

Физическая аппаратура и её элементы

УДК 621.397

Светосильный двухдиапазонный инфракрасный объектив

Е. А. Бедарева, Л. И. Горелик, А. А. Колесова, А. В. Полесский,
Н. А. Семенченко, А. И. Шкетов

Приведены результаты разработки светосильного двухдиапазонного инфракрасного объектива, построенного на основе четырех сферических компонентов. Объектив обладает качеством изображения, близким к дифракционному, и высоким пропусканием без просветления компонентов объектива. Одновременно в статье приведены результаты расчетных исследований по применению объектива с современными двухдиапазонными фотоприемными устройствами на основе KPT и QWIP (SLS II type).

PACS: 42.30.Va

Ключевые слова: светосильный двухдиапазонный объектив, инфракрасная техника, MWIR/LWIR, Dual-band IR.

Введение

Решение задач выделения полезных оптических сигналов и образов на фоне посторонних мешающих, излучающих и отражающих полей является чрезвычайно важным для современных оптико-электронных систем различного назначения [1]. Высокоэффективным методом решения данных задач является увеличение числа информационных каналов за счет увеличения количества спектральных диапазонов работы.

Ранее главными факторами, которые сдерживали развитие двух- и многодиапазонных систем, являлись повышенные габариты и вес, вызванные необходимостью применения в системе различных фотоприемных устройств и оптических трактов. Последние достижения в части разработки двухдиапазонных фотоприемных устройств

позволили создавать системы в размерах и габаритах однодиапазонных, т. е. потенциально существенно расширить области их применения.

Анализ литературы и данных, представляемых различными компаниями, [2—5] показал, что в настоящее время наибольший прогресс достигнут в части создания двухдиапазонных матичных фотоприемных устройств (МФПУ), одновременно принимающих излучение в диапазонах 3—5 мкм (MWIR) и 8—12 мкм (LWIR).

Комбинирование MWIR- и LWIR-каналов позволяет объединить в одной системе все преимущества данных диапазонов. В частности, при работе системы в зимних условиях в средней полосе России в MWIR-диапазоне резко падает контраст лучистости и существенно ухудшаются ТТХ системы по сравнению с LWIR-диапазоном, а в теплых широтах при высокой влажности в LWIR-диапазоне характеристики ухудшаются из-за высокого атмосферного поглощения на парах воды.

Помимо МФПУ, одним из ключевых элементов двухдиапазонных систем является объектив, к которому также предъявляются достаточно жесткие требования в части качества изображения и степени пропускания ИК-излучения.

Целью данной работы является разработка отечественного светосильного двухдиапазонного инфракрасного объектива, построенного на основе четырех сферических компонентов для получения качества изображения, близкого к дифракционному, а также обладающего высоким пропусканием без специального просветления своих компонентов.

Бедарева Елизавета Александровна, техник¹, студент².

Горелик Леонид Иосифович, главный специалист¹.

Колесова Анастасия Александровна, техник¹, студент².

Полесский Алексей Викторович, главный метролог¹.

Семенченко Наталья Александровна, техник¹, студент².

Шкетов Алексей Иванович, главный специалист¹.

¹ООО «НПО «Орион».

Россия, 111123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/ 2.

E-mail: orion@orion-ir.ru; av22236@bk.ru

²Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана.

Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1.

Статья поступила в редакцию 10 августа 2014 г.

© Бедарева Е. А., Горелик Л. И., Колесова А. А.,
Полесский А. В., Семенченко Н. А., Шкетов А. И., 2014

Обзор состояния разработок двухдиапазонных объективов в России и за рубежом

За рубежом выпуском двухдиапазонных объективов занимается ряд компаний, среди которых следует отметить Janos Technology Inc. и IR-Cam GmbH. Ими созданы линейки специализированных двухдиапазонных объективов (3,5—10,5 мкм) с различными фокусными расстояниями для работы с охлаждаемыми МФПУ. Сводные характеристики объективов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики зарубежных широкодиапазонных объективов

Наименование	Величина
Фокусное расстояние, мм	25—100
Относительное отверстие	1:2—1:2,3
Диagonal МФПУ, мм	14
Шаг МФПУ, мкм	15—30
Коэффициент пропускания, %	~75

В России проблемой создания двухдиапазонных объективов занимаются уже свыше 20 лет. В частности, имеются данные о работах в ОАО «Швабе-Прибор» [6, 7], ФГБОУ ВПО «СГГА» [8], ОАО «НПО «Орион» [9, 10]. Тем не менее, состояние разработок двухдиапазонных объективов в настоящее время в отечественной промышленности следует оценить как находящееся фактически на начальном этапе.

