

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАТРИЧНОГО CdHgTe-ФОТОПРИЕМНИКА СРЕДНЕВОЛНОВОГО ИК-ДИАПАЗОНА С РАБОЧЕЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ 160—170 К

И. Ю. ФЁДОРОВ<sup>1</sup>, Е. С. ПОСТНИКОВ<sup>1</sup>, Д. В. ФРОМИЧЕВ<sup>2</sup>, Ю. И. БЕЛОУСОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Корпорация „Комета“ — НПЦ оптоэлектронных комплексов наблюдения,  
194021, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: i\_fedorov@bk.ru

<sup>2</sup>НПП „Восток“, 630049, Новосибирск, Россия

Предложена методика измерений характеристик мегапиксельного инфракрасного матричного фотоприемного устройства средневолнового диапазона и приведены результаты стендовых испытаний его прототипа. Обсуждается возможность использования результатов для построения более сложных оптико-электронных приборов в составе бортовой аппаратуры обнаружения. Результаты измерений таких основных параметров устройства, как динамический диапазон и пороговая чувствительность свидетельствуют о наличии технической возможности достичь предельно высокой чувствительности при температуре охлаждения фоточувствительного слоя не ниже 160—170 К и высокой частоте кадров.

**Ключевые слова:** фотоприемное устройство, ИК-диапазон, КРТ, чувствительность, динамический диапазон.

**Введение.** Охлаждаемое инфракрасное матричное фотоприемное устройство (ИК МФПУ) — важнейшее звено в структуре современной широкопольной тепlopеленгационной аппаратуры. ИК МФПУ на основе видикона не отвечают современным требованиям по надежности, массогабаритным характеристикам, „жесткому“ растру и т.д. Создание бортовой аппаратуры обнаружения космических аппаратов на основе охлаждаемых ИК МФПУ в последнее время было приостановлено, что объясняется малым количеством элементов в матрице [1], недостаточной чувствительностью, большим разбросом значений чувствительности от элемента к элементу.

Современные достижения отечественной микроэлектронной промышленности [2—5] позволяют преодолеть указанные недостатки и создают технические предпосылки к построению перспективных большеформатных матричных ФПУ на основе соединения кадмий-ртуть-теллур (КРТ).

Уровень разработок КРТ-ИК МФПУ средневолнового диапазона (от 2,5 до 5 мкм) позволяет осуществлять их массовое производство с предельно высокими параметрами [6]. Однако для решения многих задач дистанционного зондирования Земли из космоса требуется создание ИК МФПУ качественно более высокого уровня. В частности, при сохранении предельно высокой чувствительности необходимо обеспечить рабочую температуру устройства не ниже 160—170 К путем реализации радиационной системы охлаждения. При сохранении высокой частоты кадров требуется изготовить мегапиксельные матрицы, не прибегая к их формированию из матриц меньшего формата.

В отечественной промышленности завершается создание такого МФПУ. Самостоятельную задачу, нуждающуюся в анализе и подтверждении результатов, представляют процедуры измерения и оценки параметров мегапиксельного ИК МФПУ как функционального блока оптико-электронного канала.

**Условия проведения исследования.** В качестве объекта исследования было выбрано матричное ФПУ с числом элементов  $320 \times 256$ , изготовленное НПП „Восток“ (Новосибирск) на основе соединения КРТ и имеющее область чувствительности в диапазоне 2—5 мкм. МФПУ состоит из вакуумированного криостатированного корпуса с расположенной в нем матрицей фоточувствительных элементов и электронной схемой считывания.

Исследование проводилось на „теплом“ широкопольном ИК-коллиматоре при фокусировке на фоточувствительную плоскость МФПУ изображения точечного объекта с концентрацией энергии не менее 70 % в кружке диаметром 30 мкм. Применяемая технологическая система обеспечивала охлаждение корпуса ФПУ до 232 К, а фоточувствительных элементов — до 162 К; температура оптической системы 293 К.

