

## Высококочувствительное устройство измерения коэффициента концентрации энергии при синтезе ИК-изображений для тестирования характеристик матричных фотоприемных устройств

А. Г. Верхогляд, И. С. Гибин, А. Г. Елесин, С. Н. Макаров, М. Ф. Ступак

*Изложены результаты разработки и апробирования высококочувствительного автоматизированного устройства измерения коэффициента концентрации энергии в системах синтеза динамических и статических ИК-изображений в составе испытательного стенда контроля характеристик МФПУ. Реализована возможность измерения уровней облученности в широком диапазоне –  $10^{-9}$ – $10^{-5}$  Вт/см<sup>2</sup>. Погрешность измерения размеров объекта, формируемого в плоскости изображения, не превышает единиц мкм.*

*Ключевые слова:* коэффициент концентрации энергии, матричное фотоприемное устройство, МФПУ, измерение функции концентрации энергии, плоскость ИК-изображений, контроль характеристик МФПУ, прецизионное позиционирование.

### Введение

Одним из важнейших этапов при создании МФПУ ИК-диапазона, а также различных систем ночного видения является стадия их всестороннего испытания и тестирования. Минимизация затрат на такие испытания с их полноценной заменой лабораторным тестированием на специализированном стенде является одним из способов значительной экономии средств при разработке МФПУ, с одной стороны, а с другой, позволяет разработчикам оценивать и оптимизировать характеристики будущих МФПУ уже на этапе конструкторской проработки изделий. Поэтому чрезвычайно актуальными являются разработка и создание как принципов, так и конкретных стендов, систем, синтезирующих различные динамиче-

ские тесты для испытания современных МФПУ. Базовыми элементами этих стендов и систем являются комплексированные преобразователи сформированных на компьютере изображений в заданную ИК-область спектра, обеспечивающие формирование как статических тестовых изображений, так и динамических сцен [1–4].

Для проведения юстировочных операций в подобных системах и стендах, а также проведения их первичной и периодической аттестации необходимы высококочувствительные, высокоточные, с большим динамическим диапазоном устройства измерения функции концентрации энергии и коэффициента концентрации энергии в плоскости сформированного изображения в рабочем спектральном диапазоне системы или стенда [5–7].

Целью данной работы является изложение результатов разработки и апробирования высококочувствительного автоматизированного устройства измерения коэффициента концентрации энергии в системах синтеза динамических и статических ИК-изображений в составе испытательного стенда контроля характеристик МФПУ.

### Постановка задачи

Наиболее остро стоит задача измерения функции концентрации энергии и коэффициента концентрации энергии в плоскости сформированного на стенде изображения в среднем ИК-диапазоне и в отдельных узких спектральных участках этого диапазона. Готовых промышленных решений для относительно широкой области спектра 2–5 мкм и диапазона измерения облученности

Верхогляд Александр Григорьевич<sup>1</sup>, зав. лаб.,  
и.о. зам. директора.

Гибин Игорь Сергеевич<sup>1,2</sup>, г.н.с., д.т.н., профессор.

Елесин Андрей Геннадьевич<sup>1</sup>, инженер 1 кат.

Макаров Сергей Николаевич<sup>1</sup>, с.н.с.

Ступак Михаил Федорович<sup>1</sup>, в.н.с., к.ф.-м.н., доцент.

<sup>1</sup> Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук (КТИ НП СО РАН).

Россия, 630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41.

Тел. +7(383) 306-58-66. E-mail: stupak@tdisie.nsc.ru

<sup>2</sup> Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН).

Россия, 630090, г. Новосибирск, просп. акад. Коптюга, 1.

E-mail: gibin@iae.nsk.su

Статья поступила в редакцию 15 мая 2018 г.

© Верхогляд А. Г., Гибин И. С., Елесин А. Г., Макаров С. Н., Ступак М. Ф., 2018

на уровне  $10^{-9}$ – $10^{-5}$  Вт/см<sup>2</sup> в открытых источниках не обнаружено. В нашей стране промышленное производство таких устройств отсутствует, существуют лишь ссылки на НИРы и экспериментальные образцы [8]. Поэтому для выполнения данной задачи было решено создать на базе ИК-детекторов соответствующее собственное устройство.

