

УДК 621.397:621.383.4/5

## Определение требований к качеству оптических поверхностей входных окон охлаждаемых фотоприемных устройств второго поколения ИК-диапазона спектра

Р. Н. Губайдуллин, А. А. Колесова, А. В. Лобачев, А. В. Полесский

*Приведены результаты расчета требований к качеству поверхностей входных окон фотоприемных устройств второго поколения средневолнового и дальневолнового инфракрасного (ИК) диапазонов спектра. Для расчета требований был проведен аналитический обзор представленных в России ИК-объективов и фотоприемных устройств. На основе данного обзора были сформулированы требования к современным оптическим системам средневолнового и дальневолнового ИК-диапазонов спектра и проведен их синтез. Расчет требований к качеству изготовления входных окон был проведен на основе анализа допусков синтезированных оптических систем.*

PACS: 42.30.Va; 42.79.Pw

*Ключевые слова:* охлаждаемое фотоприемное устройство, входное окно, качество поверхности.

### Введение

Современные фоточувствительные матрицы — это полупроводниковые приборы, в которых объединены фоточувствительные элементы и большие интегральные схемы считывания. Такие приборы являются слабоустойчивыми к воздействию окружающей среды (в первую очередь, к наличию воды и пыли в окружающей среде) и требуют специализированного корпусирования.

Современный корпус фотоприемных устройств (ФПУ) обеспечивает размещение фоточувствительных матриц внутри вакуумированного или заполненного инертным газом герметичного объема. Для обеспечения прохождения излучения внутрь корпуса и попадания его на фоточувствительные элементы в корпусе предусмотрены оптически прозрачные входные окна. Каждое такое входное окно является полноценным оптическим элементом, представляющим собой плоскопараллельную пластину, которая должна быть учтена при расчете оптической системы опико-электронного прибора, поскольку она вносит определенные аберрации.

Как и к любому оптическому элементу, к входному окну предъявляется ряд требований к соблюдению точности его геометрических размеров, а именно:

- общая ошибка изготовления оптических поверхностей ( $N$ );
- местная ошибка изготовления оптических поверхностей ( $\Delta N$ );
- допуск на толщину;
- допуск на клиновидность;
- допуск на наклон оптического элемента.

В настоящее время в оптическом производстве изготовление плоскопараллельной пластины высокого качества не представляет никаких проблем. Однако хорошо известно, что оптические элементы могут деформироваться при закреплении под воздействием прижимной силы. В производстве оптических систем закрепление оптических элементов хорошо отработано и здесь широко используются следующие методы: крепление резьбовым кольцом, завальцовкой, пружинным кольцом, установкой оптических элементов «на герметик» и т. д. Но важно отметить, что при производстве ФПУ все перечисленные методы практически не применимы.

При производстве отечественных ФПУ второго поколения среднего и дальнего ИК-диапазонов, охлаждаемых до криогенных температур, как правило, применяется пайка входного окна в корпус. Окна криогенно охлаждаемых ФПУ имеют склонность к прогибу, так как внутри корпуса ФПУ присутствует вакуум.

Поскольку для разработчика комплексной оптической системы само ФПУ является покупным изделием, то он, как правило, не выдвигает требований к качеству входного окна. Для произ-

---

Губайдуллин Ренат Наильевич, инженер<sup>1</sup>.  
Колесова Анастасия Александровна, практикант<sup>1,2</sup>.  
Лобачев Антон Васильевич, практикант<sup>1,2</sup>.  
Полесский Алексей Викторович, главный метролог<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>АО «НПО «Орион».  
Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.  
E-mail: orion@orion-ir.ru  
<sup>2</sup>МГТУ им. Н. Э. Баумана.  
Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

Статья поступила в редакцию 2 марта 2015 г.

---

© Губайдуллин Р. Н., Колесова А. А., Лобачев А. В., Полесский А. В., 2015

водителя же ФПУ основной задачей является обеспечение заданных фотоэлектрических параметров: вольтовой чувствительности, удельной обнаружительной способности, эквивалентной шуму разности температур, порогового потока. Геометрия входного окна для производителя ФПУ не является основным параметром. Другими словами, сейчас фактически не сформулированы специализированные требования к окнам ФПУ ИК-диапазона.

Целью данной работы является устранение указанного пробела — определение требований к входным окнам ФПУ средневолнового ИК-диапазона (3,5...5 мкм) и длинноволнового ИК-диапазона (8...12 мкм), разработанных и выпускаемых в России.

