

УДК 621.383.4, 681.786, 681.787
 EDN: ZQKJGI

PACS: 85.60.Dw, 42.79.-e

Ограничения стандартных подходов при изготовлении широкоформатных охлаждаемых фотоприемных устройств следующих поколений на основе HgCdTe

© А. Р. Новоселов*, П. А. Алдохин, К. П. Шатунов

Филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН «КТИПМ»,
 г. Новосибирск, 630090 Россия
 * E-mail: novoselov@oesd.ru

Статья поступила в редакцию 19.01.2026; после доработки 26.01.2026; принята к публикации 20.02.2026
 Шифр научной специальности: 2.2.6

Проведён анализ основных сдерживающих факторов увеличения формата охлаждаемых гибридных фотоприёмных устройств (ФПУ). Таких как не плоские формы поверхностей кремниевых мультиплексов (БИС) и массива фоточувствительных элементов (ФЧЭ), и их разное изменение размеров при охлаждении ФПУ до рабочих температур. Рассмотрено влияния уровня развития технологии изготовления БИС и ФЧЭ, а так же оптической системы ФПУ на увеличения его формата. Выяснено, что основными сдерживающими факторами увеличения формата охлаждаемых ФПУ на основе HgCdTe являются разное изменение размеров БИС и ФЧЭ при охлаждении ФПУ до рабочих температур и наиболее значимым не плоские формы поверхностей БИС и ФЧЭ. Предложено решение увеличения формата охлаждаемых фотоприёмников использованием нескольких БИС и ФЧЭ меньшей площади, установленных в стык друг к другу, что снимает выявленные ограничения при изготовлении широкоформатных охлаждаемых фотоприёмников.

Ключевые слова: охлаждаемые ИК фотоприёмные устройства, форма поверхности приборных пластин, термоциклирование, оптическая система.

DOI: 10.51368/2307-4469-2026-14-1-78-88

Введение

Применение приборов контроля тепловых полей в инфракрасном (ИК) спектральном диапазоне достаточно широкое – это астрономия, медицина, научные исследования. Одним из основных узлов такого тепловизионного прибора является гибридное фотоприёмное устройство (ФПУ), которое осуществляет преобразование оптического ИК излучения от объектов наблюдения в электрические сигналы.

ФПУ может быть выполнено как на одной кремниевой микросхеме [1], так и в гибридном исполнении, состоящее из двух микросхем: массива фоточувствительных элементов (ФЧЭ) и кремниевого мультиплексора (БИС) [2]. Пре-

имущественно ФЧЭ – это массив *p-n*-переходов, сформированных в разных объёмных или плёночных полупроводниковых материалах (например, HgCdTe, InAs). Плёночные полупроводниковые материалы выращиваются на приборных пластинах-подложках, например Ge, Si, GaAs или CdZnTe. При большом количестве *p-n* переходов в качестве единственного способа их соединения с БИС применяют метод перевёрнутого кристалла (технология «флип-чип»). Электрическая связь между ФЧЭ и БИС осуществляется через индиевые столбы, они же обеспечивают механическую прочность ФПУ [3]. Для увеличения дальности распознавания объектов и улучшения качества изображения необходимо увеличение

формата ФПУ. Путь увеличения формата БИС и ФЧЭ ограничен рядом факторов, рассмотренных в данной статье. В настоящее время для диапазона 3–5 мкм выпускаются ФПУ на основе HgCdTe форматом 2048×2048 фоточувствительных элемента (пикселя) [4], а для диапазона 8–12 мкм – форматом 640×512 пикселя [5]. В качестве подложек в ФЧЭ используются Ge, Si, GaAs и CdZnTe.

Цель исследования – рассмотреть влияние факторов на увеличение формата ФПУ:

- а) уменьшение процента выхода годных ФПУ при увеличении размеров БИС и ФЧЭ;
- б) разное изменение размеров БИС и ФЧЭ при охлаждении ФПУ до рабочих температур;
- в) не плоские формы поверхностей БИС и ФЧЭ;
- г) оптическая система (ОС) приборов контроля тепловых полей.

Анализ влияния факторов на увеличение формата ФПУ

а) *Уровень развития технологии. Влияние процента выхода годных БИС и ФЧЭ на формат ФПУ.* Известно, что при увеличении площади микросхем увеличивается вероятность попадания локального дефекта (дислокации в материале, поры в диэлектрике), который ведёт к потере работоспособности либо всей микросхемы, либо её части [6].

В общем виде вероятность (P) того, что микросхема не содержит никаких дефектов (количество дефектов равно 0) можно описать распределением Пуассона:

$$P = e^{-S \cdot D}, \quad (1)$$

где S – площадь микросхемы, мм²; D – плотность дефектов, количество/мм².

Современный уровень развития технологии изготовления БИС и ФЧЭ с плотностью дефектов, позволяет изготавливать ФПУ на основе плёнок HgCdTe форматом 2048×2048 пикселя [4], как было сказано ранее.

Увеличение разрешения ФПУ может быть достигнуто и уменьшением размера пикселя (с текущих стандартных 15 мкм до 7,5 мкм и ниже) без увеличения площади ФЧЭ и БИС, но такой подход требует иной технологической точности формирования топологических слоёв микросхемы и дополнительных исследова-

ний оценки изменения электрофизических свойств активных элементов при уменьшении их размеров. Трудоемкость такого подхода высока. Поэтому наиболее часто для увеличения разрешения ФПУ выбирается подход, при котором происходит увеличение размеров ФПУ (количества пикселей) без уменьшения размеров пикселей.

б) *Необходимость охлаждения ФПУ во время работы.* Если ФПУ изготовлено на основе пленки фоточувствительного материала кадмий-ртуть-теллур, то рабочая температура такого прибора составляет 80К и менее. После окончания работы температура ФПУ повышается до температуры окружающей среды. Известны коэффициенты теплового расширения при комнатной температуре для Si – $2,6 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$ и CdZnTe – $4,2 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$ [7]. В [8] коэффициенты теплового расширения при температуре 300 К: Si – $2,56 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, Ge – $5,75 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, GaAs – $7,44 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Толщина подложки ФЧЭ и БИС около 400–600 мкм, тогда как толщина фоточувствительной плёнки HgCdTe имеет толщину всего около 10 мкм, и, в соответствии с исследованиями [9], она не может оказать существенное влияние на тепловое расширение ФЧЭ.