Для измерения ИК-излучения применяются два вида ИК-детекторов:

- фотонные – принцип их работы основан

на поглощении фотонов носителями заряда, в результате чего изменяются электрические параметры чувствительной области [9–11];

- энергетические (тепловые) – принцип работы основан на поглощении ИК-излучения чувствительной областью сенсора, нагревая её до некоторой температуры, что приводит к изменению физических параметров [12].

Сравнительные качественные характеристики ИК-детекторов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительные качественные характеристики ИК-детекторов

	Фотонные	Тепловые
Спектральная чувствительность	Узкая, избирательная	Широкая, однородная
Стоимость	Высокая	Низкая
Чувствительность	Высокая	Низкая
Рабочая температура	Криогенная	Комнатная

Следует отметить, что тепловые изделия фирмы Ophir [12] – наиболее приемлемые коммерческие готовые устройства, однако их интегральная чувствительность находится на уровне десятка мкВт.

В итоге для решения поставленной задачи был выбран тепловой ИК-детектор (болومتر), так как спектральная чувствительность данного детектора широкая и равномерная, что *положительно* сказывается на измерении облученности в широком спектральном диапазоне. Также немаловажными факторами оказались его комнатная рабочая температура и относительно низкая стоимость.

На основе выбранного детектора нами разработано и испытано высокочувствительное автоматизированное устройство измерения коэффициента концентрации энергии в рабочем спектральном диапазоне 2–5 мкм в системах синтеза динамических и статических ИК-изображений.

Далее изложены результаты разработки и апробирования данного устройства.

### Оптические и функциональные характеристики устройства

Устройство предназначено для измерения коэффициента концентрации энергии в пятне и его геометрических размеров. Оно измеряет облучен-

ность в ИК-диапазоне и передает результаты на внешний ПК по проводному соединению, где они преобразуются в удобный для отображения вид.

Область применения устройства – измерения коэффициента концентрации энергии в пятне рассеивания проекционных оптических систем в ИК-диапазоне.

Габаритные размеры устройства – 320×250×200 мм (длина×ширина×высота), общая масса – не более 10 кг.

Основные технические характеристики устройства приведены в табл. 2.

Конструктивно устройство выполнено в виде шести функциональных блоков, расположенных в корпусе. На передней панели корпуса расположено входное отверстие для излучения, на задней – разъем RJ45 для подключения к внешнему ПК, светодиодный индикатор, разъем для синхронизации с источником ИК излучения, разъем питания 220 В, совмещенный с выключателем и индикатором питания.

Структурная схема устройства без оптической части представлена на рис. 1.

Таблица 2

Основные технические характеристики устройства

Наименование характеристики	Значение
1. Спектральный диапазон	2–5 мкм
2. Рабочий диапазон уровней облученности	$10^{-9}$ – $10^{-5}$ Вт/см <sup>2</sup>
3. Точность позиционирования ножа Фуко не хуже	1 мкм

