

УДК 621.397

## Определение требований к качеству оптических поверхностей входных окон неохлаждаемых матричных фотоприемных устройств ультрафиолетового и инфракрасного диапазона спектра

*А. А. Колесова, А. В. Лобачев, Н. А. Соломонова, К. А. Хамидуллин*

*Приведены результаты расчета требований к качеству поверхностей входных окон матричных фотоприемных устройств ультрафиолетового (УФ), ближнего инфракрасного (ИК) (0,9-1,7 мкм) и дальнего ИК (8-14 мкм) диапазонов спектра. Расчет требований к качеству изготовления входных окон был проведен на основе анализа допусков на качество изготовления поверхностей входных окон в синтезированных оптических системах УФ- и ИК-диапазонов. По своим основным параметрам (угловое поле, относительное отверстие, пятно рассеяния) синтезированные оптические системы соответствуют современным производимым в России и мире УФ- и ИК-объективам.*

PACS: 42.30.Va; 42.79.Pw

*Ключевые слова:* неохлаждаемое фотоприемное устройство, входное окно, качество поверхности, оптическая система, объектив.

### Введение

Основной задачей входного окна, входящего в состав фотоприемных устройств (ФПУ), является обеспечение прохождения излучения внутрь герметичного корпуса и попадания его на фоточувствительные элементы. Применение герметичного корпуса при создании и производстве ФПУ обуславливается необходимостью защиты фоточувствительной матрицы от воздействия окружающей среды (в первую очередь, от паров воды и пыли в окружающей среде), которое может привести к деградации параметров ФПУ.

Входное окно ФПУ является полноценным оптическим элементом, представляющим собой плоскопараллельную пластину, которая всегда учитывается при расчете и синтезе оптической системы (ОС) любого оптико-электронного прибора, поскольку вносит определенные aberrации. К входному окну, как и к любому оптическому элементу ОС, предъявляются требования к точности его геометрических размеров:

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

Из-за своей простоты плоскопараллельная пластина является чрезвычайно технологичным оптическим элементом, изготовление плоскопараллельной пластины высокого качества не представляет проблем. Основные проблемы появляются при закреплении данного элемента, т. к. при производстве фотоприемных устройств не используются классические методы крепления, поскольку они не обеспечивают заданный уровень герметизации. Применение методов крепления входных окон, используемых при производстве ФПУ, а именно пайка или клейка входного окна в корпус, приводят к деформации входных окон и, как следствие, к нарушению геометрии поверхности. В свою очередь, нарушение геометрии поверхности приводит к увеличению aberrаций, расширению пятна рассеяния и падению частотно-контрастной характеристики.

Целью работы является определение требований к входным окнам неохлаждаемых фотоприемных устройств УФ (290-360 нм), ближнего ИК (0,9-1,7 мкм) и дальнего ИК (8-14 мкм) диапазонов спектра.

### Описание порядка выполнения исследования

Поскольку определение требований к отдельным оптическим компонентам ОС может быть

Колесова Анастасия Александровна, студент<sup>1</sup>.

Лобачев Антон Васильевич, студент<sup>1,2</sup>.

Соломонова Наталья Алексеевна, студент<sup>1,2</sup>.

Хамидуллин Камиль Алиевич, инженер I кат.<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, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

Статья поступила в редакцию 7 августа 2015 г.

проведено только на основе анализа допусков на оптическую систему в целом, то исследование необходимо проводить следующим образом:

1) определить параметры объективов, которые влияют на требования к качеству входного окна, и определить значения этих параметров для объективов УФ, ближнего и дальнего ИК-диапазонов спектра;

2) определить параметры входных окон современных матричных ФПУ УФ- и ИК-диапазона спектра, производимых в России;

3) синтезировать оптические системы УФ- и ИК-диапазона спектра по параметрам определенным в п.1 и 2;

4) провести анализ допусков на оптическую систему и сформировать требования к точности соблюдения геометрии входных окон ФПУ.

**Определение перечня значимых параметров современных объективов для каждого из диапазонов**

Согласно этим методикам расчета требований к качеству поверхности, геометрическим раз-

мерам и положению оптических компонентов [1] требования на точность изготовления оптических компонентов определяются:

– требованиями к качеству изображения оптической системы;

– параметрами самого оптического компонента: толщиной, показателем преломления, оптической силой;

– параметрами работы оптического компонента: световой высотой, апертурой пучков на компоненте и его расположением в оптической системе.

Отсюда следует, что необходимо определить следующие параметры объективов: относительное отверстие, линейное поле изображения (определяется размером ФПУ), спектральный диапазон (определяется ФПУ) и качество изображения.