**Описание методологии исследования**

Определение требований к оптическим компонентам может быть произведено только на основе анализа оптической системы в целом. Поэтому исследование необходимо проводить следующим образом:

- определение параметров современных оптических трактов для каждого из диапазонов, влияющих на качество входного окна;
- определение параметров входных окон современных МФПУ второго поколения ИК-диапазона спектра, производимых в России;
- синтез оптических систем ИК-диапазона спектра по параметрам определенным в п. 1 и 2;
- проведение точностного анализа и формирование требований к точности соблюдения геометрии входных окон ФПУ.

**Определение перечня значимых параметров современных оптических трактов для каждого из диапазонов**

Методики расчета требований к качеству поверхности и геометрическим размерам оптических компонентов представлены в литературе [1]. Согласно этим методикам требования к точности изготовления оптических компонентов определяются требованиями к качеству изображения оптической системы и параметрами самого оптического компонента: толщиной оптического компонента, его показателем преломления, оптической силой, световой высотой, апертурой и расположением.

Это означает, что необходимо определить следующие параметры оптических трактов: относительное отверстие, линейное поле изображения (определяется размером ФПУ), спектральный диапазон (определяется ФПУ) и качество изображения.

Анализ продукции ведущих российских производителей [2, 3, 5] показывает, что современные объективы ИК-диапазона спектра имеют следующие параметры (табл. 1 и 2):

Таблица 1

*Параметры объективов средневолнового ИК-диапазона*

Наименование	Величина
Относительное отверстие, не более	1:2,3*
Линейное поле зрения (2у'), мм, не более	11,3
Спектральный диапазон, мкм	3,5...5
Число Штреля, не менее	0,85
Высота «холодной» диафрагмы, мм	20...25,4

\* — существует ряд специализированных систем, в которых относительное отверстие составляет 1:1. Для таких систем величина кружка рассеяния составляет около 15...20 мкм, а высота «холодной» диафрагмы 10...14 мм.

Таблица 2

*Параметры объективов длинноволнового ИК-диапазона для охлаждаемых ФПУ*

Наименование	Величина
Относительное отверстие, не более	1:2
Линейное поле зрения (2у'), мм, не более	11,3
Спектральный диапазон, мкм	8...10
Число Штреля, не менее	0,85
Высота «холодной» диафрагмы, мм	20...25,4

**Определение параметров входных окон современных МФПУ второго поколения, производимых в России**

Основные производители ФПУ второго поколения в России — это ОАО «НПО «Орион» (Москва), ОАО «Швабе-Фотосистемы» (Москва), ОАО «Швабе-Фотоприбор» (Москва), Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова РАН (Новосибирск).

Результаты анализа данных [2, 4, 6, 7, 8] о входных окнах и размерах фоточувствительных элементов охлаждаемых ФПУ российских производителей для среднего и длинноволнового ИК-диапазонов приведены в табл. 3.

Таблица 3

*Данные по охлаждаемым ФПУ для среднего и длинноволнового ИК-диапазонов, производимым в России*

Параметры	Величина
Толщина входного окна	2,5
Материал входного окна	Германий
Расстояние от входного окна до ФЧЭ	24...30 мм
Диаметр входного окна	24,5 мм
Размер диагонали ФПУ	11,3

**Синтез оптических систем ИК-диапазона спектра**

В результате анализа отечественных оптических трактов и оптических схем ФПУ были сформулированы следующие исходные данные для синтеза оптических систем (табл. 4):

Таблица 4

## Требования к синтезируемым ОС

№	$\Delta\lambda$ , мкм	$D/f'$	$2y'$ , мм	Качество изображения	Толщина входного окна	Материал входного окна	Расстояние от ФЧЭ	Прим.
1	3,5...5	1:1	11,3	Размер кружка рассеяния 12 мкм	2,5	Германий	12	*
2	3,5...5	1:2,3	11,3	Число Штреля менее 0,95	2,5	Германий	22,3	*
3	8...10	1:2	11,3	Число Штреля менее 0,95	2,5	Германий	20	*

\* — схема типа «cold-stop»: выходной зрачок совмещен с «холодной» диафрагмой ФПУ.

При синтезе оптических систем требования к количеству и материалу компонентов, применению асферических поверхностей, градиентных и дифракционных элементов не предъявлялись.

Оптические схемы синтезированных систем приведены на рис. 1, 2, 3, а их характеристики представлены в табл. 5. Синтез проводился с использованием возможностей САПР Zemax.