**Измерение динамического диапазона.** Результаты исследования динамического диапазона для двух точек (1 и 2) МФПУ представлены соответственно на рис. 1, а, б, где приведены построенные зависимости среднего значения отклика ( $q$ ), чувствительности ( $S$ ) и концентрации энергии ( $E$ ) в элементе МФПУ от изменения потока ИК-излучения ( $\Phi$ ), падающего на входной зрачок оптической системы, в диапазоне от  $1,01 \cdot 10^{-15}$  до  $2,63 \cdot 10^{-12}$  Вт/см<sup>2</sup>. Под концентрацией энергии понимается доля суммарного отклика, приходящегося на центральный элемент (пиксел, на который фокусируется излучение).

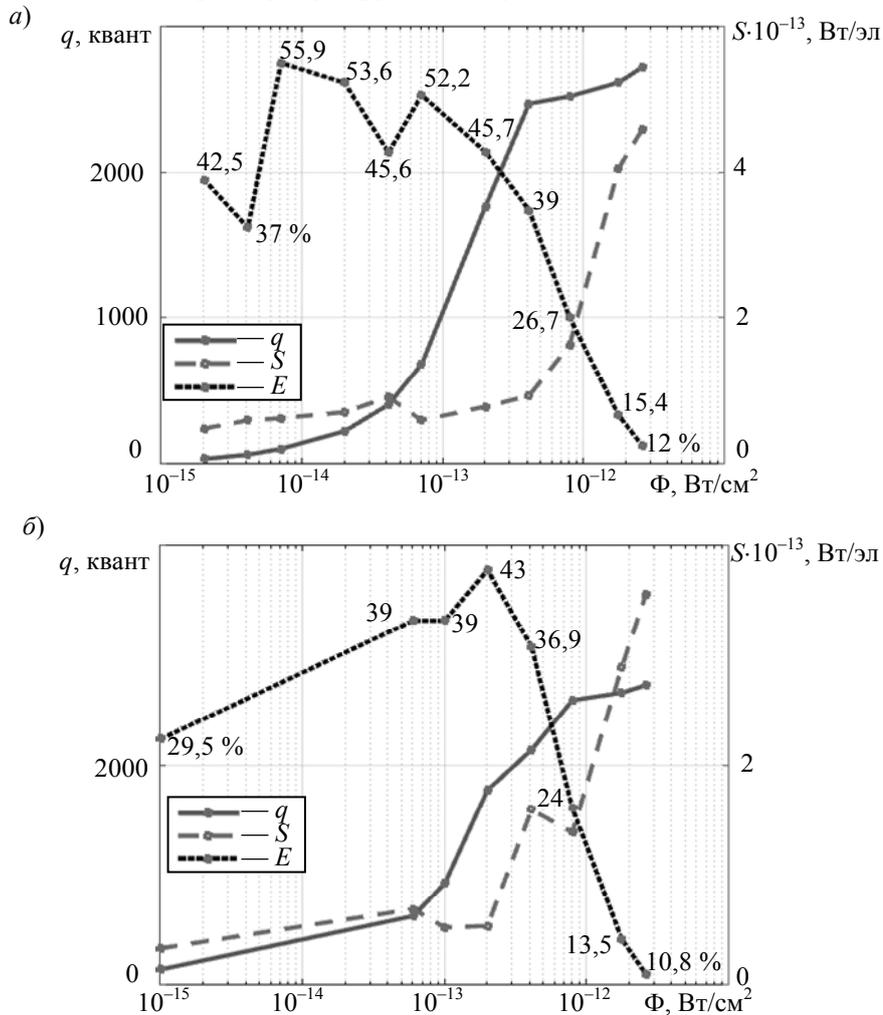


Рис. 1

Методика измерений содержит следующие этапы:

1) измерение темнового выходного сигнала выбранного недефектного элемента и вычисление среднеквадратического отклонения (СКО) флуктуационного шума ( $\sigma$ ) при перекрытом оптическом канале ИК-коллиматора;

2) определение минимального потока ИК-излучения ( $\Phi_{\min}$ ) в плоскости входного зрачка оптической системы, при воздействии которого значение отклика элемента МФПУ и чувствительности ( $S_1$ ) наиболее близко к СКО шума ( $10\sigma$ ), при этом фотозатвор коллиматора с установленной маской, формирующей изображение точечного объекта на фоточувствительной плоскости ФПУ, открыт;

3) измерение входного сигнала для определения максимального потока ИК-излучения ( $\Phi_{\max}$ ) путем изменения величины потока „точечной засветки“, после прохождения которого отклик выходного сигнала ФПУ и чувствительность ( $S_2$ ) перестают расти;

4) вычисление входного ( $D_{\text{вх}}$ ) и выходного ( $D_{\text{вых}}$ ) динамического диапазона.