Анализ продукции ведущих российских и мировых производителей [2-4, 6-8, 10] показывает, что современные объективы УФ- и ИК-диапазона спектра, применяемые совместно с неохлаждаемыми ФПУ, имеют следующие параметры (табл. 1, 2, 3):

Таблица 1

*Параметры объективов УФ-диапазона спектра*

Наименование		Величина
Относительное отверстие, не более		1:1,8*
Линейное поле зрения ( $2\gamma'$ ), мм не более		11,3
Спектральный диапазон, нм		290-380
Качество изображения, л/мм (контраст 0,3)	Центр поля	50
	Край поля	30

\* для большинства УФ-объективов относительное отверстие менее 1:3.

Таблица 2

*Параметры объективов коротковолнового ИК-диапазона*

Наименование	Величина
Относительное отверстие, не более	1:1,4
Линейное поле зрения ( $2\gamma'$ ), мм не более	20,5
Спектральный диапазон, нм	800-1700
Качество изображения, л/мм (контраст 0,45) при $D/f' = 1:1,4$	25
Качество изображения, л/мм (контраст 0,45) при $D/f' = 1:2$	35

Таблица 3

*Параметры объективов длинноволнового ИК-диапазона неохлаждаемых ФПУ*

Наименование	Величина
Относительное отверстие, не более	1:0,9
Линейное поле зрения ( $2\gamma'$ ), мм не более	~11,3
Спектральный диапазон, мкм	8-14
Число Штреля, не менее	0,85

### Определение параметров входных окон современных матричных ФПУ

Результаты анализа данных о входных окнах и размерах фоточувствительных элементов неохлаждаемых матричных ФПУ российских производителей для ультрафиолетового, коротковолнового и длинноволнового ИК-диапазонов приведены в табл. 4 [2, 6-8].

### Синтез оптических систем УФ- и ИК-диапазонов спектра

В результате анализа отечественных оптических трактов и оптических схем ФПУ были сформулированы следующие исходные данные для синтеза оптических систем (табл. 5).

Таблица 4

*Данные по неохлаждаемым ФПУ, производимым в России*

Параметры	Величина
Толщина входного окна	1 мм
Материал входного окна	Лейкосапфир, Германий*
Расстояние от входного окна до ФЧЭ	~ 4 мм
Диаметр входного окна	~ 20 мм
Размер диагонали ФПУ	11,3 мм

\* — применяется для матричных ФПУ диапазона 8-14 мкм.

Таблица 5

*Требования к синтезируемым ОС*

№	$\Delta\lambda$ , мкм	$D/f'$	$2y'$ , мм	Качество изображения	Толщина входного окна, мм	Материал входного окна	Расстояние от ФЧЭ, мм
1	0,29-0,38	1:2,3	11,3	~40л/мм, контраст 0,3	1	Лейкосапфир	4
2	0,9-1,7	1:1,8	11,3	~40л/мм, контраст 0,45	1	Лейкосапфир	4
3	8-14	1:0,9	11,3	Число Штреля не менее 0,85	1	Германий	2,5

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. 1-3, а их характеристики представлены в табл. 6. Синтез проводился с использованием возможностей САПР Zemax.

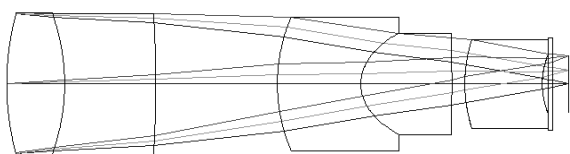


Рис. 1. Оптическая схема ОС спектрального диапазона 0,29-0,38 мкм,  $D/f' = 1:2,3$