Основной проблемой, возникающей при создании объективов такого класса, является ограниченность в выборе материалов, имеющих хорошо отработанную технологию обработки и прозрачных в широком диапазоне спектра. К таким материалам можно отнести Ge, GaAs, ZnS, ZnSe, BaF₂ и мышьяковистые стекла.

Наибольшие затруднения при создании линзовых двухдиапазонных систем вызывает необходимость получения высокого качества изображения при использовании малого количества сферических компонентов. Это условие, как правило, можно выполнить только за счет применения различных комбинаций материалов с достаточно высоким показателем преломления (более 2).

Применение зеркальных двухдиапазонных систем ограничено из-за того, что для большинства промышленных применений целесообразно использовать широкопольные, т. е. линзовые схемы, которые позволяют обеспечивать практически любые поля зрения.

В связи с этим практическая реализация таких высококачественных линзовых объективов может быть осуществлена только при наличии отработанного высокопрочного (0 группа прочности) двухдиапазонного просветляющего покрытия. К сожалению, отечественные покрытия такого

класса отсутствуют, и поэтому основным требованием при создании широкодиапазонного объектива было обеспечение его пропускания на уровне 65—70 % без использования добавочных просветляющих покрытий.

Описание оптической схемы светосильного двухдиапазонного объектива

Расчет объектива выполнялся исходя из следующих основных требований:

- спектральный диапазон 3,5—10,5 мкм;
- объектив должен входить в состав прибора «средней дальности» с угловым размером элемента порядка 0,5 мрад;
- в приборе используется МФПУ формата 320×256 и шагом 30 мкм;
- количество оптических компонентов не более 4;
- относительное отверстие 1:1,8.
- объектив должен обеспечивать пропускание не менее 65 % без просветления оптических компонентов;
- в объективе должны быть использованы технологически хорошо отработанные материалы со сферическими поверхностями.

В результате, была разработана оптическая схема (рис. 1), обеспечивающая характеристики, приведенные в табл. 2. Входной зрачок находится на первой поверхности системы. При проведении расчета учитывалось входное окно, выполненное из Ge толщиной 2,5 мм.

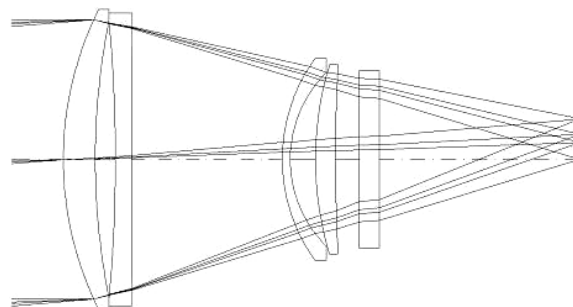


Рис. 1. Оптическая схема двухдиапазонного объектива

Таблица 2

Характеристики оптической системы

Наименование	Величина
Спектральный диапазон*, мкм	3,5—10,5
Фокусное расстояние, мм	60
Относительное отверстие	1:1,7
Поле зрения (2ω, град)	11,7
Рабочий отрезок, мм	30,5

* Спектральный диапазон был выбран из анализа характеристик спектральной чувствительности разработанных в настоящее время двухдиапазонных зарубежных МФПУ на основе Cd_xHg_{1-x}Te и QWIP (SLS II type).

Разработанный двухдиапазонный объектив, построенный на выбранной комбинации материалов, без применения просветляющих покрытий обеспечивает пропускание $\sim 68\%$ в рабочем спектральном диапазоне, а также прозрачен в видимом диапазоне, что существенно облегчает процесс его юстировки.

