

УДК 681.2:621.383

Автоматизированный стенд для измерения основных параметров МФПУ на основе InGaAs

Д. Л. Балиев, Е. А. Бедарева, А. Д. Деомидов, А. В. Полесский,
А. В. Сидорин, К. А. Хамидуллин, А. Д. Юдовская, Г. М. Цыганкова

Приведены результаты разработки стенда, предназначенного для автоматизированного измерения параметров матричных фотоприемных устройств на основе InGaAs. Стенд позволяет проводить измерения удельной обнаружительной способности, вольтовой чувствительности, динамического диапазона, а также проводить поиск дефектных элементов. В статье рассмотрены вопросы отличия методик измерения параметров фотоприемных устройств первого и второго поколений, приведены методики расчета параметров матричных фотоприемных устройств на основе InGaAs.

PACS: 06.90.+v

Ключевые слова: матричное фотоприемное устройство, измерение параметров, инфракрасная техника, методики измерения.

Введение

Одной из важных задач разработки новых типов фотоприемных устройств является создание специального стендового контрольно-измерительного оборудования для метрологического обеспечения их создания и производства.

В связи с разработкой в ОАО «НПО «Орион» матричных фотоприемных устройств (МФПУ) на основе InGaAs [1—4] спектрального диапазона 0,9—1,7 мкм, была поставлена задача создания стенда измерения следующих основных фотоэлектрических параметров:

- удельная обнаружительная способность;
- вольтовая чувствительность;
- динамический диапазон;
- величина и распределение сигналов при равномерной засветке;
- число и расположение нерабочих фоточувствительных элементов.

Помимо обеспечения высоких метрологических характеристик, разрабатываемый стенд должен соответствовать современным требованиям: обеспечивать измерение максимально возможного количества параметров с высокой точностью, быть автоматизированным, иметь высокую унификацию и удобный, интуитивно понятный пользовательский интерфейс.

Проблемой при создании оборудования измерения параметров фотоприемных устройств второго поколения является отсутствие стандартизированных методик измерения, которые можно было бы реализовать в измерительной аппаратуре. Решение данной проблемы достигается за счет корректировки методик измерения одно- и малоэлементных фотоприемных устройств первого поколения, приведенных в ГОСТ 17772-88 [5]. При этом основа методики измерения — схемы установок, требования к их основным элементам, требования к точности измерения отдельных параметров остаются прежними.

Целью данной работы является представление результатов разработки стенда, предназначенного для автоматизированного измерения параметров матричных фотоприемных устройств на основе InGaAs.

Описание структурной схемы стенда

Структурная схема стенда приведена на рис. 1. Для формирования известной засветки двух уровней с известной мощностью излучения на поверхности фотоприемного устройства используются высокотемпературное АЧТ (абсолютно черное тело) с набором диафрагм и заслонка. Выбор высокотемпературного АЧТ обусловлен необхо-

Балиев Дмитрий Леонидович, инженер¹.
Бедарева Елизавета Александровна, инженер¹.
Деомидов Александр Дмитриевич, инженер¹.
Полесский Алексей Викторович, главный метролог¹.
Сидорин Алексей Васильевич, инженер².
Хамидуллин Камиль Алиевич, инженер¹.
Юдовская Александра Дмитриевна, инженер¹.
Цыганкова Галина Михайловна, ведущий инженер¹.
¹ОАО «НПО «Орион».

Россия, 111123, Москва, ш. Энтузиастов, 46/2.
E-mail: orion@orion-ir.ru, av22236@bk.ru
²МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия.
Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1.

Статья поступила в редакцию 29 сентября 2014 г.

© Балиев Д. Л., Бедарева Е. А., Деомидов А. Д., Полесский А. В., Сидорин А. В., Хамидуллин К. А., Юдовская А. Д., Цыганкова Г. М., 2014

димостью обеспечения освещенности в заданной области спектра. Его применение позволяет также сравнительно просто определять величину светового потока, падающего на поверхность МФПУ.