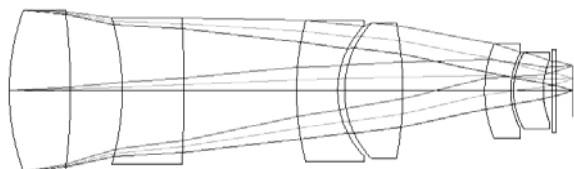


Рис. 2. Оптическая схема ОС спектрального диапазона 0,9-1,7 мкм,  $D/f' = 1:1,8$

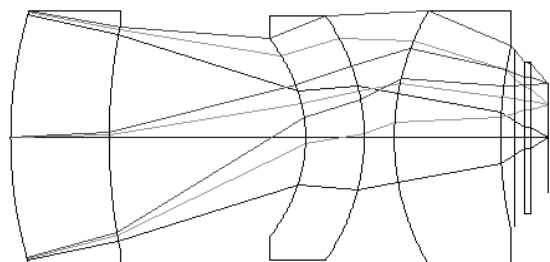


Рис. 3. Оптическая схема ОС спектрального диапазона 8-14 мкм,  $D/f' = 1:1,8$

Таблица 6

**Характеристики синтезированных ОС**

№	$\Delta\lambda$ , мкм	$D/f$ '	Число Штреля (центр поля/ край поля)	Частота по уровню контраста 0,3 (для системы № 2 по уровню контраста 0,45) л/мм (центр поля/край поля)	Диаметр пятна рассеяния по уровню 80 % энергии (центр поля/край поля)*, мкм	Примеч.
1	0,29-0,38	1:2,3	–	124/160	16,6/13,8	Рис. 1
2	0,9-1,7	1:1,8	0,46/0,2	67/51	12,6/15,4	Рис. 2
3	8-14	1:0,9	0,93/0,9	50,5/45,5	19/22	Рис. 3

\* — данные приведены для плоскости наилучшей установки.

**Результаты точностного анализа и формирование требований к качеству поверхности входных окон неохлаждаемых ФПУ**

По завершению 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 окончательные требования к качеству изготовления поверхностей входных окон. Результаты приведены в табл. 7-9.

Таблица 7

**Параметры качества входных окон и их влияние на качество ОС  $\Delta\lambda = 0,29-0,38$  мкм**

№	$N^*$	$\Delta N^*$	Частота по уровню контраста 0,3 л/мм (центр поля/ край поля)**	Диаметр пятна рассеяния по уровню 80 % энергии (центр поля/ край поля)**, мкм
1	1	1	131/160	16,8/13,7
2	2	2	117/161	16,3/13,9
3	3	1	117/161	16,6/13,9
4	3	2	133/161	17/13,8
5	5	1	117/161	16,2/13,7
6	5	2	117/161	16,3/13,7

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

\*\* — данные приведены для плоскости наилучшей установки.

Таблица 8

**Параметры качества входных окон и влияние их на качество ОС  $\Delta\lambda = 0,9-1,7$  мкм**

№	$N^*$	$\Delta N^*$	Число Штреля (центр поля / край поля)	Частота по уровню контраста 0,45 л/мм (центр поля / край поля)**	Диаметр пятна рассеяния по уровню 80 % энергии (центр поля / край поля)**, мкм
1	1	1	0,45/0,18	67/51	12,6/15,4
2	2	2	0,45/0,16	67/51	12,6/15,4
3	3	1	0,45/0,18	67/51	12,6/15,4
4	3	2	0,45/0,17	67/51	12,6/15,4
5	5	1	0,45/0,19	67/51	12,6/15,4
6	5	2	0,45/0,17	67/51	12,6/15,4

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

\*\* — данные приведены для плоскости наилучшей установки.

Таблица 9

**Параметры качества входных окон и влияние их на качество ОС  $\Delta\lambda = 8-14$  мкм**

№	$N^*$	$\Delta N^*$	Число Штреля (центр поля / край поля)	Частота по уровню контраста 0,3 л/мм (центр поля / край поля)**	Диаметр пятна рассеяния по уровню 80 % энергии (центр поля / край поля)**, мкм
1	1	1	0,933/0,896	50,5/45,5	19/22
2	2	2	0,934/0,895	50,5/45,5	19/22
3	3	1	0,935/0,887	51/45,5	19/22
4	3	2	0,935/0,887	51/44,5	19/22
5	5	1	0,935/0,893	51/44,5	19/22
6	5	2	0,936/0,883	51/44,5	19/22

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

\*\* — данные приведены для плоскости наилучшей установки.

### Заключение

Проведенный анализ показал, что требования, предъявляемые к форме поверхности входных окон неохлаждаемых матричных ФПУ ультрафиолетового, коротковолнового и длинноволнового ИК-диапазонов спектра, сравнительно невысоки (общая ошибка  $N = 5$ , местная ошибка  $\Delta N = 2$ ).

Такие результаты можно объяснить малой высотой апертурного пучка на входном окне [9]. Данная высота используется при расчетах допусков [1] и обратно пропорциональна их величине. В свою очередь, малая высота апертурного пучка на входном окне объясняется рядом особенностей неохлаждаемых ФПУ и оптических систем, используемых совместно с ними.

Входное окно в таких системах расположено близко к плоскости ФЧЭ и удалено от апертурной диафрагмы (и/или её изображения — выходного зрачка), которая, как правило, находится практически в «бесконечности». Такое расположение диафрагмы выбирается разработчиками оптических систем благодаря тому, что оно позволяет создать равномерную засветку поверхности ФЧЭ. Похожий ход лучей имеют приведенные выше синтезированные для моделирования оптические системы.

