

# ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ НА ОСНОВЕ МАТРИЧНЫХ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА 8–12 МКМ

© 2013 г. Е. О. Ульянова

Новосибирский филиал Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
“Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники”, г. Новосибирск  
E-mail: helen@oesd.ru

Разработаны оптические системы для тепловизионных приборов на основе матричных фотоприемных устройств различного типа для работы в спектральном диапазоне 8–12 мкм. Приведены основные параметры и характеристики оптических систем, а также оценка качества изображения.

**Ключевые слова:** оптические системы, тепловизионные приборы, качество изображения.

Коды OCIS: 220.0220, 110.6820.

Поступила в редакцию 20.12.2012.

Тепловизоры представляют собой широкий класс приборов, предназначенных для дистанционного контроля и детального исследования объектов наблюдения.

В состав тепловизионных (ТПВ) приборов наряду с модулями фотоприемного устройства, электронной обработки, управления и источником питания входит оптическая система, которая формирует изображение в плоскости фотоприемного устройства (ФПУ). В зависимости от области применения ТПВ приборов в их составе используются как охлаждаемые, так и неохлаждаемые ФПУ.

Выбор типа ФПУ для конкретной практической области применения – задача, требующая одновременного анализа различных и многочисленных факторов, относящихся как к технико-экономическим параметрам собственно ФПУ и технологии его изготовления, так и к конкретным условиям его применения в составе ТПВ прибора.

Вследствие различий в топологии и прочих параметрах и характеристиках ФПУ возникает необходимость в сопряжении параметров и характеристик оптической системы с параметрами и характеристиками ФПУ. В связи с этим возникают различные принципы построения оптических систем для ТПВ приборов.

В Филиале ИФП СО РАН “КТИПМ” разработан и изготовлен ряд оптических систем для ТПВ приборов на базе матричных ФПУ различного типа, работающих в спектральном

диапазоне 8–12 мкм. В статье приведены основные параметры и характеристики оптических систем, а также оценка качества изображения.

## 1. Оптические системы для тепловизионных приборов на основе охлаждаемых матричных фотоприемных устройств

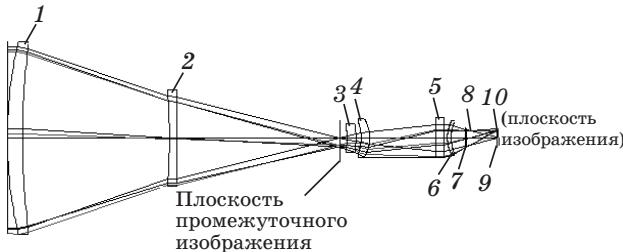
Охлаждаемые матричные фотоприемные устройства (МФПУ), как правило, требуют охлаждения до низких температур, что заметно усложняет конструкцию ФПУ и всего ТПВ прибора.

В частности, охлаждаемые ФПУ, в отличие от неохлаждаемых, размещаются внутри вакуумного криостатированного корпуса, что налагивает дополнительные ограничения на допустимую величину заднего фокального отрезка. Для того чтобы предотвратить попадание на ФПУ собственного или рассеянного излучения оптических деталей, их оправ или других элементов конструкции и тем самым не снизить контраст наблюдаемого изображения и чувствительность ТПВ прибора, в конструкции криостата предусмотрена охлаждаемая диафрагма. При сопряжении оптической системы с охлаждаемым МФПУ эта диафрагма также выполняет функцию апертурной, т. е. не допускает попадание на ФПУ постороннего излучения вне пределов заднего апертурного угла [1].

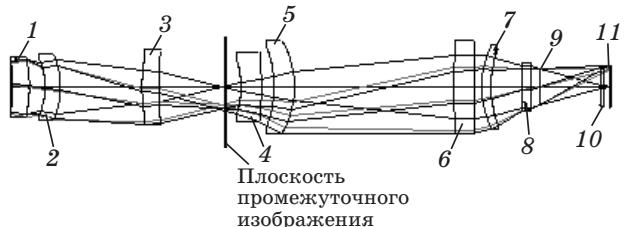
При данной конструкции оптимальной оптической системой для ФПУ будет система, у которой выходной зрачок совмещен с охлаждаемой диафрагмой криостата.

В Филиале ИФП СО РАН “КТИПМ” разработаны и изготовлены оптические системы (как со сферическими, так и с асферическими поверхностями) для тепловизионных приборов

на основе охлаждаемых МФПУ [2–6]. Схемы оптических систем с фокусными расстояниями 250 и 30 мм без асферических поверхностей для ТПВ приборов на основе охлаждаемых МФПУ представлены на рис. 1 и 2 соответственно. В табл. 1 и 2 приведены их основные характеристики и параметры оценки качества изображения.