На рис. 1, а, б можно отметить две области — до значений  $\Phi \approx 4,13 \cdot 10^{-13}$  Вт/см<sup>2</sup> и после. Первая область характеризуется примерно постоянным значением чувствительности в точках 1 и 2 на уровне  $6,57 \cdot 10^{-14}$  и  $5,08 \cdot 10^{-14}$  Вт/эл соответственно. Во второй области значения  $S$  и  $E$  с ростом потока излучения заметно ухудшаются.

Расчет динамического диапазона производился по формулам

$$D_{\text{вх}} = 0,9\Phi_{\max}/\Phi_{\min},$$

$$D_{\text{вых}} = (S_2 - S_1)/\sigma.$$

Рассчитанные значения динамического диапазона ИК МФПУ сведены в табл. 1.

Таблица 1

Точка	$D_{\text{вх}}$	$D_{\text{вых}}$
1	4280	302
2	4150	615

**Измерение пороговой чувствительности.** Результаты исследования пороговой чувствительности МФПУ при наблюдении неподвижного точечного объекта приведены в табл. 2.

Таблица 2

Координаты элемента по оси		$S \cdot 10^{-14}$ , Вт/эл
$X$	$Y$	
177	105	10,5
254	32	8,33
112	50	6,21
41	126	5,32
203	219	5,57
255	150	3,87

Методика измерений включает следующие этапы:

- 1) этап аналогичен 1-му этапу методики измерений динамического диапазона;
- 2) фокусировка изображения, сформированного в центре выбранного недефектного элемента, и измерение сигнала при  $\Phi = 7,11 \cdot 10^{-14}$  Вт/см<sup>2</sup>;
- 3) определение пороговой чувствительности выбранных элементов.

Среднее значение пороговой чувствительности МФПУ при наблюдении неподвижного точечного объекта составляет  $S_{\text{н}} = 6,63 \cdot 10^{-14}$  Вт/эл; СКО пороговой чувствительности  $1,94 \cdot 10^{-14}$  Вт/эл. Расчетное значение неравномерности распределения чувствительности, выполненное по всем измерениям, — 133 %.

Для определения пороговой чувствительности МФПУ при наблюдении движущегося точечного объекта ( $S_{\text{дв}}$ ) были проведены аналогичные измерения для различных начальных положений объекта. На рис. 2 показан один из вариантов изменения (смещения) максимального отклика ( $\Delta q_Y$ ) в элементе по заданной траектории в течение первых 1,5 с; период следования одного кадра примерно 34 мс ( $N$  — номер кадра). График изменения пороговой чувствительности и максимального отклика в кадре приведен на рис. 3.

При угловой скорости движения точечного объекта по фоточувствительной поверхности МФПУ в широкопольном оптико-электронном канале, равной  $0,03^\circ/\text{с}$ ,  $\bar{S} = 1,0 \cdot 10^{-13}$  Вт/эл. При этом среди локальных максимумов среднее значение  $S_{\text{дв}} = 1,42 \cdot 10^{-13}$  Вт/эл, а среди локальных минимумов —  $7,41 \cdot 10^{-14}$  Вт/эл, т.е. за время движения объекта способность МФПУ к обнаружению ухудшается примерно в 2 раза, что обусловлено формой его пеленгационной характеристики.