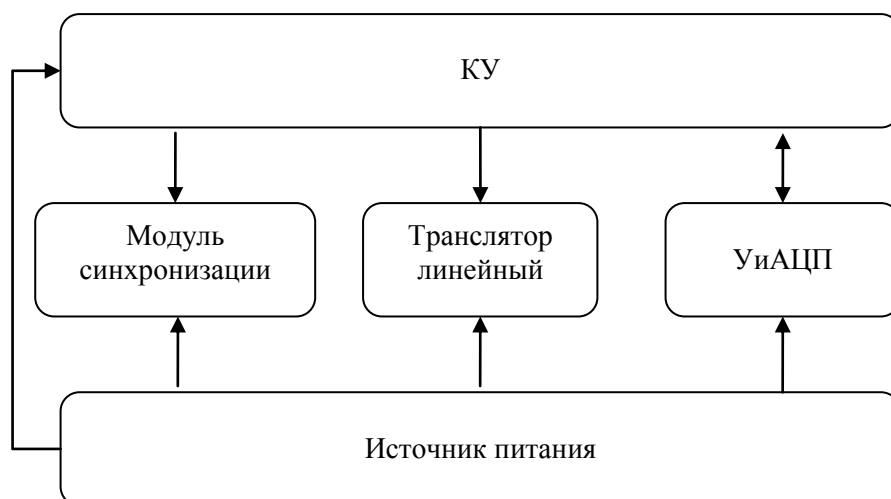


Рис. 1. Структурная схема устройства для измерения коэффициента концентрации энергии в рабочем спектральном диапазоне Системы.

Устройство состоит из следующих блоков:

- усилитель и аналого-цифровой преобразователь (далее – УиАЦП);
- контроллер управления (далее – КУ);
- модуль синхронизации;
- транслятор линейный;
- источник питания.

Оптическая принципиальная схема устройства представлена на рис. 2.

Принцип работы устройства заключается в следующем.

ИК-излучение (либо на всю рабочую спектральную область, либо «вырезанное» по спектру фильтром 2) попадает на фоточувствительный элемент 1. Вследствие нагрева под воздействием поглощаемого ИК-излучения изменяется электрическое сопротивление фоточувствительного элемента 1. Данное изменение сопротивления регист-

рируется, усиливается и оцифровывается в блоке УиАЦП, затем передается в КУ, где оцифрованные данные измерения помещаются и хранятся во внутреннем буфере типа FIFO.

Основной отличительной особенностью разработанного устройства, существенно повышающей его чувствительность, является то, что его измерительный тракт охвачен цепью синхронного детектирования с источником ИК-излучения.

Большая доля шума фоточувствительного элемента состоит из низкочастотного дрейфа нуля сигнала. Этот дрейф обусловлен тепловым дрейфом коэффициента усиления фоточувствительного элемента, электронных компонент усилителя и изменением потока ИК-излучения на входе прибора, связанным с нагревом оптических поверхностей. Этот дрейф эквивалентен низкочастотному шуму в сигнале.

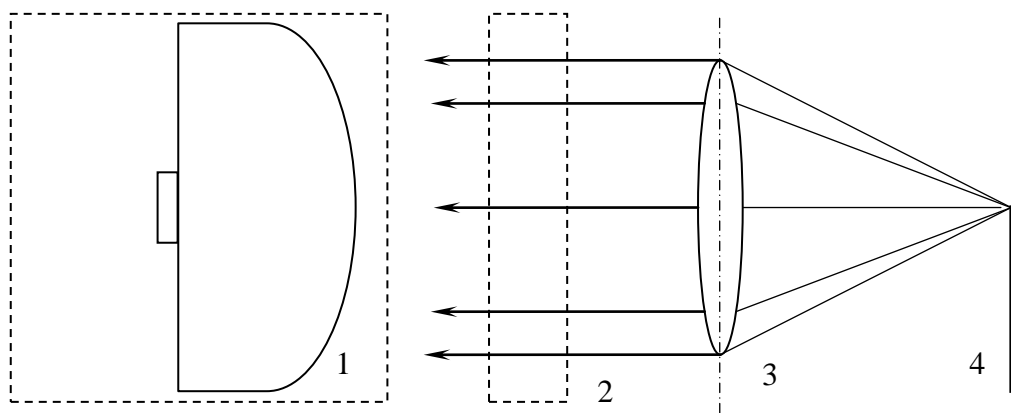


Рис. 2. Принципиальная оптическая схема устройства.  
 1 – Болومتر полупроводниковый БП-2М\* производства ООО «Ризлта» с фокусирующей германиевой линзой.  
 2 – Гнездо размещения сменных интерференционных фильтров.  
 3 – Линза LE5838-E ThorLabs.  
 4 – Нож Фуко.

Кроме этого, усилитель фоточувствительно-го элемента подвержен низкочастотным электромагнитным помехам, содержащим гармоники сети энергоснабжения (50 Гц), что также дает вклад в шум измеряемого сигнала.

