

УДК 53.083

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТНО-КОНТРАСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИК-ОБЪЕКТИВА

© В. В. Васильев, А. В. Вишняков, Г. Ю. Сидоров, В. А. Стучинский

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13
E-mail: stuchin@isp.nsc.ru*

Предложен метод определения частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) инфракрасного (ИК) объектива. Излучение выходной щели монохроматора с определённой длиной волны фокусировалось с помощью исследуемого объектива в виде длинной узкой освещённой полоски на холодном металлическом экране с апертурной щелью. Применение щелевой измерительной апертуры вместо точечной для сканирования изображения источника позволило увеличить полезный сигнал и использовать в качестве источника излучения выходную щель монохроматора. Вместо одиночного ИК-детектора с малой фоточувствительной площадью использовался апертурированный матричный ИК-фотоприёмник. С помощью средне- и длинноволновых фотоприёмных матриц формата 320×256 на основе выращенных с применением молекулярно-лучевой эпитаксии слоёв материала кадмий—ртуть—теллур были измерены функции рассеяния линии и ЧКХ ИК-объективов средне- и длинноволнового ИК-диапазонов спектра. Дано сравнение экспериментальных результатов с дифракционной ЧКХ изученных объективов.

Ключевые слова: характеристика ИК-объективов, материал кадмий—ртуть—теллур (КРТ), функция рассеяния линии (ФРЛ — LSF, Line spread function), частотно-контрастная характеристика (ЧКХ — MTF, Modulation transfer function), матричные ИК-фотоприёмники.

DOI: 10.15372/AUT20220305

Введение. Объективы являются важной частью инфракрасных (ИК) тепловизоров [1–3]. Совместно с фотоприёмной матрицей они определяют качество всего устройства: уровень сигнала фотодиодов в фотоприёмной матрице, температурное и пространственное разрешение. Частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) объектива входит как множитель в полную ЧКХ ИК-камеры. Частотно-контрастная характеристика реального объектива определяется дифракцией на его апертуре, а также величиной aberrаций [4]. Исследователям и разработчикам фотоприёмных матриц очень важно уметь прогнозировать и характеризовать их качество, в частности ЧКХ, для того чтобы можно было обеспечить высокое пространственное разрешение ИК-камеры в целом [5–9].

Частотно-контрастную характеристику фотоприёмной матрицы можно найти по измеренным полной ЧКХ ИК-камеры и ЧКХ объектива. Наиболее простой способ измерения состоит в использовании мир с яркостью, синусоидально меняющейся вдоль пространственной координаты. Анализ изображения позволяет определить коэффициент модуляции в зависимости от пространственной частоты мира. В других методах измерения используется тот факт, что ЧКХ объектива определяется преобразованием Фурье измеренной функции рассеяния линии (ФРЛ). Для измерения функции рассеяния точечного объекта можно использовать детектор ИК-излучения с апертурой меньше размера пятна Эйри и нужного спектрального диапазона с освещением от абсолютно чёрного тела (АЧТ) [10, 11]. Излучение АЧТ при необходимости может быть пропущено через оптический фильтр с нужной полосой пропускания.

Для проведения измерений на разных длинах волн в данной работе использовалось излучение монохроматора. Это более удобный способ, чем применение полосовых оптических фильтров, однако интенсивность квазимонохроматического излучения монохроматора сильно уступает интенсивности излучения АЧТ с оптическим фильтром; поэтому для увеличения измеряемого сигнала предпочтительнее использовать детекторы с линейной щелевой апертурой вместо точечной (из-за её большей площади) [12]. Точечный сенсор (детектор с малой площадью) можно при этом заменить обычным матричным ИК-фотоприёмником.