Для оценки изменения размеров ФЧЭ и БИС нельзя напрямую пользоваться справочными коэффициентами теплового расширения используемых материалов из-за зависящих от температуры значений самих коэффициентов. Поэтому мы воспользуемся табличными данными коэффициентов теплового расширения материалов при охлаждении [8] и вычислим изменения размеров пластин из этих материалов при охлаждении. На рис. 1 представлены результаты вычислений изменения длины пластин при их охлаждении ниже 300 К для наиболее распространенных подложечных материалов (Si, Ge и GaAs) ФЧЭ HgCdTe [8]. При температуре 300 К размеры пластин составляли 10×10 мм. В соответствии с рисунком, при снижении температуры до 80 К разница в размерах между пластинами Ge и GaAs составит около 8 мкм. Разница в размерах между пластинами GaAs и Si составит около 11 мкм. Разница в размерах пластин относительно центра ФПУ при этом составит более 5 мкм. Следовательно, краевые индиевые столбы должны выдерживать при охлаждении изменение размеров пластин, которое состав-

ляет более 30 % от их диаметра. Таким образом, краевые индиевые столбы ФПУ при эксплуатации должны выдерживать многократно сдвиговые нагрузки. С увеличением размеров ФПУ относительное изменение размеров ещё более существенное и разрушение индиевых столбов происходит быстрее.

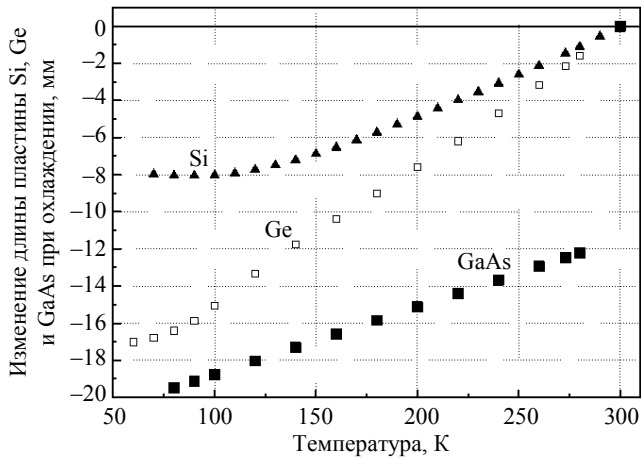


Рис. 1. Изменения длин пластин Ge, Si и GaAs при охлаждении. При температуре 300 К все пластины имели размер 10×10 мм. Графики построены на основе табличных данных

Fig. 1. Changes in the lengths of Ge, Si, and GaAs plates during cooling. The sizes all plates 10×10 mm at a temperature of 300 K. The graphs are based on tabular datas

Из [10] известно, что разрыв индиевых столбов при комнатной температуре возможен при изменении длины столба более чем на 40 % (отметим, что после сдавливания в процессе гибридизации ФПУ высота столба составляет около 5 мкм). В зависимости от качества сварки столбов ФЧЭ и БИС между собой изменении длин столбов до разрыва может быть и ниже.

Определение усилий на разрыв краевых индиевых столбов при охлаждении до 77 К в зависимости от конструкции ФПУ и способа его крепления к охлаждаемому пьедесталу в криостате представлено в [11]. Расчёты выполнены на моделях флип-чип ФПУ диаметром 10 мм. (GaAs/In кольца/Si/клей/ Al_2O_3). На рис. 2 представлена модель ФПУ и 3D-графики зависимости уровней напряжений в краевых индиевых столбах для разных толщин пластин GaAs и Si при температуре 77 К. В процессе моделирования [11] выяснено, что оптимальной конструкцией охлаждаемого до 77 К гибридного ФПУ является введение между БИС и подложкой (Al_2O_3) с разводкой дополнительного компенсационного слоя - пластины GaAs. Толщина компенсационного слоя около 100 мкм. Кроме этого необходимо утонение ФЧЭ и БИС до 50 мкм. Исследования проведены численным расчётом радиально-симметричной модели фотоприёмника. Уровень максимальных деформационных нагрузок в краевом индиевом столбе, возникающие при охлаждении такой модели фотоприёмника до 77 К, составлял около 641 МПа. В модели гибридной ФПУ без дополнительного компенсационного слоя GaAs и утонения уровень деформационных нагрузок в краевых индиевых столбах достигал значений 889 МПа.

Изгиб слоёв в модели при однократном охлаждении не достаточен для развития мгновенного разрушения краевого индиевого столба, но при многократных охлаждениях разрушение возможно. При охлаждении ФПУ большего размера вероятность разрушения индиевых столбов повышается.

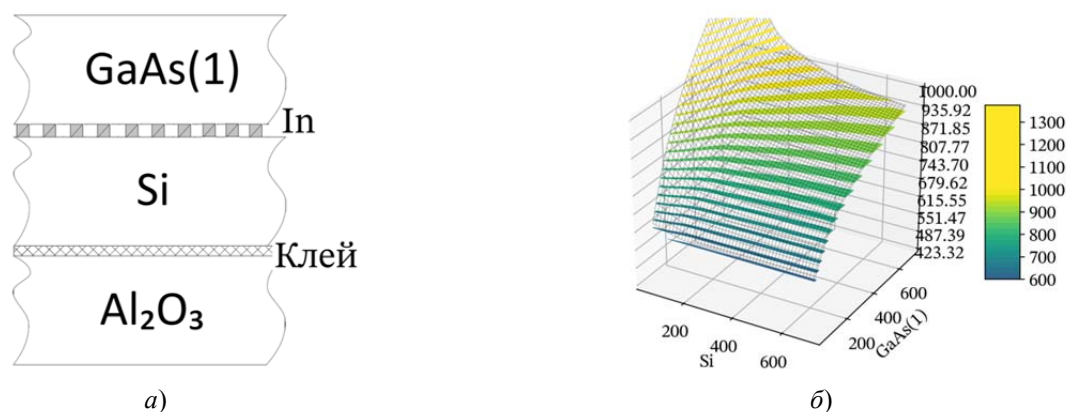


Рис. 2. Модель ФПУ (рис. а) и 3D-графики уровней напряжений в краевых индиевых столбах модели ФПУ при охлаждении её до 77 К в зависимости от толщин пластин GaAs и Si. – рис. б)