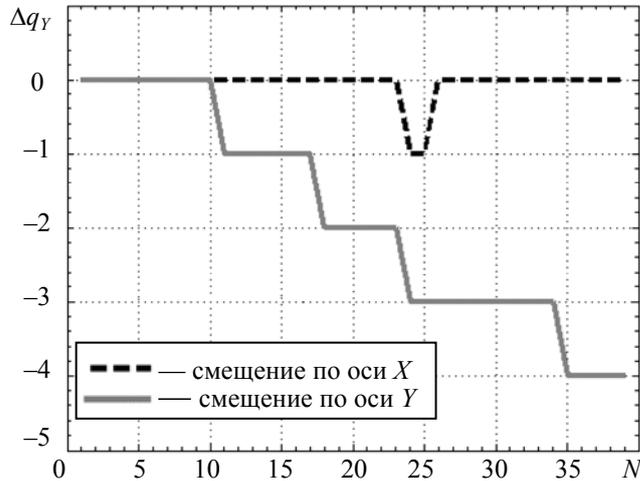


Рис. 2

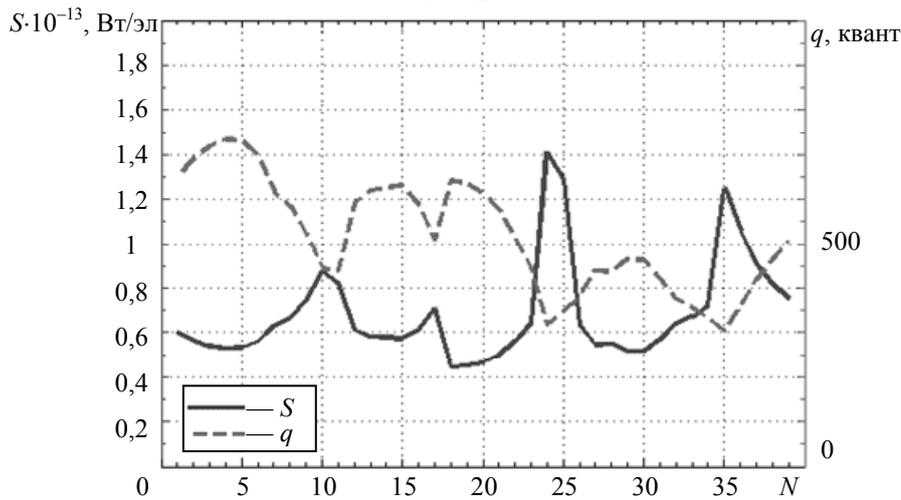


Рис. 3

Возможность получения „слабо“ нагретых тепловизионных изображений продемонстрирована на рис. 4.



Рис. 4

**Заключение.** Представлена методика измерения динамического диапазона и пороговой чувствительности МФПУ при регистрации изображений неподвижного точечного объекта и объекта, движущегося по фоточувствительной поверхности устройства с постоянной угловой

скоростью. Как показывают результаты исследования, при отсутствии глубокого охлаждения матричного ИК ФПУ на основе КРТ достижимое значение пороговой чувствительности при неподвижном объекте составляет  $6,63 \cdot 10^{-14}$  Вт/эл, а при движущемся объекте примерно в 1,5—2 раза хуже, что обуславливается формой пеленгационной характеристики ИК МФПУ.

Результаты исследования характеристик представленного образца матричного ФПУ, работающего в диапазоне 2—5 мкм, показывают также, что реализованный НПП „Восток“ технологический цикл изготовления фоточувствительных слоев позволяет обеспечить в перспективе выпуск крупноформатных ИК-матриц КРТ, не требующих глубокого охлаждения и применимых для широкопольной тепlopеленгационной космической аппаратуры.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев В. В., Варавин В. С. и др. Формирование фотодиодов на основе n-HgCdTe имплантацией As<sup>+</sup> // Прикладная физика. 2007. № 2. С. 97—100.
2. Стафеев В. И., Болтарь К. О. и др. Матричные фотоприемные устройства среднего и дальнего инфракрасных диапазонов спектров на основе дотодиодов из Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te // Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39, вып. 10. С. 1257—1265.
3. Стафеев В. И. Структура и свойства контактов Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te – металл // Физика и техника полупроводников. 2009. Т. 43, вып. 5. С. 636—639.
4. Якушев М. В., Бабенко А. А., Варавин В. С. и др. Структурные и электрофизические свойства гетероэпитаксиальных пленок HgCdTe, выращенных методом МЛЭ на подложках Si(310) // Прикладная физика. 2007. № 4. С. 108—114.
5. Арутюнов В. А., Богатыренко Н. Г. и др. Цифровой ИК оптико-электронный модуль для диапазона 3—5 мкм // Материалы 7-й науч.-техн. конф. „Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли“. М., 2010. С. 269—270.
6. Рогальский А. Инфракрасные детекторы. Новосибирск: Наука, 2003. 636 с.

