoelectronics* (NPO Orion, Moscow, May, 2008), p. A02.

20. A. I. Patrashin, I. D. Burlakov, A. A. Lopukhin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 91 (2012).