**Рис. 1.** Оптическая система с фокусным расстоянием 250 мм без асферических поверхностей для ТПВ приборов на основе охлаждаемых МФПУ. 1–2 – входной объектив, 3–6 – проекционная система, 7 – входное окно криостата, 8 – охлаждаемая диафрагма, 9 – охлаждаемый фильтр, 10 – плоскость фоточувствительных элементов матричного ФПУ.



**Рис. 2.** Оптическая система с фокусным расстоянием 30 мм без асферических поверхностей для ТПВ приборов на основе охлаждаемых МФПУ. 1–3 – входной объектив, 4–7 – проекционная система, 8 – входное окно криостата, 9 – охлаждаемая диафрагма, 10 – охлаждаемый фильтр, 11 – плоскость фоточувствительных элементов матричного ФПУ.

**Таблица 1.** Основные характеристики оптических систем без асферических поверхностей и с использованием асферики для ТПВ приборов на основе охлаждаемых МФПУ

Характеристика	Со сферическими поверхностями		С асферикой	
Фокусное расстояние, мм	250	30	250	30
Относительное отверстие	1:1,93	1:1,94	1:1,93	1:1,93
Угловое поле зрения, град	2,77	23,3	2,75	23,15
Рабочий спектральный диапазон, мкм	7,7–10,3		7,7–10,3	
Количество линз	6	7	5	6
Длина, мм/масса, г	350/900	175/75	355/800	180/50

**Таблица 2.** Параметры оценки качества изображения оптических систем без асферических поверхностей и с использованием асферики для ТПВ приборов на основе охлаждаемых МФПУ

Параметр	Со сферическими поверхностями		С асферикой	
Фокусное расстояние, мм	250	30	250	30
Геометрический радиус пятна рассеяния для осевой точки, мкм	18	12,1	16,3	16,6
Геометрический радиус пятна рассеяния на краю поля зрения, мкм	22,7	18	21,4	16,7
КПМ* при 30 л/мм для осевой точки, отн. ед	0,29	0,34	0,31	0,35
КПМ при 30 л/мм на краю поля зрения, отн. ед	0,24	0,17	0,19	0,12
Функция концентрации энергии в пятне радиусом 15 мкм для осевой точки, отн. ед	0,66	0,75	0,69	0,78
Функция концентрации энергии в пятне радиусом 15 мкм на краю поля зрения, отн. ед	0,67	0,68	0,64	0,64

КПМ – коэффициент передачи модуляции.

Изменение фокусного расстояния представленных оптических систем осуществляется заменой линзовых компонентов во входном объективе, при этом проекционная система в обеих представленных системах остается неизменной. Все компоненты объективов выполнены из германия и селенида цинка и имеют сферические поверхности.

Материалы линзовых и других компонентов многих оптических систем, работающих в инфракрасной (ИК) области спектра, обычно имеют высокие показатели преломления ( $n = 2,4\text{--}4,0$ ). Это приводит к заметному увеличению потерь на отражение на границах раздела воздуха и материала оптической детали. Для сравнительно широкого рабочего спектрального диапазона, даже при наличии многослойного просветления, потери на отражение могут быть весьма велики. Увеличение коэффициента пропускания особенно важно для оптических систем, работающих в длинноволновом диапазоне 8–14 мкм, поскольку контрасты между низкотемпературными объективами и фонами здесь малы, а коэффициенты пропускания многих оптических материалов сравнительно невелики [1]. Для повышения коэффициента пропускания всей оптической системы необходимо сократить количество ее компонентов. Одним из способов уменьшения количества компонентов в оптической системе является использование асферических поверхностей.

Разработанные в Филиале ИФП СО РАН “КТИПМ” оптические системы с использованием асферики для ТПВ приборов на основе охлаждаемых МФПУ [2–6] позволили уменьшить количество компонентов по сравнению с приведенными выше оптическими системами, обеспечивая при этом аналогичное качество изображения. На рис. 3 и 4 представлены оптические схемы оптических систем с фокусными расстояниями 250 и 30 мм с использованием асферики. Все компоненты оптических систем выполнены из германия и селенида цинка и имеют сферические поверхности, за исключением второй поверхности последнего линзового компонента в проекционной системе, которая выполнена асферической. Уравнение асферической поверхности имеет вид:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4,$$

где  $z$  – координата асферической поверхности,  $c$  – кривизна поверхности,  $r$  – радиальная коор-

дината в линейных единицах схемы,  $k$  – коническая константа,  $\alpha$  – коэффициент асферики.