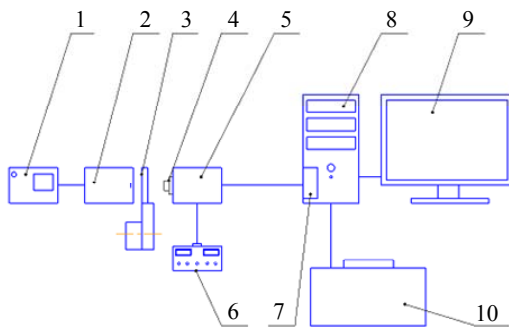


Рис. 1. Структурная схема стенда измерения основных параметров МФПУ на основе InGaAs: 1 — блок управления АЧТ; 2 — излучатель АЧТ; 3 — заслонка; 4 — измеряемый МФПУ; 5 — блок сопряжения; 6 — блок питания МФПУ и блока сопряжения; 7 — плата ввода-вывода; 8 — ПЭВМ; 9 — монитор; 10 — принтер

Расстояние между АЧТ и МФПУ составляет 130 мм. В этом случае неравномерность освещения по поверхности МФПУ можно определить по следующей формуле [6]:

$$\Delta E = \cos^4 \left(\arctg \left(\frac{a}{2 \cdot L} \right) \right), \quad (1)$$

где a — диагональ МФПУ; L — расстояние от АЧТ до МФПУ.

В нашем случае равномерность освещения в пределах МФПУ составила 99,5 %.

Измеряемый МФПУ устанавливается в колдовку блока сопряжения, которая производит съем информации с измеряемого образца и ее передачу в ПЭВМ. ПЭВМ, в свою очередь, через блок сопряжения передает управляющее слово и тактовые импульсы на приемник. Результаты измерения МФПУ сохраняются на жесткий диск ПЭВМ и могут быть распечатаны в виде протокола измерений с оценкой соответствия заданным требованиям.

Методики расчета параметров фотоприемных устройств на основе InGaAs

Корректировка методик, приведенных в ГОСТ 17772-88, с целью обеспечения возможности измерения фотоприемных устройств второго поколения касается трех положений:

- измерения сигнала и шума;
- поиска дефектных элементов.
- расчета средних значений величин по МФПУ.

В части измерения сигнала и шума корректировка касается методов измерения. Измерения сигнала и шума одно- и малоэлементных фотоприемных устройств первого поколения проводят-

ся с помощью вольтметров или осциллографов; при этом точность измерения обеспечивается точностью измерительных приборов. В фотоприемных устройствах второго поколения измерения величин сигнала и шума производятся путем усреднения большого массива данных (кадров, получаемых МФПУ). При этом чем больше массив, тем более близкими к действительным получаются величины сигнала и шума. Поэтому для фотоприемных устройств второго поколения ошибка измерения складывается из трех составляющих, а именно ошибки измерительных приборов, в роли которых выступают модули цифровой обработки, ошибки, вызванные ограниченной длиной массива кадров и ошибки вычислений, зависящие от программной реализации алгоритмов.

В части поиска дефектных элементов отличие методик измерения состоит в том, что для фотоприемных устройств первого поколения нет понятия «дефектный элемент» и приборы с дефектными элементами являются браком.

В части расчета средних значений величин по МФПУ — в том, что для фотоприемных устройств первого поколения используются параметры, описывающие каждый элемент, в то время как для ФПУ второго поколения приводятся средние значения, при расчете которых учитываются дефектные элементы. Иногда делается оговорка, что расчет среднего значения проведен по 99 % лучшим значениям рабочих элементов.

В разработанном стенде реализованы методики измерения, в которых входными данными являются трехмерные массивы, содержащие данные о сигналах с каждого элемента при наличии и отсутствии засветки в единицах счета АЦП.

Расчет значения сигнала ij -го фоточувствительного элемента (ФЧЭ) МФПУ проводится по формуле:

$$S_{ij} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (B_{ij} - A_{ij}), \quad (2)$$

где K — число измеренных кадров; A_{ij} — величина сигнала при отсутствии засветки; B_{ij} — величина сигнала при наличии засветки.