Изображение выходной щели монохроматора фокусируется в фокальной плоскости объектива в виде размытой освещённой полосы, ориентированной параллельно измерительной апертурной щели в металлическом экране. Если ширина апертурной щели меньше ширины пятна Эйри, то, перемещая изображение узкой выходной щели монохроматора относительно щелевой апертуры фотоприёмника и измеряя при этом суммарный фотосигнал пикселей в рядах пикселей матрицы, перпендикулярных апертурной щели, как функцию положения пятна засветки, можно измерить распределение интенсивности освещения в изображении выходной щели монохроматора. Если щель монохроматора является достаточно узкой, то измеренное распределение интенсивности освещения с хорошей точностью даёт ФРЛ объектива. Суммирование сигналов пикселей используется здесь из-за дифракционного расхождения излучения за апертурной щелью; после суммирования измеренный суммарный сигнал пикселей за апертурной щелью оказывается пропорциональным полному потоку излучения, прошедшему через щель. Наличие охлаждаемого металлизированного экрана, помещённого на фотоприёмную матрицу, приводит к значительному уменьшению фоновой засветки матрицы, что позволяет увеличить время накопления, вследствие чего увеличивается и детектируемый сигнал от излучения, проходящего через апертурную щель. Метод даёт возможность осуществлять измерения на разных длинах волн, что позволяет исследовать изменения ФРЛ и ЧКХ объектива с длиной волны, а значит, и хроматические аберрации в объективах.

Описание метода измерений. На рис. 1 показана использованная в представленной работе схема измерений. В качестве первичного источника ИК-излучения применялось

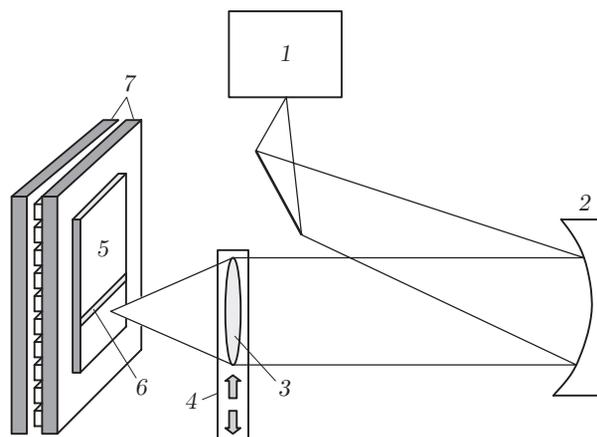


Рис. 1. Схема измерений: 1 — монохроматор, 2 — внеосевой коллиматор, 3 — исследуемый объектив, 4 — управляемый компьютером координатный столик, 5 — металлический экран на кремниевой подложке, 6 — протравленная в металлическом экране апертурная щель, 7 — охлаждаемая ИК фотоприёмная матрица средне- или длинноволнового диапазона ИК-спектра формата 320 × 256 с шагом пикселей 30 мкм

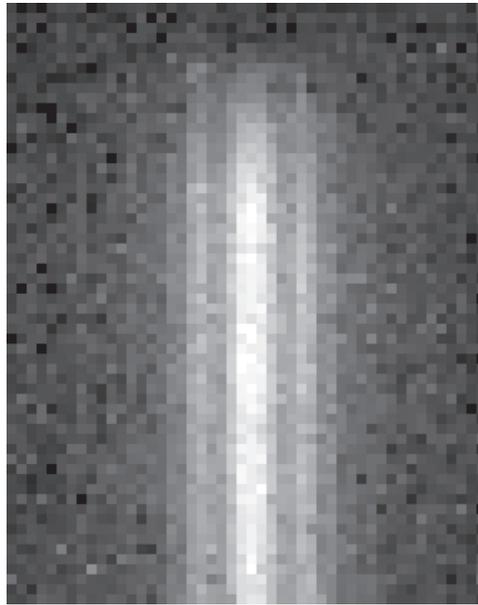


Рис. 2. Распределение фотосигнала диодов фотоприёмной матрицы по её площади за апертурной щелью шириной 7 мкм. Длина волны излучения — 8 мкм, шаг матрицы — 30 мкм

АЧТ с температурой 500–950 °С. Из спектра излучения АЧТ с помощью монохроматора вырезалось излучение в полосе шириной $\Delta\lambda < 5$ нм. Таким образом, вторичным источником квазимонохроматического излучения являлась выходная щель монохроматора шириной 0,04–0,1 мм и высотой 20 мм. С помощью внеосевого параболического зеркала, используемого в качестве коллиматора, излучение направлялось на исследуемый объект, в фокальной плоскости которого находилась охлаждаемая кремниевая подложка с алюминиевым экраном и протравленными в нём щелевыми апертурами шириной от 5 до 30 мкм. Сразу за кремниевой подложкой расположена диодная фотоприёмная матрица средне- или длинноволнового ИК-диапазона формата 320×256 с шагом пикселей 30 мкм [13, 14]. Настройка положения апертуры фотоприёмника на фокальную плоскость объектива осуществлялась по резкости регистрируемого изображения щели монохроматора. Толщина кремниевой подложки фотоприёмной матрицы, как и толщина кремниевой подложки апертурной диафрагмы, составляла 400 мкм. Слой металлизации апертурной диафрагмы находился с внешней стороны кремниевой пластины (т. е. со стороны, противоположной поверхности её контакта с кремниевой подложкой фотоприёмной матрицы). Исследовались ИК-объективы средневолнового ИК-диапазона с фокальным числом 2,35 и длинноволнового ИК-диапазона с фокальным числом 2.