Объектив предназначен для систем, построенных на основе существующих зарубежных и перспективных российских двухдиапазонных матриц формата до 320×256 и с шагом 30 мкм.

Расчетное качество изображения разработанного объектива для плоскостей наилучшего изображения соответствует площадке 30×30 мкм

по уровню энергии 80% для диапазона $3,5\text{--}5$ мкм и не менее 70% для диапазона $8\text{--}10,5$ мкм. Распределение концентрации энергии в пятне приведено на рис. 2.

Анализ возможности применения объектива с современными двухдиапазонными МФПУ

На рис. 3 приведена зависимость числа Штреля разработанного светосильного объектива для диапазонов $3,5\text{--}5$ и $8\text{--}10,5$ мкм от величины смещения плоскости изображения. За ноль принята плоскость наилучшего изображения для обоих диапазонов, рекомендованная программой оптического расчета.

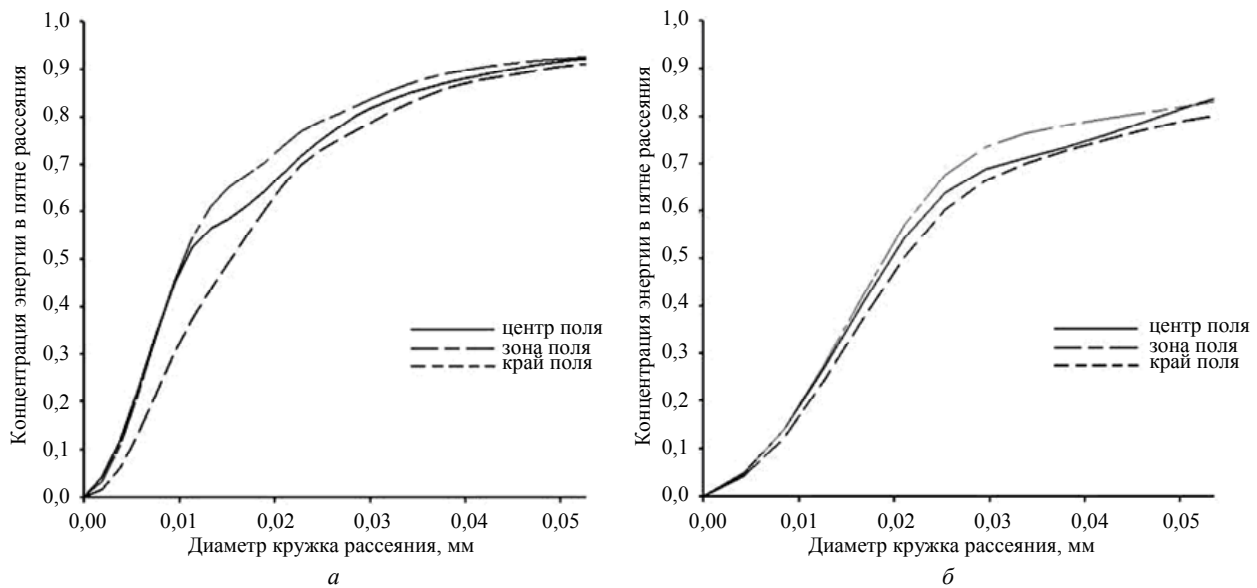


Рис. 2. Концентрация энергии в пятне двухдиапазонного объектива в диапазонах (а) — $3,5\text{--}5$ мкм, (б) — $8\text{--}10,5$ мкм