Расчет значения среднеквадратичного шума N_{ij} для ij -го ФЧЭ МФПУ определяется по формуле:

$$N_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^K (B_{ijk} - \bar{B}_{ij})^2 / K}, \quad (3)$$

где B_{ijk} — величина сигнала при отсутствии засветки в k -ом кадре; \bar{B}_{ij} — средняя величина сигнала для ij -го ФЧЭ, определяемая по формуле:

$$\bar{B}_{ij} = \sum_{k=1}^K (B_{ijk}) / K, \quad (4)$$

где K — число кадров.

Мощность излучения, падающего на МФПУ в рабочем спектральном диапазоне чувствительности на единицу поверхности в плоскости ФЧЭ, рассчитывается по формуле:

$$P = \frac{\sigma \cdot (\varphi_1 \varepsilon_1 T_1^4 - \varphi_0 \varepsilon_0 T_0^4) \cdot D^2}{4 \cdot L^2}, \quad (5)$$

где σ — постоянная Стефана-Больцмана; ε_1 — коэффициент излучения излучателя АЧТ; ε_0 — коэффициент излучения заслонки; T_1 — температура АЧТ; T_0 — температура заслонки; D — диаметр диафрагмы АЧТ; L — расстояние между АЧТ и плоскостью ФЧЭ МФПУ; φ_1, φ_0 — коэффициенты использования излучения при температуре T_1 и T_0 соответственно, определяемые по формуле:

$$\varphi = \frac{\int_0^\infty S_{отн}(\lambda) \cdot r_\lambda(\lambda, T)}{\int_0^\infty r_\lambda(\lambda, T)}, \quad (6)$$

где $S_{отн}(\lambda)$ — относительная спектральная характеристика чувствительности; $r_\lambda(\lambda, T)$ — спектральная плотность потока излучения при температуре T .

Расчет значения статической вольтовой чувствительности ij -го ФЧЭ МФПУ $S_{u\ ij}$ (в единицах В/Вт) проводится по формуле:

$$S_{u\ ij} = \frac{S_{ij} \cdot K_{АЦП}}{P \cdot A_s}, \quad (7)$$

где $K_{АЦП}$ — величина одного отсчета АЦП в вольтах; A_s — размер фоточувствительной площадки, см; S_{ij} — сигнал ij -го ФЧЭ (2); P — плотность мощности ИК излучения АЧТ М345Х6 в рабочем спектральном диапазоне чувствительности МФПУ в плоскости ФЧЭ, Вт·см⁻² (5).

Среднее значение статической вольтовой чувствительности рассчитывается по недефектным ФЧЭ МФПУ (в единицах В·Вт⁻¹) и определяется по формуле:

$$S_u = \frac{\sum S_{u\ ij}}{M}, \quad (8)$$

где M — число недефектных ФЧЭ измеряемого МФПУ.

Значение удельной обнаружительной способности ij -го элемента МФПУ в максимуме спектральной чувствительности D_{ij}^* (в единицах см·Вт⁻¹·Гц^{1/2}) рассчитывается по формуле:

$$D_{ij}^* = \frac{S_{ij}}{N_{ij}} \cdot \frac{1}{P \cdot A_s} \cdot \sqrt{\frac{A_s}{2 \cdot \tau}}, \quad (9)$$

где S_{ij} — значение сигнала ij -го ФЧЭ МФПУ (2); N_{ij} — значение шума N_{ij} ij -го ФЧЭ о МФПУ (3); P — плотность мощность ИК излучения АЧТ (5); A_s — площадь фотоэлектрической площадки ФЧЭ; τ — время накопления, установленное на МФПУ.

Среднее значение удельной обнаружительной способности МФПУ в максимуме спектральной чувствительности рассчитывается только по недефектным ФЧЭ по формуле:

$$D^* = \frac{\sum D_{ij}^*}{M}, \quad (10)$$

где M — число недефектных ФЧЭ МФПУ.