Как видно из рис. 2, на котором показано распределение фотосигналов диодов по площади фотоприёмной матрицы за апертурной щелью шириной 7 мкм, в случае узких апертурных щелей проходящее через щель излучение заметно дифрагирует в области за щелью, рассеиваясь по нескольким пикселям поперёк щели. При перемещении изображения выходной щели монохроматора поперёк измерительной апертуры сигналы на отдельных пикселях изменяются синхронно, одновременно проходя через максимум. Для регистрации полного потока излучения, проходящего через апертуру фотоприёмника, использовалось суммирование сигналов пикселей в строке, перпендикулярной измерительной апертуре, что увеличивает отношение сигнал/шум при измерениях. Суммирование фотосигналов диодов в пикселях нескольких строк позволяет ещё больше увеличить полезный сигнал по сравнению с шумом, однако возможное наличие ненулевого угла между изображением

выходной щели монохроматора и апертурной щелью фотоприёмника может приводить к уширению профиля сканирования. Влияния этого уширения на ЧКХ можно избежать, если вычислять ЧКХ отдельно для каждой строки и затем усреднить результат по строкам.

Следует дополнительно отметить следующие особенности предлагаемого метода характеристики ЧКХ ИК-объективов посредством проведения апертурированных многопиксельных измерений.

1) Хотя для проведения измерений желательно выбирать участок площади фотоприёмной матрицы с малой величиной геометрического шума (так как при этом увеличивается отношение сигнал/шум), коррекция чувствительности матрицы по её площади в предлагаемом методе не является принципиально необходимой, поскольку требуется обеспечить лишь пропорциональное изменение суммарного фотосигнала задействованных пикселей регистрируемому потоку излучения.

2) Монтирование пластинки с металлизацией на подложке матрицы, в принципе, может быть произвольным (из-за трудности совмещения массива диодов матрицы с апертурной щелью), т. е. ближайший к апертурной щели параллельный ряд диодов матрицы не обязательно должен быть смещён с центром щели. Однако ориентация рядов диодов параллельно апертурной щели должна быть выдержана как можно более точно.

Фурье-преобразование измеренной ФРЛ даёт одномерную ЧКХ объектива в направлении, перпендикулярном щелям монохроматора и фотоприёмника. При определении ЧКХ необходимо учесть геометрическую протяжённость источника, т. е. конечную ширину щели монохроматора. Внесение соответствующей поправки состоит в делении ЧКХ, найденной для источника конечного размера, на фурье-образ функции, которая описывает протяжённость источника. Аналогичным образом может быть вычислена также и поправка на конечную ширину апертурной щели фотоприёмника:

$$\frac{1}{\Delta} \int_{-\Delta/2}^{\Delta/2} \cos(2\pi f x) dx = \frac{\sin(\pi f \Delta)}{\pi f \Delta},$$

где f — пространственная частота, а Δ — ширина апертурной щели. Для $\Delta = 5$ мкм и $f = 33$ штр/мм этот множитель даёт поправку примерно в 5 %. Вклад в ЧКХ от конечной ширины выходной щели монохроматора выражается аналогично, где Δ — ширина изображения выходной щели монохроматора. Соответствующий вклад также оказывается малым.

Следует отметить, что искажения данных, вызванные ЧКХ тракта обработки сигналов, в результатах настоящей работы не учитывались. Искажения от других элементов оптической системы, в частности от параболического зеркала, также предполагались пренебрежимо малыми.