Fig. 2. The PDs model (Fig. a) and 3D graphs of stress levels in the edge indium columns of the PDs model when it cooled to 77 K, depending on the thicknesses of the GaAs and Si plates. – fig. b)

Частичным снятием ограничения является замена подложек ФЧЭ с GaAs на Si при этом увеличивается количество циклов охлаждения ФПУ (77К) до разрыва индиевых столбов [12]. На рисунке 3 показано изменение в процентах количества подключенных ФЧЭ к БИС при циклических охлаждениях двух ФПУ до 77К. В качестве подложки для ФЧЭ использовалась кремниевая пластина, на которой были сформированы меза-структуры из плёнки InSb. Формат ФУ 640×512 пикселей. Из рисунка видно, что после 2500 циклов охлаждения начинается постепенное уменьшение подключенных ФЧЭ к БИС, а после 4000 циклов регистрируется резкий разрыв связей.

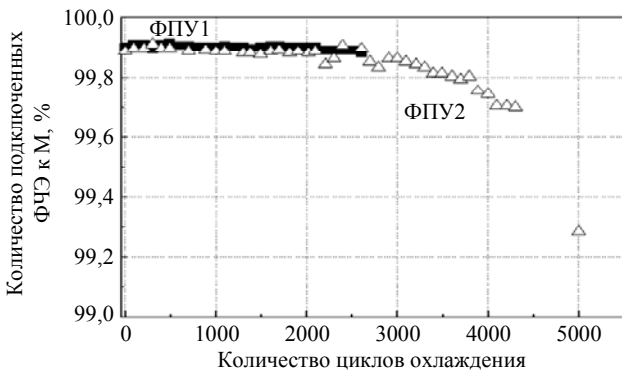
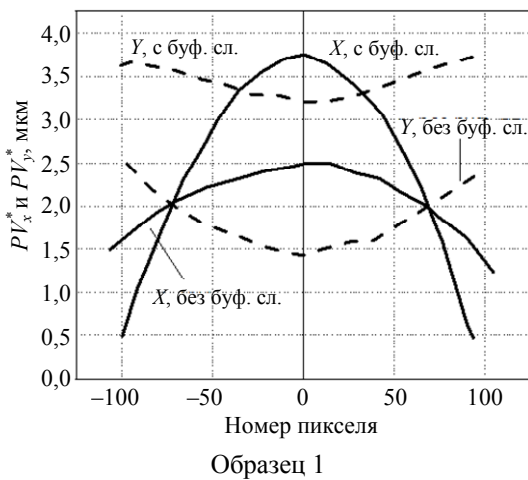


Рис. 3. Изменение количества подключенных ФЧЭ к БИС при увеличении количества циклов охлаждения ФПУ

Fig. 3. Change in the number of connected PSEs to the ROIC with an increase in the number of cooling cycles of the PDs

Таким образом, использование кремниевой подложки для ФЧЭ увеличивает коли-



чество циклов охлаждения ФПУ, но не решает проблемы разрыва связей в ФПУ.

в) *Не плоские формы поверхностей БИС и ФЧЭ.* Основной причиной искривления приборных пластин (ПП) является возникновение не скомпенсированных упругих напряжений в приповерхностных областях [13]. Легирование ПП (внедрение атомов других материалов в объём полупроводника) и формирование на их поверхности тонких слоёв других материалов (окисление, эпитаксия, металлизация) также вносят механические напряжения в поверхностный слой [14]. В [15] представлены экспериментальные результаты, что формирование тонких слоёв CdTe (толщиной 5–7 мкм) и ZnTe (до 300 нм) на поверхности GaAs ПП, увеличивает их изгиб более чем на 1 мкм. На рис. 4 представлены в графической форме изгибы поверхностей двух GaAs ПП по координатным осям X и Y с буферными слоями CdTe и ZnTe и после стравливания их. Форма поверхности после стравливания слоёв CdTe и ZnTe не изменилась, но изгиб поверхностей ПП уменьшился: для 1-го образца по осям X и Y на 1,26 мкм и 1,75 мкм, соответственно, и второго – на 3,23 мкм по осям X и Y.

Автоколлимационным и интерференционным методами исследованы поверхности ПП, ФЧЭ, БИС и ФПУ [16]. Все исследованные образцы не были плоскими. На рис. 5 представлены характерные формы фрагментов кремниевой ПП размером 20×20 мм. Аналогичные формы поверхностей имеют фрагменты GaAs ПП.

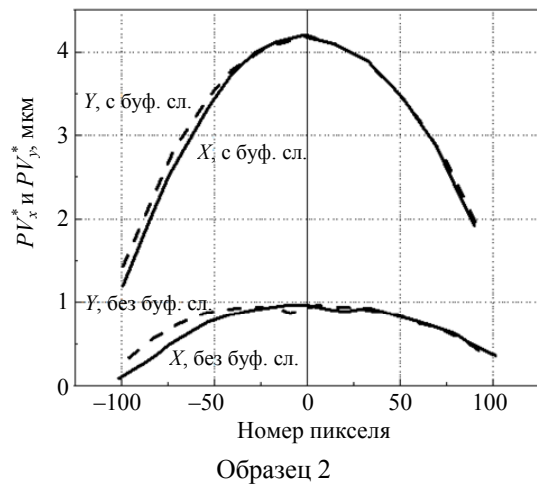


Рис. 4. Вычисленная форма поверхности GaAs ПП по центральным линиям (оси X и Y) двух образцов до и после химического травления слоёв CdTe и ZnTe

Fig. 4. Calculated non-flat shapes of the surfaces GaAs wafer along the central lines (X and Y axes) of two samples before and after chemical etching of CdTe and ZnTe layers