В табл. 1 и 2 приведены основные характеристики и параметры оценки качества изображения оптических систем с использованием асферики.

Как видно из рисунков, особенностью всех представленных оптических систем без асферических поверхностей и с использованием асферики для ТПВ приборов на основе охлаждаемых МФПУ является применение промежуточной плоскости изображения. В данном случае оптическая система строится по следующему принципу: входной объектив формирует промежуточное изображение, а проекционная система проецирует данное изображение в плоскость фоточувствительных элементов МФПУ и, кроме того, компенсирует остаточные aberrации входного объектива. Хотя данный принцип построения оптической схемы приводит к некоторому усложнению оптической системы, он позволяет достичь оптималь-

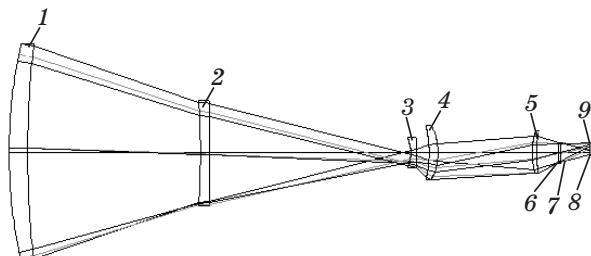


Рис. 3. Оптическая система с фокусным расстоянием 250 мм с использованием асферики для ТПВ приборов на основе охлаждаемых МФПУ. 1–2 – входной объектив, 3–5 – проекционная система, 6 – входное окно криостата, 7 – охлаждаемая диафрагма, 8 – охлаждаемый фильтр, 9 – плоскость фоточувствительных элементов матричного ФПУ.

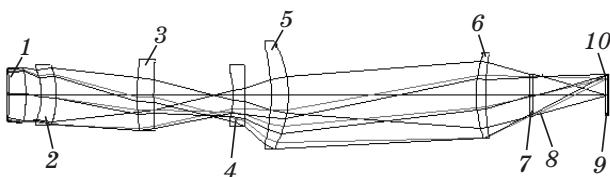


Рис. 4. Оптическая система с фокусным расстоянием 30 мм с использованием асферики для ТПВ приборов на основе охлаждаемых МФПУ. 1–3 – входной объектив, 4–6 – проекционная система, 7 – входное окно криостата, 8 – охлаждаемая диафрагма, 9 – охлаждаемый фильтр, 10 – плоскость фоточувствительных элементов матричного ФПУ.

ного сочетания между качеством изображения, даваемого оптической системой, и параметрами охлаждаемого МФПУ. Кроме того, использование промежуточной плоскости изображения позволило значительно уменьшить массогабаритные характеристики фронтальных оптических компонентов и, как следствие, оптических систем в целом.

Применение промежуточной плоскости изображения позволяет при неизменной проекционной системе использовать взаимозаменяемые линзовые компоненты во входном объективе для смены фокусного расстояния (поля зрения), а также дает возможность установки устройства микросканирования в месте наименьших световых диаметров. При использовании режима микросканирования возможно получение формата кадра в 2 раза больше исходного, что повышает разрешающую способность ТПВ прибора в целом.

Все разработанные оптические системы без асферических поверхностей и с использованием асферики для ТПВ приборов на основе охлаждаемых МФПУ могут быть сопряжены как с зарубежными, так и с отечественными охлаждаемыми матричными приемниками, формат и технические характеристики которых позволяют создавать матричные ТПВ приборы, аналогичные зарубежным.

## 2. Оптические системы для тепловизионных приборов на основе неохлаждаемых матричных фотоприемных устройств

В последние десятилетия при создании недорогих ТПВ приборов массового применения прослеживается тенденция использовать неохлаждаемые МФПУ.

Неохлаждаемые МФПУ используются главным образом в малогабаритных ТПВ приборах. В настоящее время производством микроболометрических МФПУ занимаются многие фирмы в России, США, Германии, Великобритании, Франции, Израиле и др. Хотя неохлаждаемые приемники излучения обладают меньшей чувствительностью и большей инерционностью по сравнению с охлаждаемыми МФПУ, ТПВ системы с такими приемниками имеют минимальные массогабаритные характеристики и не используют дорогостоящих устройств охлаждения, имеющих ограниченный ресурс наработки. Основным недостатком ТПВ систем на основе неохлаждаемых микроболоме-

трических приемников является то, что для формирования ИК изображения требуется использование оптических систем с высокой светосилой.