Результаты и их обсуждение. Нормированное распределение интенсивности излучения на длине волны $\lambda = 4$ мкм в пятне засветки, сфокусированном с помощью исследованного средневолнового ИК-объектива, приведено на рис. 3, a , b (в линейном и логарифмическом масштабе соответственно). При измерениях ширина выходной щели монохроматора была равной 0,04 мм (фактор переноса изображения 7,62), а ширина апертурной щели фотоприёмника — 5 мкм. Сплошной кривой показана ФРЛ объектива, LSF_{dif} , определяемая дифракцией излучения на исследованном объективе на длине волны $\lambda = 4$ мкм; данная ФРЛ была получена интегрированием функции Эйри в фокальной плоскости объектива:

$$LSF_{\text{dif}}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} I_{\text{Airy}}(\sqrt{x^2 + y^2}) dy, \quad I_{\text{Airy}}(r) = 4 \frac{J_1(\pi r / (\lambda F_{\#}))^2}{\pi r / (\lambda F_{\#})}$$

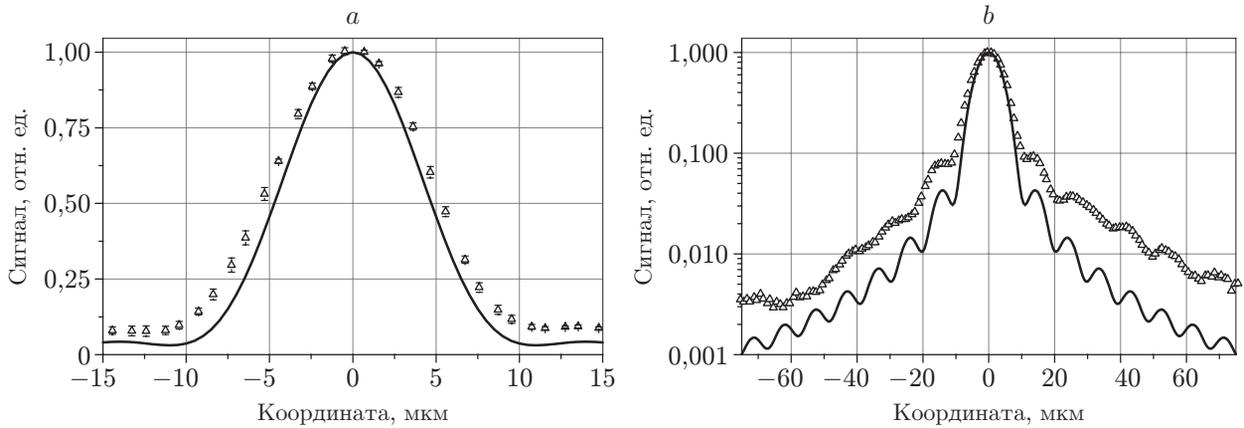


Рис. 3. Измеренный профиль сканирования изображения выходной щели монохроматора (ФРЛ) для изученного средневолнового ИК-объектива: *a* — линейный и *b* — логарифмический масштабы соответственно. Длина волны излучения — 4 мкм, ширина выходной щели монохроматора — 0,04 мм, апертурная щель — 5 мкм. Сплошной кривой показан дифракционный предел, символами — экспериментальные данные

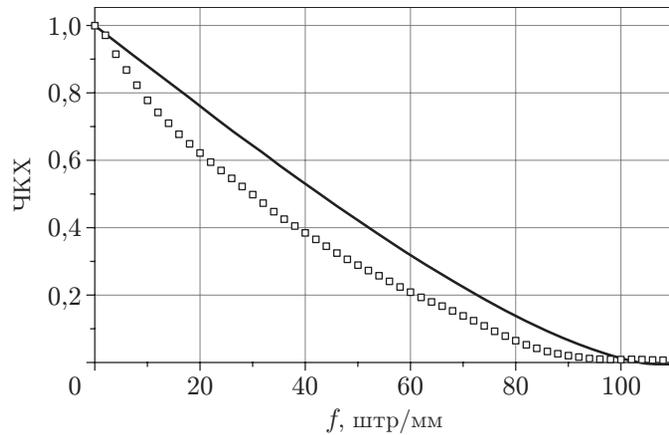


Рис. 4. Частотно-контрастная характеристика изученного средневолнового ИК-объектива, полученная из экспериментальных данных рис. 3 (символы). Сплошной кривой показан дифракционный предел для $\lambda = 4$ мкм, $F_{\#} = 2,35$

(здесь J_1 — функция Бесселя первого рода, а $F_{\#}$ — фокальное число).