Величина динамического диапазона недефектных ФЧЭ определяется отношением максимального напряжения выходного сигнала ФЧЭ $S_{макс\ ij} = 0,8 \cdot E_{зар}$ к минимальному фотосигналу, равному интегральному шуму ФЧЭ N_{ij} .

$$H_{ij} = 20 \cdot \lg \left(\frac{S_{макс\ ij}}{N_{ij}} \right), \quad (11)$$

где $E_{зар}$ — напряжение заряда емкостей накопления МФПУ ($E_{зар} = 5$ В).

Величина динамического диапазона МФПУ определяется средним значением динамического диапазона по недефектным ФЧЭ.

$$H_{cp} = \frac{\sum H_{ij}}{M}, \quad (12)$$

где M — число недефектных ФЧЭ МФПУ.

Описание стенда

Стенд позволяет проводить измерения характеристик как самих МФПУ, так и фотоэлектронных модулей на их основе, включающих в свой состав блок сопряжения.

Конструкция разработанного стенда позволяет осуществлять быструю и удобную установку, а также съем измеряемых изделий. При этом стенд обслуживается одним оператором.

Для измерения параметров МФПУ в дневных условиях с высоким уровнем фоновых засветок в состав стенда входит специальный кожух.

Внешний вид разработанного стенда приведен на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид автоматизированного стенда для измерения основных параметров МФПУ на основе InGaAs

Основные технические характеристики стенда приведены в таблице.

Разработанное программное обеспечение является многофункциональным: оно позволяет проводить измерения как в полностью автоматическом режиме по заранее заданной программе (профилю измеряемого МФПУ), так и более детальные измерения, задавая перечень измеряемых параметров, условия проведения измерений, критерии дефектности.

Внешний вид программного обеспечения приведен на рис. 3.

Результаты измерений удельной обнаружительной способности параметров МФПУ формата 320×256 на основе InGaAs приведены на рис. 4. Теоретический расчет параметров был проведен в [7, 8].

Таблица

Основные технические характеристики стенда

| Наименование параметра | Значение |
|--|-------------------------------------|
| Спектральный диапазон контролируемых МФПУ, мкм | 0,9—2,5 |
| Размер диагонали контролируемых МФПУ, мм | 12,3 24,6 |
| Равномерность засветки поверхности МФПУ; для диагонали 12,3 мм, для диагонали 24,6 мм, | 99,5% 98,2% |
| Диапазон температур АЧТ MICRON M360 | 323—1373 К |
| Размер диафрагм АЧТ, мм | 25,4; 12,7; 10,16; 7,62; 5,08; 2,54 |
| Количество каналов приема данных | 8 |
| Частота входного сигнала, МГц | 8 |
| Разрядность АЦП, бит | 14 |
| Формат контролируемых ФПУ | 320×256 |

