

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 535.31:681

МАЛОГАБАРИТНЫЕ СВЕТОСИЛЬНЫЕ ОБЪЕКТИВЫ ДЛЯ ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ

© 2009 г. Н. И. Потапова, канд. техн. наук; А. Д. Цветков, доктор техн. наук

Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем, г. Сосновый Бор, Ленинградская обл.

E-mail: contact@niiki.ru

Предложены конструкции малогабаритных компактных светосильных объективов с широким полем зрения для работы в средней области спектра от 4,0 до 4,5 мкм с матричными фотоприемниками.

Ключевые слова: матричное приёмное устройство, ИК диапазон, угловое поле зрения, светосила, аберрация.

Коды OCIS: 110.0110

Поступила в редакцию 05.05.2009

Успехи отечественной и зарубежной электронной промышленности в области создания высокоразрешающих матричных фотоприемных устройств (ФПУ), чувствительных в средней (3–5 мкм) области спектра, вызвали у разработчиков и изготовителей тепловизионных камер потребность в объективах, качество которых соответствовало бы качеству ФПУ в инфракрасной (ИК) области. Возникла необходимость в объективах с размером пятна рассеяния, соизмеримого с размером пиксела ФПУ (20–60 мкм). При этом такие объективы должны обладать минимально возможными габаритами при больших полях зрения и иметь высокую светосилу. Технология их изготовления должна удовлетворять требованиям, предъявляемым к технологиям создания современной элементной базы оптических приборов и устройств.

В настоящее время ИК объективы серийно выпускаются многими зарубежными фирмами, например *DIOP Inc.*, *RAYTHEON Co.*, *JANOS TECHNOLOGY Inc.* (США), *E.E.E.* (Великобритания), *FPS* (Канада), *Daiwon* и *Samyang* (Южная Корея) и др. Анализ имеющейся информации (рекламные проспекты, материалы конференций и статьи в научных журналах) показывает, что ИК объективы в России серийно не выпускаются. Объективы, выпускаемые за рубежом, ориентированы на “среднестатистический” приемник.

При этом наблюдается тенденция развития в сторону уменьшения их габаритов и увеличения светосилы.

Ужесточение требований к характеристикам объективов в сочетании с требованием к получению малогабаритных систем с большим полем зрения и высокой светосилой приводит к потребности поиска новых решений и подходов к композиции оптических схем ИК объективов.

Максимально возможное качество оптической системы можно получить лишь при использовании объектива, спроектированного под конкретный приемник. При этом необходимо учитывать все оптические элементы приемника (защитные и покровные стекла), положение и размеры его диафрагм (в случае приемников с охлаждаемыми диафрагмами). Спектральное пропускание интерференционных просветляющих покрытий линз должно быть согласовано со спектральной чувствительностью приемника.

В таблице приведены характеристики плоскостных ИК матриц фотоприемников для тепловизионных приборов [1–5].

Известно, что использование менисков в объективах, построенных по схеме симметричных систем [6], позволяет устранить ряд аберраций наклонных пучков, однако, при этом габариты объектива возрастают с увеличением поля зрения. Кроме того, для этого типа объективов

Основные параметры ИК матриц фотоприемников для тепловизионных приборов

Страна, фирма	Тип матрицы	Рабочая область спектра, мкм	Формат (число пикселей)	Размер пиксела, мкм	Размер матрицы по диагонали, мм	Рабочая температура, К
США, Hughes, SBRS	КРТ*	3–4,5	128×128	40×40	7,24	300
США, Hughes, SBRS	КРТ*	3–4,5	256×256	30×30	10,86	300
Германия, AEG Infrared-Module GmbH	PtSi	3–5	256×256	24×24	8,69	75
США, Hughes	PtSi	3–5	256×256	30×30	10,86	40
США, Boeing Comp.	PtSi	1–5	324×240	30×30	24,76	75
США, Boeing Comp.	PtSi	1–5	486×640	24×24	19,28	75
РФ, ЗАО “Матричные технологии”	PtSi	3–5	128×128 256×256 512×512	27×27 25×25 14×14	4,89 9,05 10,14	80
США, Cincinnati Electronics Corp.	InSb	3–5	256×256	30×30	10,86	77
США, SBRC	InSb	3–5	256×256	30×30	10,86	50
США, Hughes, SBRC	InSb	0,5–5,4	128×128	40×40	7,24	80
США, Hughes, SBRC	InSb	0,5–5,4	256×256	30×30	10,86	80
США, Hughes, SBRC	InSb	0,5–5,4	480×640	20×20	31,84	80
США, Hughes, SBRC	InSb	0,5–5,4	512×512	27×27	19,55	35
США, Hughes, SBRC	InSb	0,5–5,4	1024×1024	27×27	39,10	30–50
США, Hughes, SBRC	InSb	0,5–5,4	2048×2048	27×27	78,20	30–50
РФ, ГУП НПО “Орион”	InSb	3–5	128×128	50×50	9,05	80
РФ, ЦНИИ “Электрон”	PbSe	2–6	256×256	60×60	21,72	80