На рис. 4 приведена ЧКХ, полученная из данных рис. 3. Также показана ЧКХ, определяемая дифракцией света на объективе:

$$MTF_{dif}(f) = \left| \frac{2}{\pi} \arccos \left(\frac{f}{f_{cutoff}} \right) - \frac{f}{f_{cutoff}} \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_{cutoff}} \right)^2} \right|,$$

где $f_{cutoff} = 1/(\lambda F_{\#})$ [10, 15].

Частотно-контрастная характеристика объектива должна находиться ниже дифракционной ЧКХ и обращаться в ноль при частоте $f > f_{cutoff}$, выше которой в экспериментальной ЧКХ наблюдается небольшой сигнал ($< 0,02$), причиной которого являются шум сигнала на пикселях и погрешность установления позиции координатного столика.

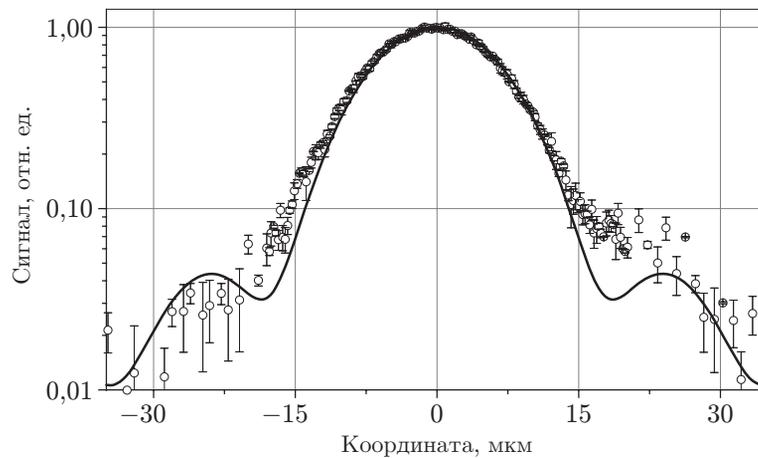


Рис. 5. Измеренный профиль сканирования изображения выходной щели монохроматора для изученного длинноволнового ИК-объектива. Длина волны излучения — 8 мкм. Сплошной кривой показан дифракционный предел ЧКХ, символами — экспериментальные данные

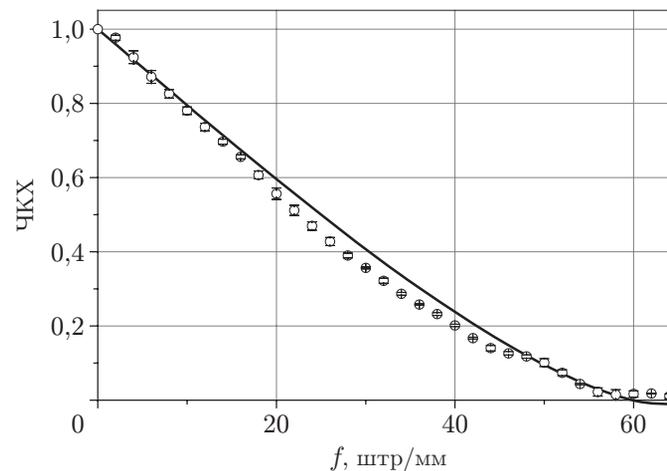


Рис. 6. Частотно-контрастная характеристика изученного длинноволнового ИК-объектива, полученная из данных рис. 5. Длина волны излучения 8 мкм. Сплошной кривой показан дифракционный предел, символами — экспериментальные данные

Аналогичным образом по описанной методике были проведены измерения ЧКХ объектива для длинноволнового ИК-спектра. На рис. 5 показано измеренное распределение интенсивности излучения в изображении выходной щели монохроматора, полученном с применением длинноволнового ИК-объектива с фокальным числом 2. Длина волны излучения в соответствующем эксперименте была равна 8 мкм, ширина выходной щели монохроматора — 0,06 мм, а ширина апертурной щели фотоприёмника — 7 мкм. Сплошной кривой показана ФРЛ, определяемая дифракцией света на объективе и полученная интегрированием интенсивности пятна Эйри на длине волны $\lambda = 8$ мкм.

На рис. 6 показана ЧКХ длинноволнового объектива, полученная из данных рис. 5. Частотно-контрастная характеристика длинноволнового ИК-объектива находится гораздо ближе к дифракционному пределу, чем ЧКХ средневолнового ИК-объектива. По всей видимости, это связано с тем, что с ростом длины волны излучения дифракция становится

более выраженной и, следовательно, влияние aberrаций — относительно менее существенным.