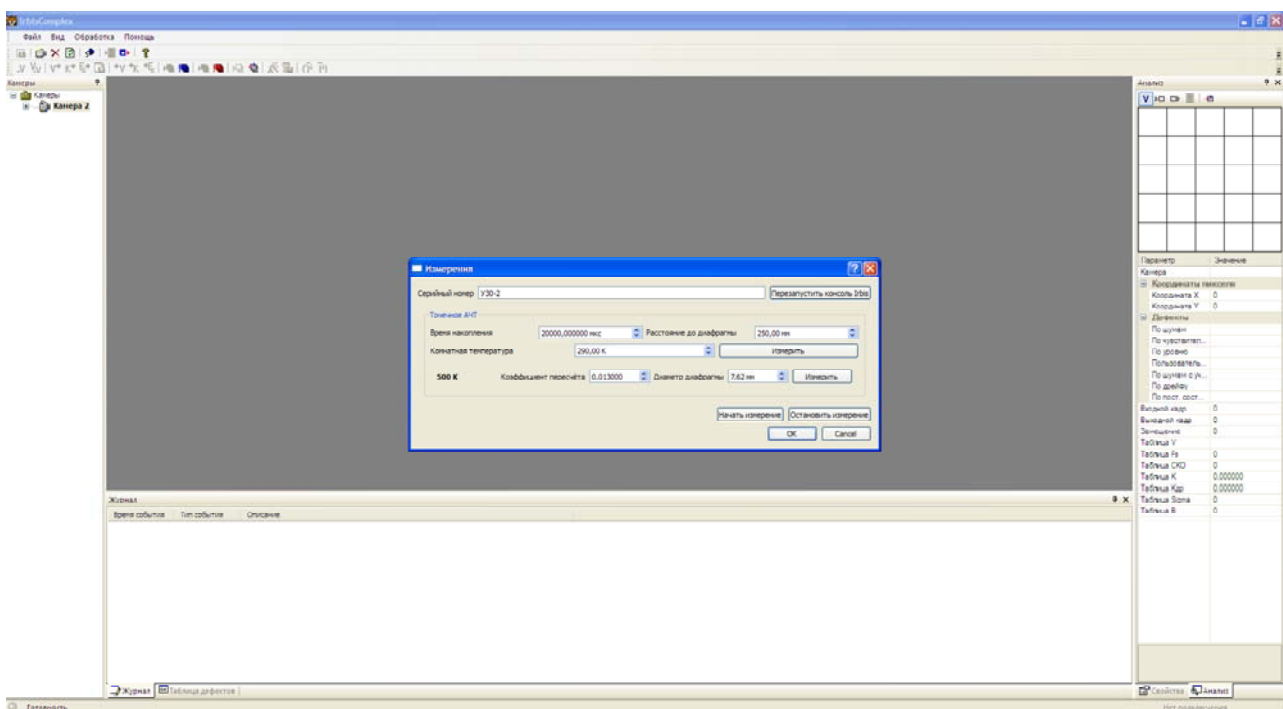


Рис. 3. Внешний вид программного обеспечения автоматизированного стенда для измерения основных параметров МФПУ на основе InGaAs

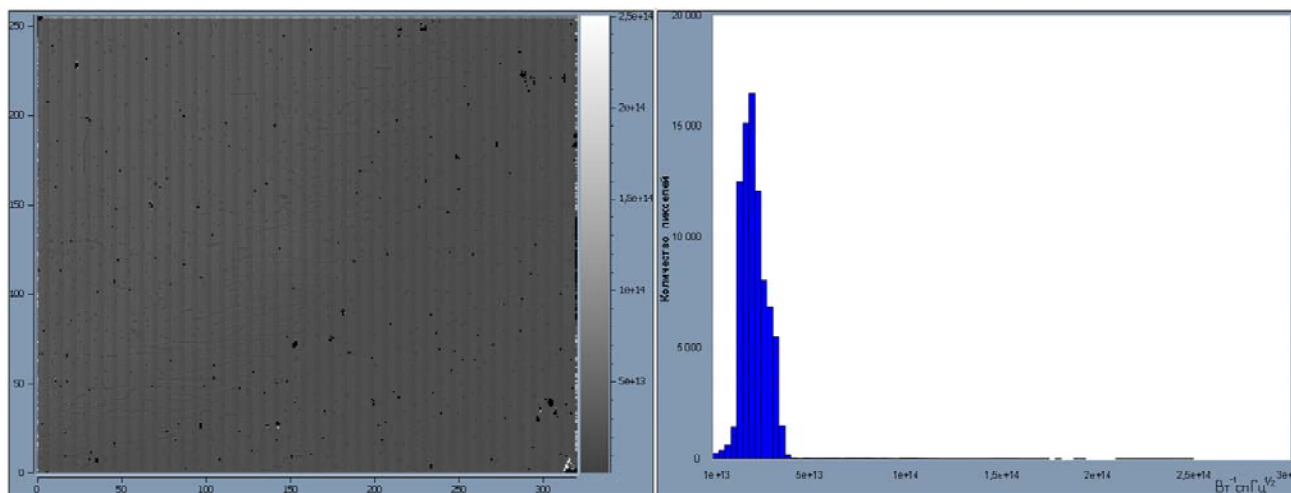


Рис. 4. Результаты измерения удельной обнаружительной способности параметров МФПУ формата 320×256 на основе InGaAs

Исследование метрологических характеристик стенда

Исследование метрологических характеристик стенда проводилось по двум основным критериям: верификация и повторяемость.