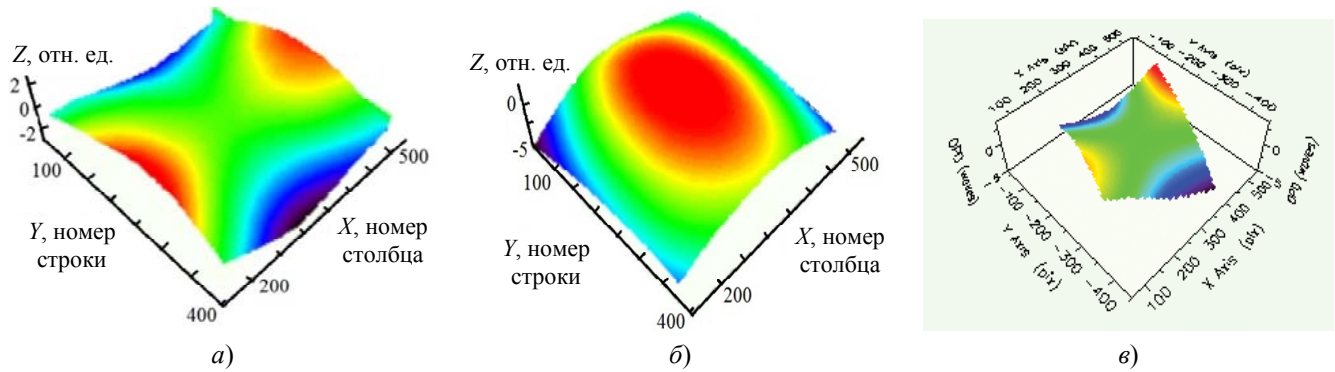


Рис. 5. Фрагменты кремниевой ПП размером 20×20 мм: *а)* – изгиб поверхности около 3 мкм; *б)* – изгиб поверхности около 4,81 мкм; *в)* – изгиб поверхности около 4,9 мкм

Fig. 5. Fragments of silicon wafers measuring 20×20 mm: *a)* Fragment of silicon wafer – surface bending of about 3 microns; *b)* Fragment of silicon wafer – surface bending of about 4.81 microns; *c)* Fragment of silicon wafer – surface bending of about 4.9 microns

Известно [16], что уровень искривления поверхностей ФПУ влияет на количество циклов их охладений до частичного разрушения. Таким образом, не плоские формы поверхности ФПУ также существенно ограничивают их эксплуатационные характеристики. На рис. 6 представлен результат термоциклирования двух ФПУ (384×288 пикселей, шаг 25 мкм, размер ФЧЭ около 9,6×7,2 мм) с разным уровнем изгиба поверхности (охлаждение от 300 К до 77 К). На примере двух ФПУ с однотипной формой поверхности (куполообразной), имеющих различие в величине изгиба поверхности (ФПУ № 1 – 1,22 мкм, ФПУ № 2 – 3,31 мкм) интерференционным методом исследовано постепенное разрушение ФПУ при многократных циклах охлаждения до температуры жидкого азота (77 К).

Таким образом, влияние формы поверхности ФПУ на количество циклов охлаждения до разрушения связей между ФЧЭ и БИС существенное.

Исследование форм поверхности исследуемых образцов осуществлено с помощью интерферометра «ФТИ-100 PS» (Россия), с применением юстируемого поворотного зеркала, которое позволяло исследовать форму поверхности свободно лежащей ПП на плоской поверхности без закрепления, деформирующего образец. Подробное описание методики исследования форм поверхности изложено в [16].

г) Оптическая система приборов контроля тепловых полей. Рассмотрено влияние оптической системы ФПУ (ОС) на увеличение формата не плоских охлаждаемых фотоприёмников. На рис. 6 размеры ФПУ составляли около 13,6×11,5 мм или относительно центра – 6,8×5,75 мм. Изменение формы поверхности интерференционным методом регистрировалось только в области ФЧЭ, размером около 9,6×7,2 мм (относительно центра 4,8×3,6 мм). Таким образом, если изгиб ФЧЭ составил 1,22 мкм (рис. 6, *а*), то неплоскостность ФПУ составляла около 1,73 мкм и ФПУ на рис. 6, *б* – 4,69 мкм. Если линейно увеличить размеры ФПУ до 20 мм, то первый образец будет иметь изгиб около 2,54 мкм и второй образец – 6,9 мкм. На рис. 7, *а* схематично представлен ход лучей после парааксиальной ОС до ФПУ. На рис. 7, *б* и 7, *в* схематично представлены ход лучей после ОС, падающего на неплоскую (изогнутую) поверхность ФЧЭ с размером пикселя N в центральной и краевой области. При изгибе поверхности ФПУ более чем на 5 мкм происходит быстрое разрушение краевых индиевых столбов, поэтому глубина резкости ОС должна быть более чем 5 мкм, чтобы не происходила расфокусировка изображения.

Определим, каким относительным отверстием (апертурой) должна обладать ОС, чтобы удовлетворять значению 5 мкм.