Заключение. В представленной работе предлагается простой и удобный способ измерения ЧКХ ИК-объективов. Для увеличения плотности излучения на фотоприёмнике в качестве сканируемого ИК-пятна используется изображение выходной щели монохроматора, спроецированное исследуемым объективом на охлаждаемый металлический экран с апертурной щелью. Спектральный диапазон метода определяется возможностями применяемого монохроматора, температурой АЧТ и спектральной чувствительностью фотоприёмной матрицы. Другой отличительной особенностью метода является использование в качестве фотоприёмника фотоприёмной матрицы на основе выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии слоёв КРТ для средне- или длинноволнового ИК-диапазона спектра.

Дано сравнение полученных ЧКХ исследованных объективов с рассчитанными для этих объективов дифракционными ЧКХ. Отклонения экспериментальных значений ЧКХ от расчётных укладываются в диапазон 20 и 5 % для средне- и длинноволнового ИК-диапазона спектра соответственно. С увеличением длины волны излучения ЧКХ объективов приближается к дифракционному пределу. Этот результат представляется естественным, поскольку, по мере того как с ростом длины волны излучения дифракция становится более выраженной, относительный вклад в ЧКХ от aberrаций становится менее существенным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Госсорг Ж.** Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. М.: Мир, 1988. 416 с.
2. **Васильченко Н. В.** Системы тепловидения. М.: Мир, 1978. 414 с.
3. **Hudson R.** Infrared Systems. Moscow: Mir, 1972. 535 p.
4. **Криксунов Л. З.** Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Сов. радио, 1978. 400 с.
5. **Cabanski W., Breiter R., Mauk K.-H. et al.** Miniaturized high-performance staring thermal imaging system // Proc. of SPIE. 2000. **4028**. 12 p.
6. **Лазарев П. С., Мазин М. Г., Сидорин А. В. и др.** Термографический прибор для контроля движущихся объектов // Прикладная физика. 2012. № 4. С. 107–110.
7. **Schreer O., López Sáenz M., Peppermüller Ch., Schmidt U.** Dual-band camera system with advanced image processing capability // Proc. of SPIE. 2007. **6542**. 65421C. DOI: 10.1117/12.725273.
8. **Горелик Л. И., Полесский А. В.** Двухпольный тепловизионный прибор на основе панорамного оптического тракта // Прикладная физика. 2010. № 1. С. 105–108.
9. **Userell W.** Image Quality Assessment // Design of Optical Systems. Ed. by R. Shannon and J. Vyant. Moscow: Mir, 1983. 430 p.
10. **Berthoz J., Grille R., Rubaldo L. et al.** Modeling and characterization of MTF and spectral response at small pitch on mercury cadmium telluride // Journ. Electron. Mater. 2015. **44**, N 9. P. 3157–3162. DOI: 10.1007/s11664-015-3857-7.
11. **Martineau L., Rubaldo L., Chabuel F., Gravrand O.** MTF optimization of MCT detectors // Proc. of SPIE. 2013. **8889**. 88891B.
12. **Vernier A., Perrin B., Avignon T. et al.** Measurement of the Modulation Transfer Function (MTF) of a camera lens // Proc. of the Conference of Education and Training in Optics and Photonics (ETOP). Bordeaux, France, June 29 — July 2, 2015. TPE28.

13. **Предеин А. В., Сидоров Ю. Г., Сабина И. В. и др.** Высококачественные длинноволновые инфракрасные матричные ФПУ формата 320×256 элементов на основе слоёв CdHgTe, выращенных методом МЛЭ // Автометрия. 2013. **49**, № 5. С. 78–85.
14. **Varavin V. S., Vasiliev V. V., Dvoretzky S. A. et al.** 320×256 HgCdTe IR FPA with a built-in shortwave cut-off filter // Opto-Electron. Rev. 2010. **18**, N 3. P. 236–240.
15. **Berthoz J., Rubaldo L., Brunner A. et al.** Range infrared detector issues in the SWAPc and pitch reduction context // Proc. of SPIE. 2020. **11407**. 1140715. DOI: 10.1117/12.2561306.

Поступила в редакцию 29.03.2022

После доработки 13.04.2022

Принята к публикации 19.04.2022