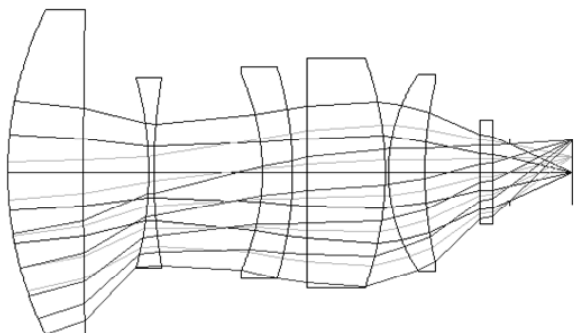


Рис. 1. Оптическая схема ОС спектрального диапазона 3,5...5 мкм,  $D/f' = 1:1,2$

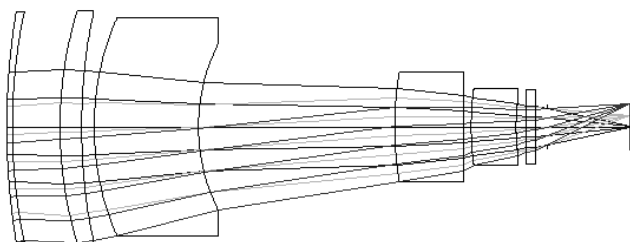


Рис. 2. Оптическая схема ОС спектрального диапазона 3,5...5 мкм,  $D/f' = 1:2,3$

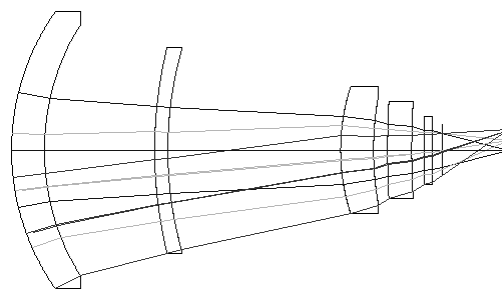


Рис. 3. Оптическая схема ОС спектрального диапазона 8...10 мкм

Стоит отметить, что для системы 1 (см. табл. 4) полностью выполнить указанные требования не удалось из-за большой величины угла наклона главного луча внеосевого пучка [9].

### Результаты точностного анализа и формирование требований к качеству поверхности входных окон охлаждаемых ФПУ

После синтеза систем был проведен расчет допусков в программе Zemax и определены предельные допустимые значения погрешностей изготовления поверхностей входных окон  $N$  и  $\Delta N$ . После определения погрешностей изготовления поверхностей был проведен анализ методом Монте Карло влияния качества изготовления поверхностей входных окон на изменение качества синтезированных оптических систем, который позволил сформировать требования к качеству изготовления поверхностей входных окон. По результатам анализа для ряда систем требования были ужесточены, чтобы падение качества систем было не более 5%. Результаты приведены в табл. 6.

Таблица 5

## Характеристики синтезированных ОС

№	$\Delta\lambda$ , мкм	$D/f'$	Качество изображения ( $k_0$ )	Диаметр пятна рассеяния в центре по уровню 80% энергии, мкм	Прим.
1	3,5 ... 5	1:1,2	Число Штреля более 0,57	12	Рис. 1
2	3,5 ... 5	1:2,3	Число Штреля более 0,97	18	Рис. 2
3	8 ... 10	1:2	Число Штреля более 0,9	34	Рис. 3

Таблица 6

Параметры качества входных окон и влияние их на качество ОС

№	$\Delta\lambda$ , мкм	$D/f'$	$N^*$	$\Delta N^*$	Качество изображения системы после расчета допусков ( $k$ )	Изменение качества, % $\left(\frac{k}{k_0} \cdot 100\%\right)$
1	3,5 ... 5	1:1,2	2	1	Число Штреля более 0,5	87,7
2	3,5 ... 5	1:2,3	5	2	Число Штреля более 0,95	97,9
3	8 ... 10	1:2	10	3	Число Штреля более 0,88	97,8

\* — данные приведены для  $\lambda = 0,6328$  мкм и диаметра входного окна 20 мм.

Проведенный анализ подтвердил, что к входным окнам ФПУ предъявляются сравнительно «легкие» требования. Их можно объяснить тем, что входные окна предназначены для работы в среднем и дальнем ИК-диапазоне (где длина волны более чем в 5 раз больше, чем длина волны, на которой производится контроль качества поверхностей). Также стоит отметить, что данные приведены для полного диаметра входного окна, в то время как световые диаметры, как правило, в 2—3 раза меньше. Именно по причине большего светового диаметра требования в случае системы 1 (табл. 6) существенно жестче, чем для системы 2.

Следует обратить внимание, что качество изготовления входных окон для системы длинноволнового ИК-диапазона не оказывает существенного влияния на качество изображения системы.

В ходе работы были проведены дополнительные исследования требований к качеству поверхностей входных окон системы средневолнового ИК-диапазона в зависимости от относительного отверстия. Дополнительное исследование проводилось для системы 1 (табл. 5). Было показано, что снижение относительного отверстия приводит к снижению требований к качеству поверхностей входных окон, что видно на графике, представленном на рис. 4.