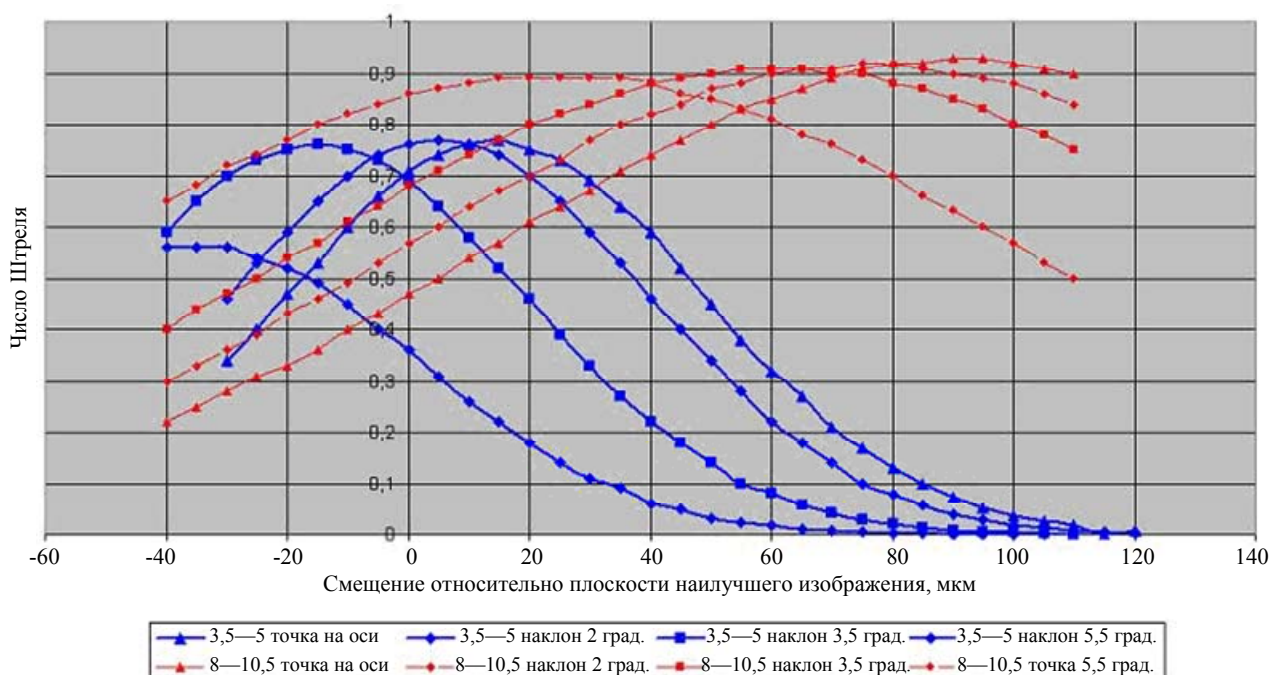


Рис. 3. Зависимость числа Штреля от величины смещения плоскости изображения

Как видно из рис. 3, расстояние между плоскостями наилучшего изображения в диапазоне 3,5—5 и 8—10,5 мкм составляет примерно 65 мкм. При этом плоскость наилучшего изображения для диапазона 3,5—5 мкм находится раньше по ходу лучей, чем для диапазона 8—10,5 мкм.

Такое расположение плоскостей (MWIR раньше, чем LWIR) вполне согласуется с расположением фоточувствительных элементов современных двухдиапазонных МФПУ. Однако анализ различных источников [11—13] показал, что характерное расстояние между фоточувствительными слоями в КРТ МФПУ составляет от 8 до 14 мкм, а в МФПУ на основе QWIP (SLS II type) около 1 мкм.

Это означает, что данный объектив можно использовать и в качестве универсального оптического тракта в однодиапазонных системах. Дополнительно проведенный анализ подтвердил, что объектив хорошо подходит для двухдиапазонных систем (обеспечивает число Штреля порядка 0,8 для всех наклонов MWIR и LWIR диапазонов) при диафрагмировании до 1:2,3.

Заключение

На основе проведенных исследований по созданию широкодиапазонных оптических трактов был разработан светосильный двухдиапазонный линзовый объектив с четырьмя сферическими компонентами.

Объектив предназначен для оптико-электронных систем, построенных на основе существующих зарубежных и перспективных российских двухдиапазонных МФПУ формата до 320×256 с шагом 30 мкм при относительном отверстии 1:2,3. Такой объектив одновременно может использоваться в качестве универсального

оптического тракта в однодиапазонных системах с относительным отверстием 1:1,7.

Расчетный коэффициент пропускания объектива без нанесения просветляющих покрытий составляет ~68 %.

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации НШ-2787.2014.9.