Верификация была подтверждена путем подачи на входные каналы стенда напряжения с известной величиной сигнала и шума, имитирующего работу матричного фотоприемного устройства. В программном обеспечении задавались необходимые коэффициенты пересчета и данные о температуре АЧТ. В результате испытаний на стенде были получены характеристики виртуального МФПУ. Характеристики виртуального МФПУ, полученные на стенде, с высокой степенью точности совпали с ожидаемыми. Повторяемость измерений виртуального МФПУ составляет порядка 2 %.

Заключение

Представленные результаты разработки стенда показывают, что он с успехом может быть использован для автоматизированного измерения параметров матричных фотоприемных устройств на основе InGaAs. Стенд позволяет проводить измерения удельной обнаружительной способности, вольтовой чувствительности, динамического диапазона, а также проводить поиск дефектных элементов. С методической точки зрения, важными являются рассмотренные в статье вопросы отличия

методик измерения параметров фотоприемных устройств первого и второго поколений. Одновременно приведены методики расчета параметров матричных фотоприемных устройств на основе InGaAs.

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации НШ-2787.2014.9.

Литература

1. Андреев Д. С., Болтарь К. О., Власов П. В. и др. Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 1. С. 60.
2. Яковлева Н. И., Болтарь К. О., Седнев М. В. и др. Прикладная физика. 2014. № 2. С. 45.
3. Андреев Д. С., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д. и др. / Труды 22 Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. — М.: ФГУП «НПО «Орион», 2012 г.
4. Андреев Д. С., Гришина Т. Н., Залетаев Н. Б., Тришеников М. А. и др. // Прикладная физика. 2012. № 4. С. 86.
5. 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.
6. Заказнов Н. П., Кирюшин С. И., Кузичев В. И. Теория оптических систем. — М.: Машиностроение, 1992.
7. Патрашин А. И. // Прикладная физика. 2010. № 2. С. 103.
8. Патрашин А. И., Бурлаков И. Д., Лопухин А. А. и др. // Прикладная физика. 2012. № 5. С. 91.

The automatic test-bench for measurement of the FPA characteristics based on InGaAs

D. L. Baliev¹, E. A. Bedareva¹, A. D. Deomidov¹, A. V. Polesskiy¹, A. V. Sidorin²,
K. A. Khamidullin¹, and A. D. Yudovskaya¹, and G. M. Tsygankova¹

¹Orion Research-and-Production Association
46/2 Entuziastov shosse, Moscow, 111123, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru; av22236@bk.ru

²Bauman Moscow State Technical University
5/1 2-nd Bauman str., Moscow, 105005, Russia

Received September 29, 2014

Results of development the automatic test-bench for measurement parameters of matrix photodetectors based on InGaAs are presented. Test-bench allows measurement of the specific detectivity, voltage sensitivity, dynamic range, and provided searching of defective pixels. In the article differences in techniques of measuring parameters for the first and the second FPA generations are discussed, and the methodology of matrix photodetectors based on InGaAs parameters calculating are considered.

PACS: 06.90.+v

Keywords: specific detectivity, SWIR, FPA, test bench, methods.

References

1. D. S. Andreev, K. O. Boltar, P. V. Vlasov, et al., *Uspekhu Prikladnoi Fiziki* **2**, 60 (2014).
2. N. I. Iakovleva, K. O. Boltar, M. V. Sednev, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 45 (2014).
3. D. S. Andreev, K. O. Boltar, I. D. Burlakov, et al., in *Proc. Intern. Conf. Photoelectron.* (NPO Orion, Moscow, 2012).
4. D. S. Andreev, T. N. Grishina, N. B. Zaketaev, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 86 (2012).
5. GOST 17772-88. (1988) [in Russian].
6. N. P. Zakaznov, S. I. Kiryushin, and V. I. Kuzichev, *Theory of Optical Systems* (Mashinostroenie, Moscow, 1992) [in Russian].
7. A. I. Patrashin, *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 103 (2010).
8. A. I. Patrashin, I. D. Burlakov, A. A. Lopukhin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 91 (2012).