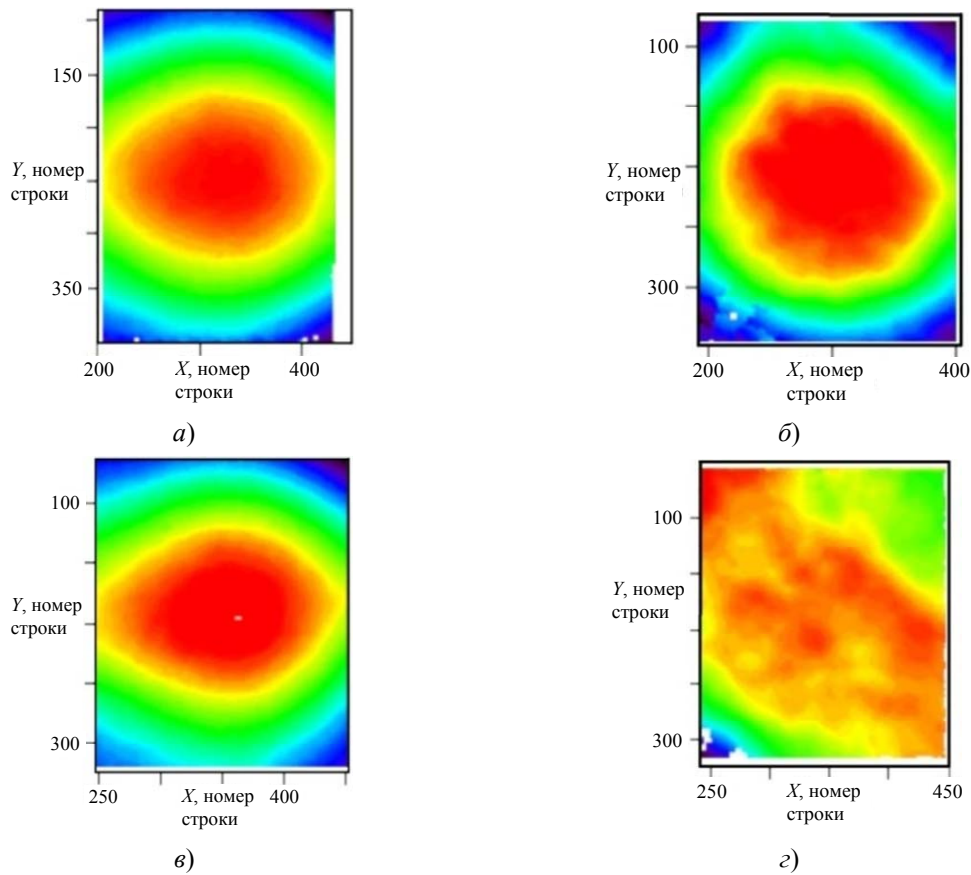


Рис. 6. Формы поверхности двух ФПУ до и после термоциклирования [16]. Данные для ФПУ № 1 с изгибом поверхности 1,22 мкм: а) – форма поверхности до термоциклирования (0 циклов); в) – форма поверхности после термоциклирования (570 циклов). Данные для ФПУ № 2 с изгибом поверхности 3,31 мкм: б) – форма поверхности до термоциклирования (0 циклов); г) – форма поверхности после термоциклирования (400 циклов)

Fig. 6. Surface shapes of two PDs before and after thermal cycling [16]. Data for PDs No. 1 with a surface bend of 1.22 microns: a) – the shape of the surface before thermal cycling (0 cycles); c) – the shape of the surface after thermal cycling (570 cycles). Data for PDs No. 2 with a surface bend of 3.31 microns: b) – the shape of the surface before thermal cycling (0 cycles); d) – the shape of the surface after thermal cycling (400 cycles)

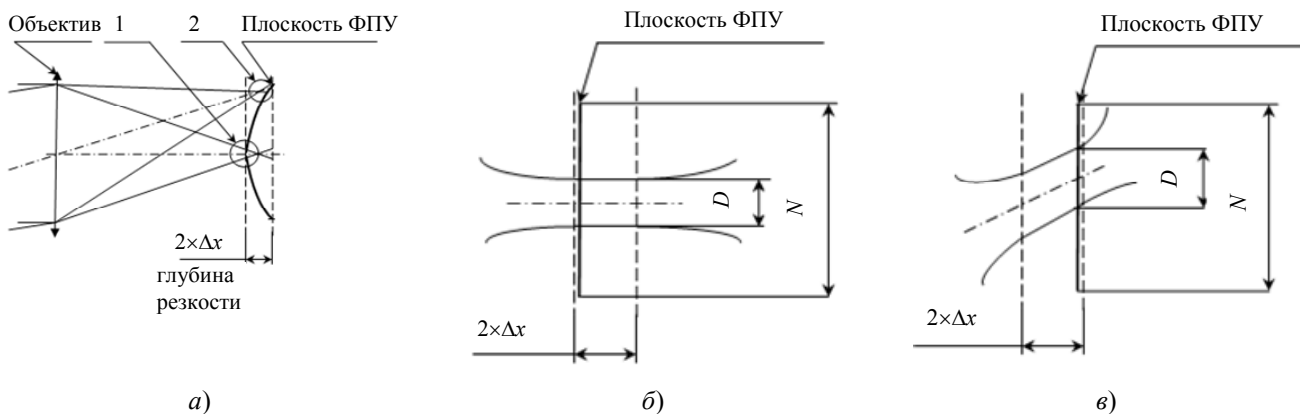


Рис. 7. Схематично представлен ход лучей после объектива. Обозначения: $2 \times \Delta x$ – глубина резкости объектива; 1 – фрагмент плоскости ФПУ, где оптическая ось объектива совпадает с нормалью к поверхности – рис. 7б; 2 – область, где излучение под углом падает на ФПУ – рис. 7в; D – диаметр первого темного кольца в дифракционном распределении (диаметр кружка Эри); N – область сбора энергии фоточувствительным элементом ФЧЭ

Fig. 7. The course of the rays after the lens is schematically shown. Notation: $2 \times \Delta x$ – is the depth of field of the lens; 1 – fragment surface PDs (PCEs) where the optical axis of the lens perpendicular to the surface PCEs – Fig. 7b; 2 – the area where the radiation falls at an angle onto PDs – Fig. 7b; D – the diameter of the first dark ring in the diffraction distribution (the diameter of the Erie circle); N – the area of energy collection by the photosensitive element of the PCEs

Половина глубины резкости Δx в плоскости изображений для бесконечно удаленного объекта наблюдения определяется по формуле:

$$\Delta x = \pm \frac{1}{R} \times \frac{f'_o}{D_p}, \text{ мм} \quad (2)$$

где R – пространственная частота, разрешаемая объективом исходя из размеров радиуса кружка рассеяния, (контраст 20 %), штр/мм; f'_o – заднее фокусное расстояние объектива, мм; D_p – диаметр входного зрачка объектива, мм.

Нерезкость изображения ещё допустима и не снижает разрешающей способности, если радиус кружка рассеяния не превышает величины $1/R$ [17].

$$R = \frac{1}{\rho}, \text{ мм}^{-1}, \quad (3)$$

где ρ – радиус кружка рассеяния объектива, мм.

Радиус кружка рассеяния определяется по формуле [18]:

$$\rho = \frac{1,22 \times \lambda \times f'_o}{D_p}, \text{ мм} \quad (4)$$

где λ – длина волны, мкм.