* КРТ – матрица, выполненная на основе соединения кадмий-ртуть-теллур.

характерна довольно малое относительное отверстие. Проведенный в диссертационной работе [5] анализ известных по патентам и публикациям в научных журналах конструкций объективов для тепловизионных приемников, показал, что существующие объективы для ИК диапазона в большинстве своем содержат менисковые линзы с толщинами, соизмеримыми с радиусами их кривизны, что значительно ухудшает весогабаритные характеристики объективов.

Для создания малогабаритных светосильных широкоугольных объективов для ИК диапазона можно воспользоваться возможностями менисковых линз и симметричных систем по коррекции аберраций наклонных пучков, а задачу компенсации сферической аберрации возложить на асферическую поверхность. При введении в оптическую систему асферической поверхности последняя может полностью устранить осевую сферическую аберрацию даже в случае особо светосильной системы. Кроме того, основную нагрузку по коррекции аберраций широких наклонных пучков в сагиттальной плоскости можно возложить на асферический полевой коррекционный элемент, при этом входной зрачок

разместить вблизи входной поверхности первой линзы; тогда количество компонентов объектива и его габариты могут быть уменьшены.

Для разработки объектива важной характеристикой матрицы фотоприемного устройства является размер ее диагонали и размер пиксела, определяющие требования к объективу. Авторы условно разделили существующие фотоприемники тепловизионных приборов на 3 группы: с малым размером диагонали матрицы (до 7,5 мм), со средним размером диагонали матрицы (до от 7 до 15 мм) и с большим размером диагонали (более 15 мм), и попытались для каждой группы разработать композиционную схему светосильного (с диафрагменным числом 0,8) малогабаритного объектива.

На рис. 1 приведена оптическая схема пятилинзового объектива из линз со сферическими поверхностями, работающего в диапазоне 3,5–4,5 мкм, для матричных приемников с диагональю до 7,5 мм. Штриховой линией обозначены защитное окно из германия толщиной 1,5 мм и окно матрицы из кремния толщиной 0,4 мм. Материалом для линз объектива служит кремний и германий. Объектив имеет угловое поле зрения

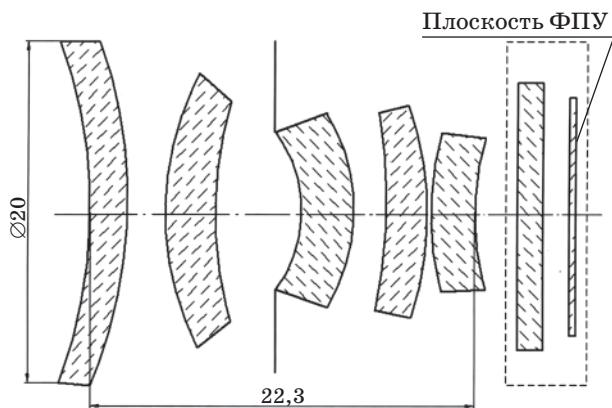


Рис. 1. Пятилинзовый объектив со сферическими поверхностями.

45°, он позволяет сфокусировать 85% падающей энергии в пятно диаметром 25–35 мкм. Первая линза является коррекционным элементом, она обладает малой светосилой. Длина объектива по оси около 22 мм, диаметр входной линзы около 20 мм. Диафрагменное число объектива равно 0,8. Поле зрения объектива можно увеличить за счет некоторого уменьшения его светосилы. При диафрагменном числе 1,2 (без изменения конструкции объектива) поле зрения объектива увеличивается до 60°, а пятно фокусировки уменьшается до 20 мкм. Дальнейшее увеличение поля зрения объектива с такой композицией элементов при сохранении светосилы приводит к значительному (практически вдвое при угле 60°) увеличению его габаритов. Поэтому для построения более широкоугольного объектива без ухудшения весогабаритных параметров необходим переход к другой схеме объектива.