Стоит отметить, что пятно рассеяния синтезированных для моделирования систем составляет примерно 15 мкм и, следовательно, полученные результаты верны для матричных ФПУ с шагом не только  $30 \times 30$  мкм, но и  $15 \times 15$  мкм.

Несмотря на относительно невысокие требования к деформации входных окон, в процессе изготовления ФПУ необходим контроль качества поверхностей входных окон ФПУ интерференционным методом ввиду того, что технологические процессы могут привести к дополнительным большим деформациям входного окна ФПУ.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов А. Н. Проектирование узлов оптоэлектронных приборов. Учебное пособие. — СПб: НИУ ИТМО, 2013.
2. Швабе: [Электронный ресурс]. Е., 2014. URL: <http://www.shvabe.com>. (Дата обращения: 18.01.2015).
3. Объектив Nikon UV Nikkor 105mm/f4: [Электронный ресурс]. Germany, 2015. URL [http://lens-club.ru/lenses/item/c\\_3406.html](http://lens-club.ru/lenses/item/c_3406.html) (Дата обращения: 10.02.2015).
4. The Macrolens Collection Database : [Электронный ресурс]. М., 2015. URL [http://www.macrolenses.de/ml\\_detail\\_sl.php?ObjektiveNr=301](http://www.macrolenses.de/ml_detail_sl.php?ObjektiveNr=301)
5. Губайдуллин Р. Н., Колесова А. А., Лобачев А. В. и др. // Прикладная физика. 2015. № 2. С. 61.
6. Колесова А. А., Полесский А. В., Хамидуллин К. А. и др. // Прикладная физика. 2013. № 5. С. 63.
7. Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Яковлева Н. И. и др. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3. С. 344.
8. Бурлаков И. Д., Гринченко Л. Я., Дирочка А. И. и др. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 131.
9. Заказов Н. П., Кирюшин С. И., Кузичев В. И. Теория оптических систем. — М.: Машиностроение, 1992.
10. Austin Richards // Advanced Imaging Magazine, 2008. June. С. 10.

## Quality requirements to the windows' optical surfaces for the non-cooled ultraviolet and infrared photodetectors

*A. A. Kolesova<sup>1</sup>, A. V. Lobachyov<sup>1,2</sup>, N. A. Solomonova<sup>1,2</sup>, and K. A. Khamidullin<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Orion Research-and-Production Association  
9, Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia  
E-mail: [orion@orion-ir.ru](mailto:orion@orion-ir.ru)

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University  
5 2-nd Baumanskaya str., Moscow, 105005, Russia

*Received August 7, 2015*

*A calculation of the requirements to quality of the manufacture of the window based on the tolerances analysis by the quality of manufacturing surfaces of the windows developed optical system for the UVR and IR ranges was conducted. The results of the calculation of the requirements to quality of windows' optical surfaces for the UVR, NIR (0.9-1.7  $\mu\text{m}$ ) and LWIR (8-14  $\mu\text{m}$ ) photodetectors are presented. According to its basic parameters (angular field, relative aperture, scattering spot), the developed optical systems meet to the modern UV and IR lenses produced in Russia and the world.*

PACS: 42.30.Va; 42.79.Pw

*Keywords:* non-cooled photodetector, the window, the surface quality, optical system, lens.

#### REFERENCES

1. A. N. Ivanov, *Projecting the Units of Optoelectronic Devices* (NIU ITMO. S-Pb, 2013) [in Russian].
2. <http://www.shvabe.com>
3. Nikon UV Nikkor 105mm/f4: [http://lens-club.ru/lenses/item/c\\_3406.html](http://lens-club.ru/lenses/item/c_3406.html) (Germany, 2015).
4. The Macrolens Collection Database, [http://www.macrolenses.de/ml\\_detail\\_sl.php?ObjektiveNr=301](http://www.macrolenses.de/ml_detail_sl.php?ObjektiveNr=301)
5. R. N. Gubaidullin, A. A. Kolesova, A. V. Lobachev, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 61 (2015).
6. A. A. Kolesova, A. V. Poleskiy, K. A. Khamidullin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 63 (2013).
7. I. D. Burlakov, K. O. Boltar, N. I. Iakovleva, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1**, 344 (2013).
8. I. D. Burlakov, L. Ya. Grinchenko, A. I. Dirochka, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **2**, 131 (2014).
9. N. P. Zakaznov, S. I. Kiryushin, and V. I. Kuzichev, *Theory of Optical Systems* (Mashinostroenie, Moscow, 1992) [in Russian].
10. Richards Austin, *Advanced Imaging Magazine*, June, 10 (2008).

\* \* \*