При разработке оптических систем для ТПВ приборов на основе неохлаждаемых МФПУ огромное значение придается минимизации массогабаритных характеристик. При этом оптические системы должны обеспечивать высокое качество изображения. Поэтому одной из основных задач, решаемых в процессе разработки оптических систем для ТПВ приборов на основе неохлаждаемых МФПУ, является задача получения необходимых рабочих характеристик при минимальных массогабаритных параметрах, что и определяет принцип построения таких систем.

В Филиале ИФП СО РАН “КТИПМ” разработаны оптические системы (со сферическими и асферическими линзами) для ТПВ приборов на основе неохлаждаемых МФПУ [5, 7, 8]. Схемы оптических систем для ТПВ приборов на основе неохлаждаемых МФПУ представлены на рис. 5–7. В табл. 3–6 приведены их

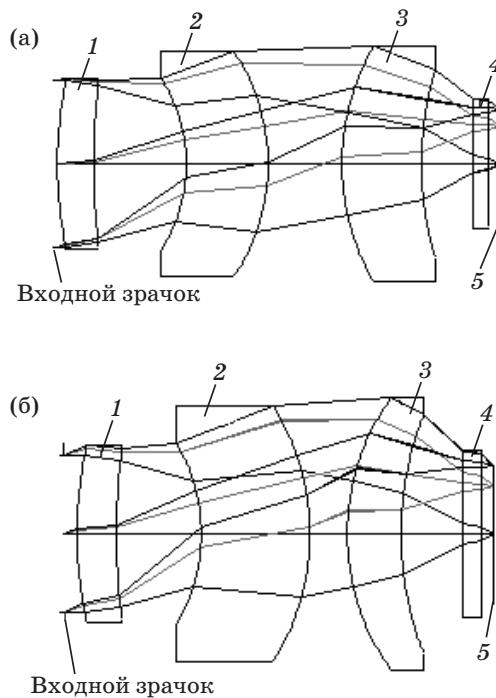
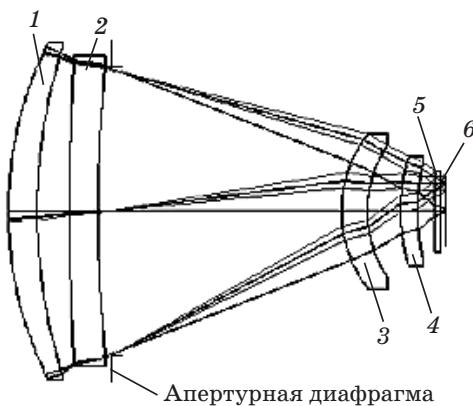
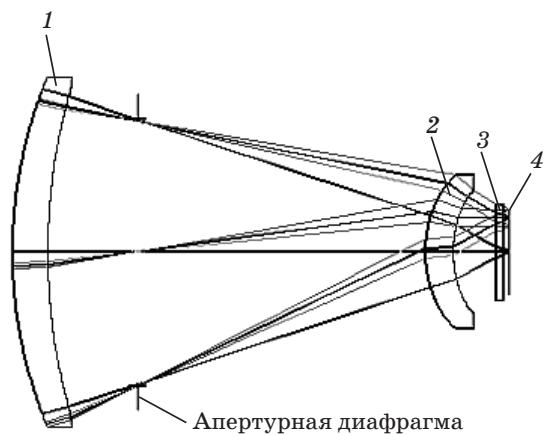


Рис. 5. Оптические системы с фокусными расстояниями 10,4 мм и 8,2 мм для ТПВ приборов на основе неохлаждаемых МФПУ. а – с полем зрения  $30^\circ \times 22,72^\circ$  ( $f = 10,4$  мм), б – с полем зрения  $40^\circ \times 30^\circ$  ( $f = 8,2$  мм). 1–3 – линзы, 4 – входное окно МФПУ, 5 – плоскость фоточувствительных элементов матричного ФПУ



**Рис. 6.** Оптическая система с фокусным расстоянием 45 мм со сферическими поверхностями для ТПВ приборов на основе неохлаждаемых МФПУ. 1–4 – линзы, 5 – входное окно МФПУ, 6 – плоскость фоточувствительных элементов матричного ФПУ.



**Рис. 7.** Оптическая система с фокусным расстоянием 45 мм с асферическими поверхностями для ТПВ приборов на основе неохлаждаемых МФПУ. 1–2 – линзы, 3 – входное окно МФПУ, 4 – плоскость фоточувствительных элементов матричного ФПУ.