Исходя из формул (1), (2) и (3) выразим формулу величины относительного отверстия входного объектива:

$$\frac{D_p}{f'_o} = \sqrt{\frac{1,22 \times \lambda}{\Delta x}}. \quad (5)$$

Из формул (2, 3 и 5) следует, что минимальный размер пятна рассеяния и глубина резкости, создаваемые объективом, определяются наименьшей длиной волны заданного спектрального диапазона. В соответствии с формулой (5) вычислим относительное отверстие D_p/f'_o при полной глубине резкости равной 5 мкм. Считаем, что $\Delta x = \pm 2,5$ мкм; $\lambda = 3$ мкм (средний спектральный ИК-диапазон (3–5 мкм)) и $\lambda = 8$ мкм (дальний диапазон (8–12 мкм)). Вычисленное относительное отверстие (D_p/f'_o) для $\lambda = 8$ мкм равно 1:0,51, а для $\lambda = 3$ мкм – 1:1,1. В таблице представлены результаты расчётов глубины резкости и диаметры первого темного кольца кружка рассеяния объективов, имеющих разные значения относительных отверстий.

Таблица

Результаты расчета

Относительное отверстие объектива, D_p/f'_o	1:2	1:1,5	1:1	1:0,51
Диаметр первого темного кольца кружка рассеяния, $2 \times \rho$, мкм:				
– для $\lambda = 3$ мкм;	14,6	11	7,3	3,7
– для $\lambda = 8$ мкм	39	29,3	19,5	9,9
Глубина резкости $2 \times \Delta x$, мкм				
– для $\lambda = 3$ мкм;	29,2	16,5	7,3	1,9
– для $\lambda = 8$ мкм	78	43,9	19,5	5,0

Расчет выполнен для дифракционно-ограниченной ОС, без учета aberrаций, в том числе и кривизны изображения на краю поля зрения создаваемым объективом.

Соотношение D_p/f'_o также определяет дифракционный предел разрешающей способности ОС. Для того чтобы ОС не ограничивала пространственное разрешение прибора на основе ФПУ, радиус кружка рассеяния должен быть равен, либо меньше, чем двойной размер пиксела. В последнее время появились охлаждаемые ФПУ, например (АСТРОН-640КРТ15А810) с шагом ФЧЭ равным 15 мкм, размерностью 640×512 элементов (требуемое разрешение ОС $\nu = 33$ штр/мм).

В соответствии с результатами расчета, приведенными в таблице, оптические системы с относительным отверстием 1:2 имеют глубину резкости больше, чем 5 мкм и не происходит расфокусировки изображения на краях ФПУ. Если построить кривые зависимости коэффициента глубины модуляции от пространственной частоты (частотно-контрастная характеристика – ЧКХ) для дифракционного предела, для центра и края поля зрения (3,5 мм) при смещении плоскости изображения, то кривые совпадут.

На рисунке 8 представлены результаты численного моделирования ЧКХ для длин волн 3 мкм ($D_p/f'_o = 1:1$) и 8 мкм ($D_p/f'_o = 1:0,51$) в

графической форме при смещении плоскости изображения на 5 мкм. Из рисунка 8а видно, что при смещении плоскости изображения, для относительного отверстия ОС 1:0,51 и на рис. 8б – для относительного отверстия объектива 1:1 на средних пространственных частотах кривые не совпадают с кривой дифракционного предела, что указывает на ухудшение качества изображения.

Обсуждение результатов

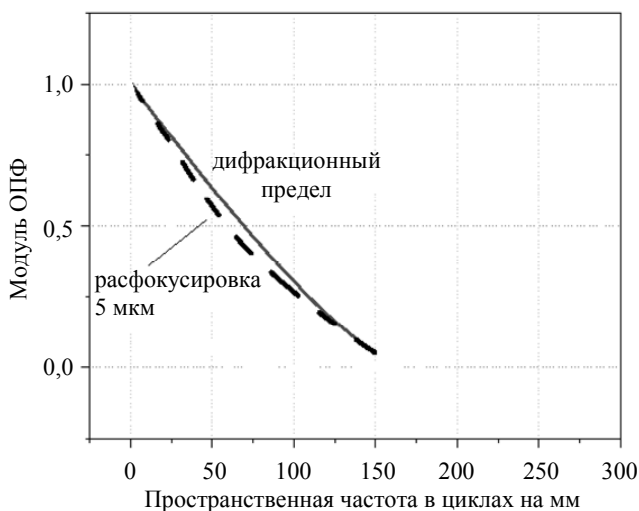
Результаты исследования влияния ряда факторов на увеличение формата охлаждаемых фотоприёмников:

а) Уменьшение процента выхода годных ФПУ при увеличении размеров БИС и ФЧЭ: Современный уровень технологии производства позволяет серийно выпускать ФЧЭ и БИС форматом 2048×2048 пикселей с шагом 15 мкм (спектральный диапазон 3–5 мкм). Таким образом, существующий формат ФЧЭ и БИС 640×512 пикселей для спектрального

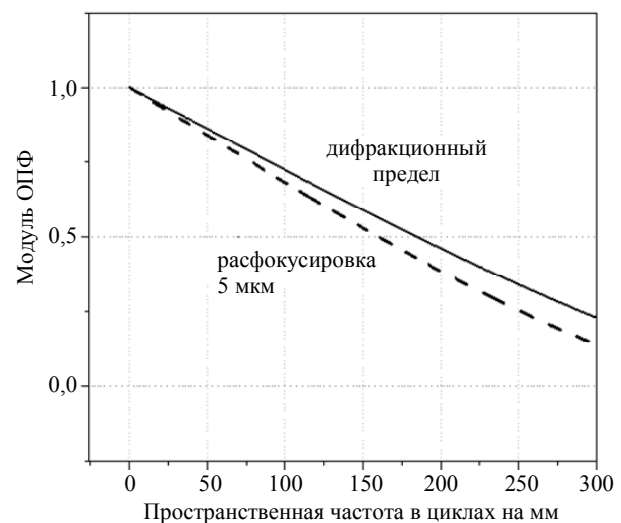
диапазона 8–12 мкм ограничивается не качеством технологических операций (концентрацией локальных дефектов в полупроводниковых материалах), а другими факторами. Влияние данного фактора минимальное;

б) Разное изменение размеров БИС и ФЧЭ при охлаждении ФПУ до рабочих температур: Является ограничивающим фактором (для подложек на основе материалов, отличных от Si. При применении в качестве подложек для фоточувствительных плёнок кремниевых приборных пластин замедляется постепенное разрушение ФПУ при термоциклировании. Данный фактор является сдерживающим при увеличении формата охлаждаемых гибридных фотоприёмных устройств (ФПУ);