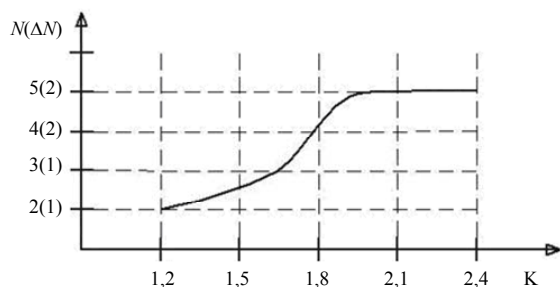


Рис. 4. График зависимости  $N$  и  $\Delta N$  от знаменателя относительного отверстия  $K$

### Заключение

В результате проведенного исследования было выявлено, что для систем средневолнового ИК-диапазона с относительным отверстием  $D/f' = 1:1,2$  допустимые ошибки изготовления  $N = 2$  и

$\Delta N = 1$ . При снижении относительного отверстия требования к качеству поверхностей входных окон снижаются до  $N = 5$  и  $\Delta N = 2$ . Для систем дальневолнового ИК-диапазона с относительным отверстием  $D/f' = 1:2$  и менее требования к качеству поверхностей входных окон должны быть не менее  $N = 10$  и  $\Delta N = 3$ .

С позиции оптического производства указанные требования легко достижимы. Однако учитывая нестандартный метод закрепления, а также разность давлений по обе стороны входного окна, входные окна изготовленных ФПУ необходимо подвергать контролю.

Дальнейшие исследования необходимо направить на проведение измерений качества поверхностей входных окон ФПУ интерференционным методом. На основе анализа интерферограмм предполагается получить коэффициенты Цернике, описывающие ошибки изготовления поверхностей, и провести оценку влияния данных ошибок на качество изображения реальных оптических систем.

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации НШ-2787.2014.9

### ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов А. Н. Проектирование узлов оптико-электронных приборов. Методические указания к выполнению курсового проекта. Учебное пособие — СПб: НИУ ИТМО, 2013.
2. ОАО «Швабе»: [Электронный ресурс]. Е., 2014. URL: <http://www.shvabe.com>. (Дата обращения: 18.01.2015).
3. Горелик Л. И., Полесский А. В., Семенченко Н. А. и др. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 2. С. 227.
4. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Филачев А. М. и др. // Прикладная физика. 2012. № 3. С. 61.
5. Ульянова Е. О. // Прикладная физика. 2012. № 3. С. 91.
6. Балиев Д. Л., Болтарь К. О., Власов П. В. и др. // Прикладная физика. 2014. № 2. С. 41.
7. Болтарь К. О., Власов П. В., Лопухин А. А. и др. // Прикладная физика. 2014. № 3. С. 67.
8. Болтарь К. О., Власов П. В., Лопухин А. А. и др. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 6. С. 733.
9. Заказов Н. П., Кирюшин С. И., Кузичев В. И. Теория оптических систем. — М.: Машиностроение, 1992.

## Quality requirements to the windows' optical surfaces of the second-generation of the cooled infrared photodetectors

*R. N. Gubaidullin, A. A. Kolesova, A. V. Lobachyov, and A. V. Polesskiy*

Orion R&P Association, Inc.  
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

*Received March 2, 2015*

***The results of the calculation of the requirements to quality of windows' optical surfaces of the second-generation of the MWIR and LWIR photodetectors were given. The analytical review of presented in the Russian IR-lens and photodetectors was realized. On basis of this review, the requirements to modern MWIR and LWIR optical systems were defined and held their development. Calculation of the requirements to quality of the manufacture of the window based on the analysis by developed optical system tolerances was conducted.***

PACS: 42.30.Va

*Keywords:* cooled photodetector, window, surface quality.

### REFERENCES

1. A. N. Ivanov, *Development of the Blocks for Optoelectronic Devices. A Tutorial*. (NIU ITMO, S-Pb., 2013) [in Russian].
2. URL: <http://www.shvabe.com>. (Shvabe, Inc., 2014).
3. L. I. Gorelik, A. V. Polesskiy, N. A. Semenchenko, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1**, 227 (2013).
4. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, A. M. Filachev, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 3, 61 (2012).
5. E. O. Ul'yanova, *Prikladnaya Fizika*, No. 3, 91 (2012).
6. D. L. Baliev, K. O. Boltar, P. V. Vlasov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 41 (2014).
7. K. O. Boltar, P. V. Vlasov, A. A. Lopukhin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 3, 67 (2014).
8. K. O. Boltar, P. V. Vlasov, A. A. Lopukhin, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1**, 733 (2013).
9. N. P. Zakaznov, S. I. Kiryushin, and V. I. Kuzichev, *Theory of Optical Systems* (Mashinostroenie, Moscow, 1992) [in Russian].