С целью снижения уровня низкочастотного дрейфа нуля, вызванного тепловыми эффектами, источник ИК-излучения модулируется по интенсивности на частоте, существенно более высокой, чем полоса частот дрейфа. В результате модуляции излучателя полезный сигнал переносится в область частоты модуляции, а основной нежелательный шум остается в низкочастотной области. В области частоты модуляции шумы схемы измерения существенно ниже и соотношение сигнал-шум значительно выше.

При детектировании выполняется обратная операция, и значение полезного сигнала восста-

навливается синхронной демодуляцией после выполнения в измерительном тракте.

Кроме этого, период модуляции кратен периоду периодического шума (20 мс), что дает возможность подавления низкочастотных помех сети энергоснабжения (50 Гц).

Синхронное детектирование позволило, в первую очередь, исключить из измеряемого сигнала паразитную засветку от окружающей среды и элементов оптического тракта испытательного стенда.

В итоге, основной вклад в погрешность измерения устройства вносит тепловой шум сопротивления полупроводникового болометра.

На основе аппроксимации калибровки устройства по измерителю мощности фирмы Ophir (см. табл. 3) погрешность измерения устройства (СКО) не превышает  $4 \times 10^{-9}$  Вт.

Таблица 3

Среднеквадратичная ошибка измерения

Размер изображения (в пикселях матрицы DLP)	Сигнал Ophir, Вт	Сигнал устройства, собственные единицы	Значение одной собственной единицы в ваттах
250×250	$0,283 \times 10^{-3}$	6108258	$4,6333 \times 10^{-11}$
100×100	$0,048 \times 10^{-3}$	1282347	$3,7431 \times 10^{-11}$
50×50	$0,013 \times 10^{-3}$	317020	$4,1006 \times 10^{-11}$

Измерения распределения облученности светового поля в пятне и коэффициента концентрации производятся устройством в соответствии с ГОСТ Р ИСО/ТО 11146-3-2008. В частности, для измерения распределения энергии ИК-излучения на площадке фоточувствительного элемента используется пластина с резким краем (т. н. нож Фуко), которая расположена на программно управляемой подвижке (Транслятор линейный). Осуществляя сканирование программно управляемой подвижкой, регистрируется массив данных распределения мощности на фоточувствительном элементе. Дифференцируя данное распределение

по координате сканирования (реализована возможность отдельного сканирования по двум взаимно ортогональным координатам), получаем распределение облученности в пятне рассеяния по координате сканирования.

### Экспериментальные результаты тестирования основных характеристик устройства

Возможности устройства по измерению распределения энергии ИК-излучения на площадке фоточувствительного элемента с помощью ножа Фуко демонстрируют рис. 3 и 4.

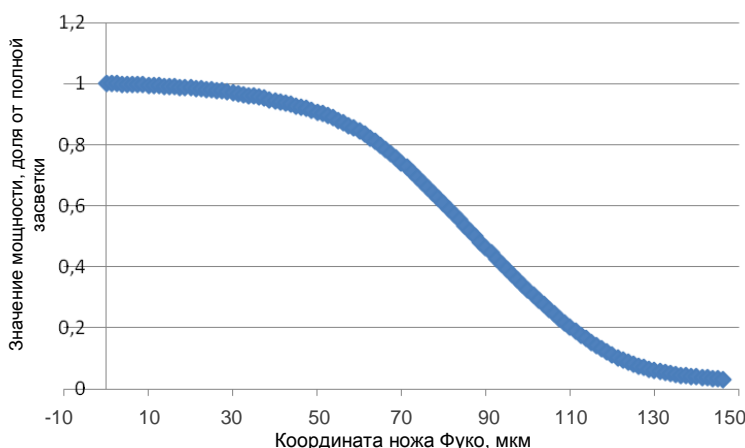


Рис. 3. Распределение мощности (в долях от полной засветки) на фоточувствительном элементе при сканировании ножом Фуко изображения квадрата.