в) Не плоские формы поверхностей БИС и ФЧЭ: Экспериментально продемонстрировано, что на разрушение связей между ФЧЭ и БИС влияет изгиб ФПУ. Данный фактор существенно ограничивает увеличение формата охлаждаемых ФПУ, поскольку при увеличении размера ФПУ увеличивается и его изгиб;



а)



б)

Рис. 8. ЧКХ ОС в центре и при смещении плоскости изображения на 5 мкм для относительных отверстий: 8а – длина волны 8 мкм, $D_p/f_o' = 1:0,51$; 8б – длина волны 3 мкм, $D_p/f_o' = 1:1$

Fig. 8. frequency-contrast response of the optical axis in the center and when the image plane is shifted by 5 microns for relative holes: 8а – wavelength of 8 microns, $D_p/f_o' = 1:0,51$; 8б – wavelength of 3 microns, $D_p/f_o' = 1:1$

г) Оптическая система приборов контроля тепловых полей.

– ОС с глубиной резкости больше, чем изгиб поверхности ФПУ, имеют относительное отверстие D_p/f_o' меньше чем 1: 0,51 (длина волны 8 мкм) и 1:1 (3 мкм);

– при смещении плоскости изображения на расстояние 5 мкм: не происходит падения ЧКХ относительно сфокусированного положения при применении ОС с относительным отверстием менее чем 1:0,51 или 1:1 (8–12 и 3–5 мкм, соответственно); при использовании

ОС с относительным отверстием 1:0,51 (длина волны 8 мкм) и 1:1 (длина волны 3 мкм) ЧКХ ухудшается;

– необходимо применять в охлаждаемых фотоприёмниках ОС с глубиной резкости больше, чем изгиб поверхности ФПУ;

– отметим, что ОС с высоким относительным отверстием ведет к усложнению конструкции и увеличивает массо-габаритные характеристики ОС, следовательно, повышает стоимость всего тепловизионного прибора.

Заключение

1. Таким образом, наиболее чувствительным фактором, влияющим на увеличение формата охлаждаемых ФПУ, являются не плоские поверхности БИС и ФЧЭ;

2. Использование нескольких БИС и ФЧЭ меньшей площади, установленных стык в стык друг к другу, снимает выявленные ограничения при изготовлении широкоформатных охлаждаемых фотоприёмников. Данный приём известен как мозаичный принцип построения ФПУ (МФПУ). Перспективность данного направления работ подтверждается, например, намерениями фирмы «TeledyneImagingSensors» (США) в 2008 году создать МФПУ ИК диапазона форматом 10240×14336 пикселей, состоящего из 35 ФПУ форматом 2048×2048 [19]. В 2022 г. на международной конференции [20] была доложена реализованная конструкция охлаждаемого мозаичного фотоприёмника из 49 МФПУ в криостате.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Якушев М. В., Васильев В. В., Дворецкий С. А., Захарьяш Т. И., Козлов А. И., Сидоров Ю. Г., Фомин Б. И., Асеев А. Л. / Прикладная физика. 2009. № 2. С. 120.
2. Зверев А. В., Сусяков А. О., Сабина И. В., Сидоров Г. Ю., Якушев М. В., Кузьмин В. Д., Варавин В. С., Ремесник В. Г., Макаров Ю. С., Предеин А. В., Горшков Д. В., Дворецкий С. А., Васильев В. В., Сидо-

ров Ю. Г., Латышев А. В., Кремис И. И. / Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 3. С. 224.

3. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. – М.: Физматкнига, 2005.

4. Базовкин В. М., Варавин В. С., Васильев В. В., Глухов А. В., Горшков Д. В., Дворецкий С. А., Ковчавцев А. П., Макаров Ю. С., Марин Д. В., Мжельский И. В., Половинкин В. Г., Ремесник В. Г., Сабина И. В., Сидоров Ю. Г., Сидоров Г. Ю., Строганов А. С., Царенко А. В., Якушев М. В., Латышев А. В. / Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 6. С. 501.

5. Кульчицкий Н., Наумов А., Старцев В. / Электроника. 2020. № 6 (00197). С. 114.

6. Адамов Ю. Ф., Шишина Л. Ю. Проектирование систем на кристалле. – М.: «МИЭТ», 2005.

7. Zhang Haiyan, Lu Huaqie. / Proc. of SPIE. 2007. Vol. 6835. P. 68350J-1.

8. Новицкий Л. А., Кожевников И. Г. Теплофизические свойства материалов при низких температурах. – М.: Машиностроение, 1975.

9. Сироткина Н. М., Сироткина Н. С. / Математика. Механика. 2002. № 4. С. 222.

10. Новоселов А. Р., Косулина И. Г., Клименко А. Г., Валишева Н. В., Васильев В. В., Дворецкий С. А. / Автометрия. 2013. Т. 49. № 1. С. 111.

11. Загубисало П. С., Новоселов А. Р. / Автометрия. 2022. Т. 58. № 2. С. 113.

12. Greiner M. E., Davis M., Devitt J. W., Rawe R., Wade D. R., Voelker J. / Proceedings of SPIE. 2003. Vol. 5074. P. 60–71.

13. Новоселов А. Р., Алдохин П. А., Маточкин А. Е., Добровольский П. П., Шатунов К. П. / Автометрия. 2019. Т. 55. № 2. С. 70.

14. Радьков А. В., Малаханов А. А., Казаков О. Г. / «YoungScientist». 2018. № 17 (203). С. 73.

15. Новоселов А. Р., Михайлов Н. Н., Меницков Р. В., Алдохин П. А., Маточкин А. Е. / Автометрия. 2025. Т. 61. № 1. С. 80–86.

16. Новоселов А. Р., Алдохин П. А., Добровольский П. П., Маточкин А. Е. / Оптический журнал. 2021. Т. 88. Вып. 1. С. 69.

17. Мальцев М. Д. Расчет допусков на оптические детали. – М.: Машиностроение, 1974.

18. Справочник конструктора оптико-механических приборов / под ред. Панова В. А. – Л.: Машиностроение, 1980.

19. Sparfke T., Beletic J. W. / Optics and Photonics News. 2008. Vol. 19. № 6. P. 22.

20. Квитка В. Е., Лавренов В. А., Блинов В. Д., Мастюгин С. М. / Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – Москва, 2022. С. 133.