На рис. 2 приведена оптическая схема разработанного авторами четырехлинзового объектива с двумя асферическими поверхностями, работающего в диапазоне длин волн 4,0–4,5 мкм, с угловым полем зрения 60°. Первая асферическая поверхность АП1 выполняет основную нагрузку по коррекции сферической аберрации, вторая асферическая поверхность АП2, удаленная от входного зрачка, выполняет роль полевого корректора. Входной зрачок расположен вблизи входной поверхности первой линзы.

Этот объектив имеет длину по оси около 20 мм, диаметр 16 мм, задний фокальный отрезок более 3 мм для размещения защитной пластины и окна фотоприемного устройства. Фокусное расстояние объектива около 8 мм при входном зрачке 10 мм. Объектив позволяет сфокусировать в пятне 10 мкм в центральной зоне 100% энергии, при углах $2\omega = 30\text{--}60^\circ$ в пятне 40 мкм – 86% энергии.

Варьируя параметры составляющих объектив линз, можно получить размер изображения $2Y'$ от 7,5 до 11 мм, т. е. этот объектив легко оптимизируется для работы с конкретными фотоприемными матрицами, имеющими размеры пиксела 20–50 мкм. Для линз объектива использованы германий, кремний, селенид цинка.

Для дальнейшего увеличения поля зрения необходимо введение еще одного линзового элемента со сферическими поверхностями, выполняющего роль полевого корректора.

На рис. 3 приведена оптическая схема разработанного авторами пятилинзового объектива с двумя асферическими поверхностями.

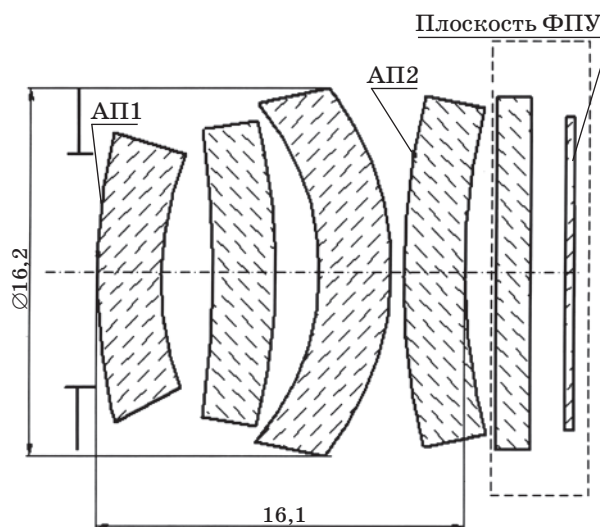


Рис. 2. Четырехлинзовый объектив с $2\omega = 60^\circ$ с двумя асферическими поверхностями.

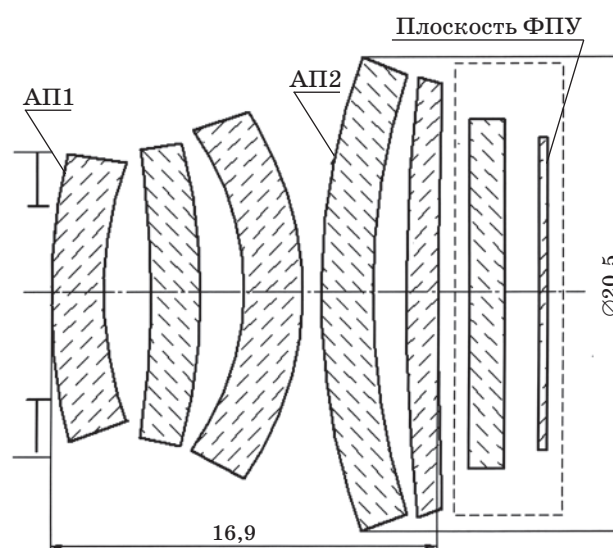


Рис. 3. Пятилинзовый объектив с $2\omega = 90^\circ$ с двумя асферическими поверхностями.

Этот объектив имеет длину менее 20 мм, диаметр около 21 мм, задний фокальный отрезок 3,3 мм, позволяющий разместить защитное окно из германия толщиной 1,5 мм, и окно матрицы из кремния толщиной 0,4 мм. Фокусное расстояние объектива 8,08 мм. Объектив позволяет сфокусировать в пятне 10 мкм в центральной зоне 100% энергии, около 30% энергии фокусируется в пятне 50 мкм для углов $2\omega = 45\text{--}76^\circ$ и 86% энергии фокусируется в пятне диаметром 40 мкм при угле 90° (на краю поля). Размер изображения $2Y'$ можно изменять от 12 до 15 мм, в некоторых пределах меняя параметры линз объектива и оптимизируя объектив без изменения конструкции.