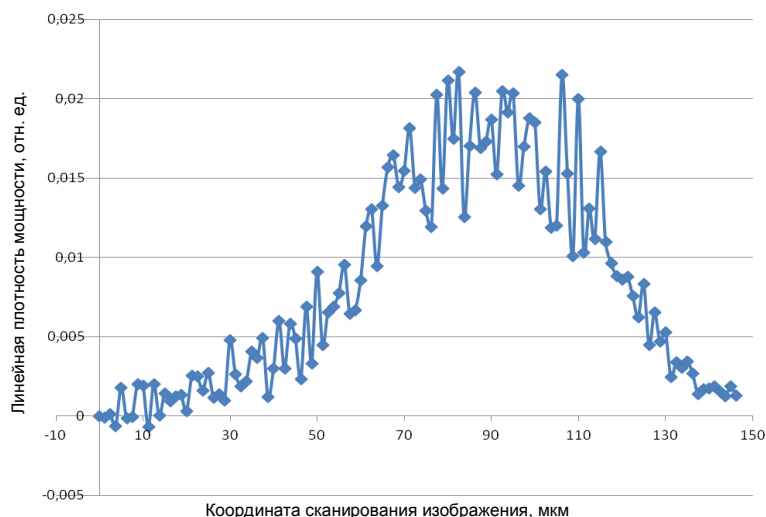


Рис. 4. Зависимость линейной плотности мощности от координаты сканирования.

На рис. 3 приведен экспериментальный график распределения мощности (в долях от полной засветки) на фоточувствительном элементе при сканировании ножом Фуко уменьшенного в пять раз ИК-оптикой изображения сформированного DMD матрицей квадрата размером  $17 \times 17$  пикселей (зеркал). Доработанная под ИК-диапазон DMD-матрица представляет собой матрицу из микрозеркал. Каждое зеркало (пиксель) имеет форму квадрата со стороной 12 мкм. Зеркала плотно упакованы в матрицу (зазоры между зеркалами около 0,5 мкм, шаг зеркал составляет 12,5 мкм). Размерность матрицы –  $1600 \times 1200$  пикселей (зеркал).

На рис. 4 представлен результат численного дифференцирования представленной на рис. 3 зависимости по координате сканирования.

Калибровка устройства производилась с помощью измерителя мощности фирмы Ophir (Nova II (измерительный блок) + 3A (чувствительная головка)). В качестве примера в табл. 3 представлены данные замеров трех различных изображений измерителем мощности фирмы Ophir и описываемым устройством.

Статистический анализ позволил определить, что в собственных единицах устройства среднеквадратичное отклонение не превышает 100 единиц.

### Заключение

Изложены результаты разработки и апробирования высокочувствительного автоматизированного устройства измерения коэффициента концентрации энергии в системах синтеза динамических и статических ИК-изображений. Устройство предназначено для измерения коэффициента концентрации энергии в пятне и его геометрических размеров. Оно измеряет облученность ИК-излучения и передает результаты на внешний ПК по про-

водному соединению, где они преобразуются в удобный для отображения вид. Реализована возможность измерения уровней облученности в широком диапазоне, а именно, от  $10^9$  до  $10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. Погрешность измерения с помощью ножа Фуко размеров пятна, формируемого в плоскости изображения, не превышает единиц мкм.