**Таблица 3.** Основные характеристики оптических систем для ТПВ приборов на основе неохлаждаемых МФПУ [7]

Фокусное расстояние, мм	10,4	8,2
Относительное отверстие	1:1	1:1
Угловое поле зрения, градусов	30×22,72	40×30
Рабочий спектральный диапазон, мкм	8–12	8–12
Количество линз	3	3
Длина, мм	27	22
Масса, г	10	7

**Таблица 4.** Параметры оценки качества изображения оптических систем для ТПВ приборов на основе неохлаждаемых МФПУ [7]

Фокусное расстояние, мм	10,4	8,2
Геометрический радиус пятна рассеяния для осевой точки, мкм	4,7	4,1
Геометрический радиус пятна рассеяния на краю поля зрения, мкм	17,6	26,8
КПМ при 30 л/мм для осевой точки, отн. ед	0,58	0,57
КПМ при 30 л/мм на краю поля зрения, отн. ед	0,40	0,30
Функция концентрации энергии в пятне радиусом 17,5 мкм для осевой точки, отн. ед	0,87	0,88
Функция концентрации энергии в пятне радиусом 17,5 мкм на краю поля зрения, отн. ед	0,85	0,80

КПМ – коэффициент передачи модуляции.

**Таблица 5.** Основные характеристики оптических систем со сферическими и асферическими поверхностями для ТПВ приборов на основе неохлаждаемых МФПУ [8]

Характеристика	Со сферическими поверхностями	С асферическими поверхностями
Фокусное расстояние, мм	45	45
Относительное отверстие	1:0,8	1:1
Угловое поле зрения, градусов (по диагонали кадра)	15	15
Рабочий спектральный диапазон, мкм	8–11	8–11
Количество линз	4	2
Длина, мм	77	70
Масса, г	140	60

**Таблица 6.** Параметры оценки качества изображения оптических систем со сферическими и асферическими поверхностями для ТПВ приборов на основе неохлаждаемых МФПУ [8]

Параметр	Со сферическими поверхностями	С асферическими поверхностями
Фокусное расстояние, мм	45	45
Геометрический радиус пятна рассеяния для осевой точки, мкм	8,2	10,5
Геометрический радиус пятна рассеяния на краю поля зрения, мкм	24,0	20,9
КПМ при 30 л/мм для осевой точки, отн. ед	0,67	0,54
КПМ при 30 л/мм на краю поля зрения, отн. ед	0,58	0,51
Функция концентрации энергии в пятне радиусом 12,5 мкм для осевой точки, отн. ед	0,87	0,79
Функция концентрации энергии в пятне радиусом 12,5 мкм на краю поля зрения, отн. ед	0,84	0,75

КПМ – коэффициент передачи модуляции.

основные характеристики и параметры оценки качества изображения.

## Выводы

Представленные в статье оптические системы обладают хорошим качеством изображения, позволяющим использовать их в тепловизионных приборах на основе охлаждаемых и неохлаждаемых МФПУ для решения задач обнаружения, распознавания и идентификации объектов наблюдения.

Из вышеприведенных данных следует, что в зависимости от того, какой тип МФПУ будет

использоваться в тепловизионном приборе, зависит принцип построения оптической системы. При использовании охлаждаемого МФПУ для обеспечения необходимых параметров тепловизионного прибора требуется применение более сложной оптической системы, чем при использовании неохлаждаемого МФПУ.

В связи с интенсивным развитием МФПУ также возникает необходимость в модернизации оптических систем. На основе полученных результатов намечены пути улучшения параметров оптических систем для тепловизионных приборов.

\* \* \* \* \*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы “смотрящего” типа // М.: Логос, 2004. С. 94, 140.
2. Ульянова Е.О., Шатунов К.П. Термокомпенсация в оптической системе тепловизионного прибора // Прикладная физика. 2012. № 2. С. 116–120.
3. Ульянова Е.О., Шатунов К.П. Оптическая система тепловизионных приборов // Патент на полезную модель RU №118446. 2012.
4. Ульянова Е.О. Оптическая система с двумя полями зрения для тепловизионных приборов на основе матричных фотоприемных устройств // Прикладная физика. 2012. № 3. С. 91–94.
5. Ульянова Е.О. Оптические системы тепловизионных приборов // Труды 22-й Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. М.: 22–25 мая 2012. С. 303–305.
6. Ульянова Е.О. Схемы построения объективов тепловизионных приборов // Труды 22-й Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. М.: 22–25 мая 2012. С. 305–307.
7. Ульянова Е.О. Светосильные объективы для беспилотных летательных аппаратов // Изв. Самарского научного центра РАН. 2010. Т. 12. № 4. С. 637–641.
8. Ульянова Е.О. Светосильные объективы для неохлаждаемых тепловизионных модулей // Труды 22-й Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. М.: 22–25 мая 2012. С. 301–303.