Limitations of standard approaches in the production of large-format cooled photodetectors of the third and subsequent generations based on HgCdTe

A. R. Novoselov*, P. A. Aldokhin, and K. P. Shatunov

Novosibirsk Branch of the Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, "Technological Design Institute of Applied Microelectronics" (NB ISP SB RAS "TDI AM"), Novosibirsk, 630090, Russia

*E-mail: novoselov@isp.nsc.ru

Received 19.01.2026; revised 3.02.2026; accepted 20.02.2026

The analysis of the main constraining factors of increasing the format of cooled hybrid photodetectors (PDs) is considered: a decrease in the percentage of usable PDs with an increase in the size of read-out integrated circuit (ROIC) and an array of photosensitive elements (PSEs); different changes in the size of ROIC and PCEs when the PDs is cooled to operating temperatures; non-flat shapes of the surfaces of ROIC and PCEs; and the optical system a device based on PDs. It was found that the main constraining factors for increasing the format of cooled HgCdTe-based PDs are different changes in the size of the ROIC and PCEs when the PDs are cooled to operating temperatures, and the most significant are the non-flat shapes of the ROIC and PCEs surfaces. A solution has been proposed to increase the format of cooled hybrid photodetectors by using several smaller ROICs and PCEs installed adjacent to each other, which removes the identified limitations in the manufacture of large-format cooled photodetectors.

Keyword: cooled IR photodetectors, wafer nonflatness, thermocycling, optical system.

REFERENCES

1. Yakushev M. V., Vasiliev V. V., Dvoretzky S. A., Zahariyash T. I., Kozlov A. I., Sidorov Yu. G., Fomin B. I., and Aseev A. L., Applied Physics, № 2, 120 (2009) [in Russian].
2. Zverev A. V., Suslyakov A. O., Sabinina I. V., Sidorov G. Yu., Yakushev M. V., Kuzmin V. D., Varavin V. S., Remesnik V. G., Makarov Yu. S., Predein A. V., Gorshkov D. V., Dvoretzky S. A., Vasil'ev V. V., Sidorov Yu. G., Latyshev A. V., and Kremis I. I., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) 6 (3), 224 (2018) [in Russian].
3. Filachev A. M., Taubkin I. I., and Trishenkov M. A. Solid-state photoelectronics. Physical foundations. Moscow, Fizmatkniga, 2005 [in Russian].
4. Bazovkin V. M., Varavin V. S., Vasil'ev V. V., Gluhov A. V., Gorshkov D. V., Dvoretzky S. A., Kovchavtsev A. P., Makarov Y. S., Marin D. V., Mzhelsky I. V., Polovinkin V. G., Remesnik V. G., Sabinina I. V., Sidorov Yu. G., Sidorov G. Yu., Stroganov A. S., Tsarenko A. V., Yakushev M. V., and Latyshev A. V., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) 6 (6), 501 (2018) [in Russian].
5. Kulchitsky N., Naumov A., and Startsev V., Electronics: STB, № 6, 114 (2020) [in Russian].
6. Adamov Yu. F. and Shishina L. Y. Designing systems on a chip. Moscow, "MIET", 2005 [in Russian].
7. Zhang Haiyan and Lu Huajie, Proc. of SPIE 6835, 6835J-1 (2007).
8. Novitsky L. A. and Kozhevnikov I. G. Thermo-physical properties of materials at low temperatures. Moscow, Mashinostroenie, 1975 [in Russian].
9. Sirotkina N. M. and Sirotkina N. S., Mathematics. Mechanics, № 4, 222 (2002) [in Russian].
10. Novoselov A. R., Kosulina I. G., Klimenko A. G., Valisheva N. A., Vasil'ev V. V., and Dvoretzky S. A., Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing 49 (1), 94 (2013) [in Russian].
11. Zagubisalo P. S. and Novoselov A. R., Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing 58 (2), 206 (2022) [in Russian].
12. Greiner M. E., Davis M., Devitt J. W., Rawe R., Wade D. R., and Voelker J., Proceedings of SPIE 5074, 60–71 (2003).
13. Novoselov A. R., Aldokhin P. A., Matochkin A. E., Dobrovolskii P. P., and Shatunov K. P., Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing 55 (2), 162 (2019) [in Russian].
14. Radkov A. V., Malakhanov A. A., and Kazakov O. G., YoungScientist 17 (203), 73 (2018) [in Russian].

15. Novoselov A. R., Mikhailov N. N., Menshchikov R. V., Aldokhin P. A., and Matochkin A. E., Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing **61** (1), 69 (2025) [in Russian].
16. Novoselov A. R., Aldokhin P. A., Dobrovolskii P. P., and Matochkin A. E., Journal of Optical Technology **88** (1), 49 (2021) [in Russian].
17. Maltsev M. D. Calculation of tolerances for optical parts. Moscow, Mashinostroenie, 1974 [in Russian].
18. Handbook of the designer of optical and mechanical devices / ed. Panova V. A., Leningrad, Mechanical engineering, 1980 [in Russian].
19. Sparfke T. and Beletic J. W., Optics and Photonics News **19** (6), 22 (2008).
20. Kvitka V. E., Lavrenov V. A., Blinov V. D., and Mastuygin S. M. Proceedings of the 20th International Conference "Modern problems of remote sensing of the Earth from space". Moscow, 2022, p. 133.

Об авторах

Новоселов Андрей Рудольфович, старший научный сотрудник, Филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН «КТИПМ» (630090, Россия, г. Новосибирск, Пр-т Ак. Лаврентьева, 2/1). E-mail: novoselov@isp.nsc.ru
AuthorID: 507231 orcid.org/0000-0001-6822-3559

Алдохин Павел Алексеевич, младший научный сотрудник, Филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН «КТИПМ» (630090, Россия, г. Новосибирск, Пр-т Ак. Лаврентьева, 2/1). E-mail: aldosha-pavel79@yandex.ru
orcid.org/0000-0002-2236-0459

Шатунов Константин Павлович, заведующий Отделом, Филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН «КТИПМ» (630090, Россия, г. Новосибирск, Пр-т Ак. Лаврентьева, 2/1). orcid.org/0009-0000-8586-8818