### ЛИТЕРАТУРА

1. RTB 3000 Detector test bench. – Santa Barbara Infra-red. Heico company. Specification rev. 319 – 000–310.
2. Beasley D. Brett, Bender Matt, Crosby Jay, McCall Sean, Messer Tim, and Saylor Daniel A. Advancements in the Micromirror Array Projector Technology II. – Optical Sciences Corporation. Huntsville, AL 35808.
3. Гибин И. С., Козик В. И., Нежевенко Е. С. // Автометрия. 2013. Т. 49. № 1. С. 80.
4. Гибин И. С., Колесников Г. В. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 3. С. 293.
5. Нужин А. В. Измерение концентрации энергии в малоразмерном изображении. – С.-Пб. Интернет-журнал "ТелеФото Техника" (<http://www.telephototech.ru>), 2009.
6. Осипович И. Р. // Прикладная физика. 2009. № 3. С. 127.
7. Осипович И. Р. Использование автоматизированных средств контроля качества изображения оптических систем для исследования функции концентрации энергии объективов / Труды международной конференции «Прикладная оптика 2012» (Санкт-Петербург, 2012). Секция «Оптическое приборостроение». С. 18–21.
8. <http://npkgoi.ru/?module=articles&c=profil&b=5&a=8>
9. [http://www.ioffeled.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=50&Itemid=104](http://www.ioffeled.com/index.php?option=com_content&view=article&id=50&Itemid=104)
10. <http://www.ibsg.ru/pd.html>
11. <http://www.hamamatsu.com/us/en/product/category/3100/4007/index.html>
12. <http://www.ophiropt.com/laser-measurement/ru/laser-power-energy-meters/products/BeamTrack-Power-Position-Size-Sensors/BeamTrack-Power-Position-Size-Thermal-Sensors>

PACS: 07.57.-с, 07.57.Кр, 07.60.-j

## High-sensitivity device for measuring the energy concentration factor in the synthesis of IR images for testing characteristics of array photodetectors

A. G. Verhoglyad<sup>1</sup>, I. S. Gibin<sup>1,2</sup>, A. G. Elesin<sup>1</sup>, S. N. Makarov<sup>1</sup>, and M. F. Stupak<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (TDI SIE SB RAS)  
41 Russkaya str., Novosibirsk, 630058, Russia  
E-mail: stupak@tdisie.nsc.ru

<sup>2</sup>Institute of Automation and Electrometry,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
1 Akademik Koptyug av., Novosibirsk, 630090, Russia  
E-mail: gibin@iae.nsk.su

Received May 15, 2018

*The results of the development and testing of the high sensitivity of the automated measurement of energy concentration Devices on systems synthesis of dynamic and static IR images in the composition of the test stand control characteristics of array photodetector are described. It is possible to measure the irradiance levels in a wide range of  $10^{-9}$ - $10^{-5}$  W/cm<sup>2</sup>. Error of measurement of the dimensions of an object composed in the image plane array photodetector under test shall not exceed units of  $\mu\text{m}$ .*

*Keywords:* coefficient of energy concentration, array photodetector, measurement of the spatial characteristics of energy concentration, the plane of IR images, precision positioning, control array photodetector characteristics.

### REFERENCES

1. *RTB 3000 Detector test bench*. (Santa Barbara Infrared. Heico company. Specification rev. 319 – 000–310).
2. D. Brett Beasley, Matt Bender, Jay Crosby, Sean McCall, Tim Messer, and Daniel A. Saylor. *Advancements in the Micromirror Array Projector Technology II*. (Optical Sciences Corporation. Huntsville, AL 35808).
3. I. S. Gibin, V. I. Kozik, and E. S. Nezhevenko, *Optoelectron., Instrum. Data Process.* **49** (1), 80, (2013).
4. I. S. Gibin and G. V. Kolesnikov, *Usp. Prikl. Fiz.* **2** (3), 293 (2014).
5. A. V. Nuzhin, S.-Pb. *Internet-zhurnal "TeleFoto Tekhnika"* (<http://www.telephototech.ru>), (2009).
6. I. R. Osipovich, *Prikl. Fiz.* No. 3, 127 (2009).
7. I. R. Osipovich, in *Proc. intern. Conf. "Applied Optics 2012"* (Sankt-Petersburg, 2012). P. 18–21.
8. <http://npkgoi.ru/?module=articles&c=profil&b=5&a=8>
9. [http://www.ioffeled.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=50&Itemid=104](http://www.ioffeled.com/index.php?option=com_content&view=article&id=50&Itemid=104)
10. <http://www.ibsg.ru/pd.html>
11. <http://www.hamamatsu.com/us/en/product/category/3100/4007/index.html>
12. <http://www.ophiropt.com/laser--measurement/ru/laser-power-energy-meters/products/BeamTrack-Power-Position-Size-Sensors/BeamTrack-Power-Position-Size-Thermal-Sensors>