Литература

1. Тарасов В. В., Якушников Ю. Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. — Логос, 2004.
2. Destefanis G., Ballet P., Baylet J., et al. // Proc. SPIE. 2006. V. 6206. P. 62060B
3. King D. F., Radford W. A., Patten E. A., et al. // Proc. SPIE. 2006. V. 6206. P. 62060S.
4. Tribolet P., Destefanis G., Ballet P., et al. // Proc. SPIE. 2008. V. 6940-6942, 6946-6952.
5. Gunapala S. D., Bandara S. V., Liu J. K., et al. // IEEE Photonics Technology Letters. V. 20. No. 9. P. 709.
6. Двухспектральный инфракрасный объектив с вынесенной в пространство изображений апертурной диафрагмой (патент РФ № 2410733).
7. Двухдиапазонный инфракрасный светосильный объектив (патент РФ № 2475787).
8. Двухдиапазонный инфракрасный объектив (патент РФ № 2503047).
9. Широкоугольный светосильный объектив со сверхшироким рабочим спектральным диапазоном (патент РФ № 2369886).
10. Горелик Л. И., Полесский А. В., Семенченко Н. А. и др. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 2. С. 227.
11. Abedin M. Nurul, Bhat Ishwara, Gunapala Sarath D., et al. / Advanced Research Workshop — Future Trends in Microelectronics: Up the Nano Creek; 26—30 Jun. 2006.
12. Price J. P. G., Jones C. L., Hipwood L. G., et al. // Proc. SPIE. 2008. V. 6940. P. 69402S.
13. Tribolet P., Destefanis G., Ballet P., et al. // Proc. SPIE. 2008. V. 6940. P. 69402.

High-aperture dual-band infrared lens

*E. A. Bedareva^{1,2}, L. I. Gorelik¹, A. A. Kolesova^{1,2}, A. V. Polesskiy¹,
N. A. Semenchenko^{1,2}, A. I. Shketov¹*

¹Orion Research-and-Production Association
46/2 Entuziastov shosse, Moscow, 111123, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru; av22236@bk.ru

²Bauman Moscow State Technical University
5/1 2-nd Bauman str., Moscow, 105005, Russia

Received August 10, 2014

Results of development high aperture dual-band infrared lens based on four spherical components are given. The lens provides good image quality and high transmittance without AR

coatings of lens's components. Also are given the results of calculated researches on application of the lens with modern dual-band FPA based on the MCT and QWIP (SLS II type). The results showed that the lens can be used in dual band systems with a relative aperture 1:2.3, and in a single-band with a relative aperture of 1:1.7.

PACS: 42.30.Va

Keywords: high-aperture dual-band infrared lens, thermovision, MWIR/LWIR, dual-band, IR.

References

1. V. V. Tarasov and Yu. G. Yakushenkov, *Infrared Systems of Looking Type* (Logos, Moscow, 2004) [in Russian].
2. G. Destefanis, P. Ballet, J. Baylet, et al., Proc. SPIE **6206**, 62060B (2006).
3. D. F. King, W. A. Radford, E. A. Patten, et al., Proc. SPIE **6206**, 62060S (2006).
4. P. Tribolet, G. Destefanis, P. Ballet, et al., Proc. SPIE **6940-6942**, **6946-6952**, (2008).
5. S. D. Gunapala, S. V. Bandara, J. K. Liu, et al., IEEE Photonics Technology Letters **20**, 709.
6. RF Patent No. 2410733
7. RF Patent No. 2475787
8. RF Patent No. 2503047
9. RF Patent No. 2369886
10. L. I. Gorelik, A. V. Poleskii, N. A. Semenchenko, et al., Uspekhi Prikladnoi Fiziki **1**, 227 (2013).
11. M. Nurul Abedin, Ishwara Bhat, Sarath D. Gunapala, et al., in *Proc. Advanced Research Workshop - Future Trends in Microelectronics* (Up the Nano Creek; 26-30 Jun. 2006).
12. J. P. G. Price, C. L. Jones, L. G. Hipwood, et al., Proc. SPIE **6940**, 69402S (2008).
13. P. Tribolet, G. Destefanis, P. Ballet, et al., Proc. SPIE **6940**, 69402 (2008).