*Сведения об авторах*

- Игорь Юрьевич Фёдоров** — канд. физ.-мат. наук; Корпорация „Комета“ — НПЦ ОЭКН; ст. научный сотрудник; E-mail: i\_fedorov@bk.ru
- Евгений Станиславович Постников** — канд. физ.-мат. наук; Корпорация „Комета“ — НПЦ ОЭКН; ст. научный сотрудник; E-mail: werrus@yandex.ru
- Дмитрий Васильевич Фромичев** — НПП „Восток“; ведущий инженер; E-mail: gnomsfamily@mail.ru
- Юрий Иванович Белоусов** — д-р техн. наук, профессор; Корпорация „Комета“ — НПЦ ОЭКН; заместитель директора по научной работе; E-mail: werrus@yandex.ru

Рекомендована  
НПП „Восток“

Поступила в редакцию  
13.05.15 г.

**Ссылка для цитирования:** Фёдоров И. Ю., Постников Е. С., Фромичев Д. В., Белоусов Ю. И. Исследование характеристик матричного CdHgTe-фотоприемника средневолнового ИК-диапазона с рабочей температурой 160—170 К // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 1. С. 79—84.

**STUDY OF CHARACTERISTICS OF MATRIX CdHgTe-PHOTO DETECTOR FOR MEDIUM IR-RANGE WITH OPERATING TEMPERATURE OF 160—170 K**

**I. Yu. Fedorov<sup>1</sup>, E. S. Postnicov<sup>1</sup>, D. V. Fromichev<sup>2</sup>, Yu. I. Belousov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Scientific Design Center Optoelectronic Surveillance Systems, the Branch of Corporation “Cometa”, 194021, St. Petersburg, Russia  
E-mail: i\_fedorov@bk.ru

<sup>2</sup> Scientific Production Enterprise “Vostok”, 630049, Novosibirsk, Russia

A method is proposed for measuring megapixel MWIR photodetector. Results of bench testing of prototype photodetector are presented. The possibility of application of the results to development of optoelectronic devices for on-board detection complex is discussed. The results of measurements of basic parameters of the photodetector (dynamic range and sensitivity threshold) indicate technical possibility to obtain extremely high sensitivity with cooling the photosensitive layer down to the temperature not lower than 160—170 K and at high frame rate.

**Keywords:** photodetector, IR, CdHgTe, sensitivity, dynamic range.

**Data on authors**

- |                            |   |
|----------------------------|---|
| <b>Igor Yu. Fedorov</b>    | — PhD; Corporation “Cometa” — SDC OESS; Senior Scientist; E-mail: i_fedorov@bk.ru                             |
| <b>Evgeny S. Postnicov</b> | — PhD; Corporation “Cometa” — SDC OESS; Senior Scientist; E-mail: werrus@yandex.ru                            |
| <b>Dmitry V. Fromichev</b> | — JSC SPE “Vostok”; Leading Engineer; E-mail: gnomsfamily@mail.ru   |
| <b>Yury I. Belousov</b>    | — Dr. Sci., Professor; Corporation “Cometa” — SDC OESS; Deputy Director for Science; E-mail: werrus@yandex.ru |

**For citation:** Fedorov I. Yu., Postnicov E. S., Fromichev D. V., Belousov Yu. I. Study of characteristics of matrix CdHgTe-photodetector for medium IR-range with operating temperature of 160-170 K // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie. 2016. Vol. 59, N 1. P. 79—84 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-1-79-84