Можно улучшить характеристики объектива, добавляя к исходной системе конфокально-апланатическую линзу $L6$ (рис. 4) из флюорита с малым показателем преломления 1,4. Устанавливая эту линзу впереди исходной системы, можно уменьшить отрицательный астигматизм [6]. У такой линзы передняя поверхность является конфокальной к изображению исходной системы, а вторая поверхность – апланатической по отношению к изображению, полученному после конфокальной поверхности. Здесь можно воспользоваться свойством конфокальной поверхности, разделяющей воздушную и оптическую среды, вносить положительный астигматизм. Апланатическая поверхность его не дает, поэтому линза в целом будет вносить в систему положительный астигматизм одновременно с исправлением кривизны поля, что позволяет исправлять отрицательный астигматизм ис-

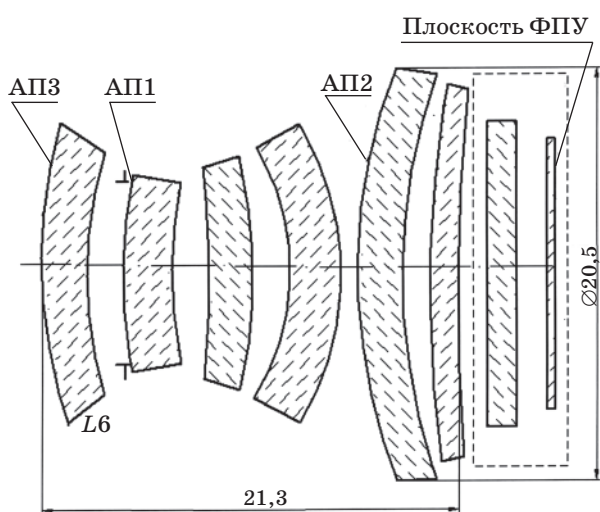


Рис. 4. Оптическая схема объектива с дополнительным полевым коррекционным мениском.

ходной системы. При этом, как конфокальная, так и апланатическая поверхности не обладают сферической aberrацией и комой, поэтому они не будут нарушать исправления этих aberrаций у исходной оптической системы.

Однако в случае широкоугольной светосильной оптической системы при использовании менисков с асферической поверхностью астигматизм для разных полевых углов в средней зоне поля – отрицательный, в краевой зоне – положительный. Поэтому добавление мениска с положительным астигматизмом приводит к незначительному улучшению aberrационных характеристик на полевых углах 2ω от 45° до 76° и существенному ухудшению фокусировки на углах $80\text{--}90^\circ$. Даже замена в апланатической линзе первой поверхности на асферическую (с сохранением апланатического приосевого радиуса, который определяется вторым коэффициентом асферической поверхности) не дает заметного эффекта.

Дальнейшее улучшение характеристик можно достичь добавлением в оптическую систему сильно прогнутых менисков, однако, это приводит к существенному увеличению габаритов объектива. Поэтому необходимо идти на компромисс, выбирая приемлемое качество объектива при минимальных его габаритах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ерофейчев В.Г. Инфракрасные фокальные матрицы // Оптический журнал. 1995. Т. 62. № 2. С. 12–20.
2. Агранов Г.А., Дахин А.М., Нестеров В.К., Новоселов С.К. Особенности получения и обработки ИК-изображений в матричных фотоприемниках с координатной адресацией на основе халькогенидов свинца // Оптический журнал. 1996. Т. 63. № 9. С. 53–57.
3. Певцев Е., Чернокнижин В. Матричные ИК-приемники для малогабаритных тепловизионных камер // Электронные компоненты. 2001. № 1. С. 32–36.
4. Ушакова М.Б. Тепловизоры на основе неохлаждаемых микроболометрических матриц: современное состояние зарубежного рынка и перспективы развития. М.: ОНТИ ГУП “НПО “Орион”, 2001. 27 с.
5. Чан Куок Туан. Разработка и исследование линзовых объективов для тепловизионных приборов // Автореферат канд. дис. СПб.: ИТМО, 2008. 22 с.
6. Русинов М.М. Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989. 372 с.