



Ахроматизированные объективы тепловизоров

И. П. Шишкин, А. П. Шкадаревич
НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО, Минск, Республика Беларусь

Дано описание конструкции ахроматизированных объективов, работающих в ИК-области спектра (8–12 мкм). При проектировании тепловизионных объективов необходимо учитывать тот факт, что размер пиксела современных микроболометров составляет 10–12 мкм, а плотность пикселей достигла формата 1280×1024. Эти параметры определяют более высокие требования, предъявляемые к качеству изображения, разрешающей способности и полю зрения разрабатываемого объектива. При этом объектив должен быть светосильным, термостабилизированным и иметь фокусировку. Рассмотрены объективы: 4-линзовый с фокусом 50 мм, 3-линзовый с фокусом 150 мм и 7-линзовый с переменным фокусом 30–150 мм.

Ключевые слова: ахроматизированный объектив, термостабилизация, фокусировка, зум

Статья получена: 22.05.2020
Принята к публикации: 16.06.2020

ВВЕДЕНИЕ

Перечень доступных оптических материалов, прозрачных в области спектра 8–12 мкм, весьма ограничен. Наиболее распространенный материал – германий. Он имеет высокий показатель преломления и низкую токсичность, что важно при производстве и эксплуатации объектива. Практически все оптические материалы, используемые в тепловизионных приборах, обладают сильной зависимостью показателя преломления от температуры. Поэтому при разработке объектива в его конструкции необходимо предусмотреть возможность термокомпенсации. Обычно для этой цели используют компенсацию в заднем отрезке объектива, перемещая объектив или микроболометри-

Achromatized Lenses of Thermal Imagers

I. P. Shishkin, A. P. Shkadarevich
RTC “LEMT” BelOMO, Minsk, Republic of Belarus

A description is given of the design of achromatized lenses operating in the infrared region of the spectrum (8–12 μm). When designing thermal imaging lenses, it is necessary to take into account the fact that the pixel size of modern microbolometers is 10–12 μm , and the pixel density has reached 1280 × 1024 format. These parameters determine higher requirements for image quality, resolution and field of view of the developed lens. In this case, the lens should be fast, thermally stabilized and have focus. The following lenses are considered: 4-lens with a focus of 50 mm, 3-lens with a focus of 150 mm and 7-lens with a variable focus of 30–150 mm.

Keywords: achromatized lens, thermal stabilization, focusing, zoom

Received: 22.05.2020

Accepted: 16.06.2020

INTRODUCTION

The list of available optical materials that are transparent in the spectral range of 8–12 μm is very limited. The most common material is germanium. It has a high refractive index and low toxicity, which is important in the manufacture and operation of the lens. Almost all optical materials used in thermal imaging devices have a strong temperature dependence of the refractive index. Therefore, when developing a lens, it is necessary to provide for the possibility of thermal compensation in its design. Usually for this purpose, compensation is used in the back focus of the lens, moving the lens or microbolometric matrix with temperature fluctuations, which greatly complicates the mechanics of the lens.

Most modern fixed-focus lenses for thermal imaging cameras consist of 3–4 single lenses. This is primarily due to the need to combine the maximum achievable aperture and budget cost. At the same time, with a limited choice of glass brands, it is impossible to significantly improve the image quality of the lens by increasing the number of lenses or the length of

ческую матрицу при колебаниях температуры, что значительно усложняет механику объектива.

Большинство современных объективов с фиксированным фокусом для тепловизоров состоит из 3-4 одиночных линз. Это связано прежде всего с необходимостью сочетания максимально достижимой светосилы и бюджетной стоимости. В то же время при ограниченном выборе марок стекол невозможно существенно улучшить качество изображения объектива, увеличивая количество линз или длину объектива. Поэтому многие разработчики [1, 2] активно используют в ИК-объективах асферические линзы или дифракционные элементы. При таком подходе можно сократить количество линз, но добиться качественного улучшения разрешающей способности объектива не удастся. К тому же изготовление асферических менисков большого диаметра для объективов с относительным отверстием 1:1 довольно трудоемкий процесс из-за высоких требований к качеству изготовления оптических поверхностей. Их создание часто обнажает нецелесообразность с точки зрения соблюдения баланса между качеством изображения и стоимостью объектива.

Альтернативным методом достижения теоретического предела разрешения в объективе может быть его ахроматизация [3]. Этот метод заключается в подборе комбинации стекол, имеющих различные коэффициенты дисперсии. Правильный выбор дает возможность компенсировать хромати-

the lens. Therefore, many developers [1, 2] actively use aspherical lenses or diffractive elements in IR lenses. With this approach, you can reduce the number of lenses, but to achieve a qualitative improvement in the resolution of the lens fails. In addition, the manufacture of large diameter aspherical menisci for lenses with a 1:1 relative aperture is a rather laborious process due to the high demands on the quality of manufacture of optical surfaces. Their creation often reveals the inappropriateness, in terms of maintaining a balance between image quality and the cost of the lens.

An alternative method to achieve the theoretical limit of resolution in the lens can be its achromatization [3]. This method consists in selecting a combination of glasses having different dispersion coefficients. The right choice makes it possible to compensate for chromatic aberration and thereby significantly improve the image quality of the lens.

FOCAL DISTANCE AND RELATIVE HOLE

It is known that the detection range of an object depends on the focal length of the lens and its aperture. The market offers a wide selection of thermal imaging lenses in the range of focal lengths of 30 ~ 300 mm and relative apertures $F/1 \sim F/1.5$. But most of them are designed for 640×480 format with a pixel size of 17-25 microns. On the other hand, an increase in the focal length of a fast lens leads to a significant increase in its size and weight. Table 1 shows the dependence of the weight of the lens on the focal length, aperture,

Таблица 1. Зависимость веса объектива от рабочих параметров

Table 1. Lens weight dependence of the operating parameters

Рабочие параметры Operating parameters				Вес, кг Weight, kg
Фокусное расстояние, мм Focal length, mm	Относительное отверстие Relative aperture	Линзы, шт. Elements, it.	Длина, мм Length, mm	
50	F/1,0	3	65	0,06
50	F/1,15	4	66	0,09
100	F/1,15	3	130	0,3
100	F/1,15	4	126	0,67
150	F/1,15	3	205	0,89
150	F/1,15	4	203	1,9

ческие aberrации и тем самым значительно повысить качество изображения объектива.

ФОКУСНОЕ РАССТОЯНИЕ И ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ОТВЕРСТИЕ

Известно, что дальность обнаружения объекта зависит от фокусного расстояния объектива и его светосилы. На рынке представлен широкий выбор тепловизионных объективов в диапазоне фокусных расстояний 30-300 мм и относительных отверстий F/1-F/1,5. Но большинство из них предназначены для формата 640×480 с размером пиксела

number of lenses and length. But it must be borne in mind that it is the technological capabilities of manufacturing lenses of maximum diameter with the required accuracy that determine the image quality of the created lenses.

LENS DESIGN

Figure 1 shows the type and characteristics of the lenses. On the left is a 4-lens lens with a focal length of 50 mm and a field of view of 22°, on the right is a 3-lens lens with a focal length of 150 mm and a field of view of 7.5°. Both lenses are designed for 1280x1024 format

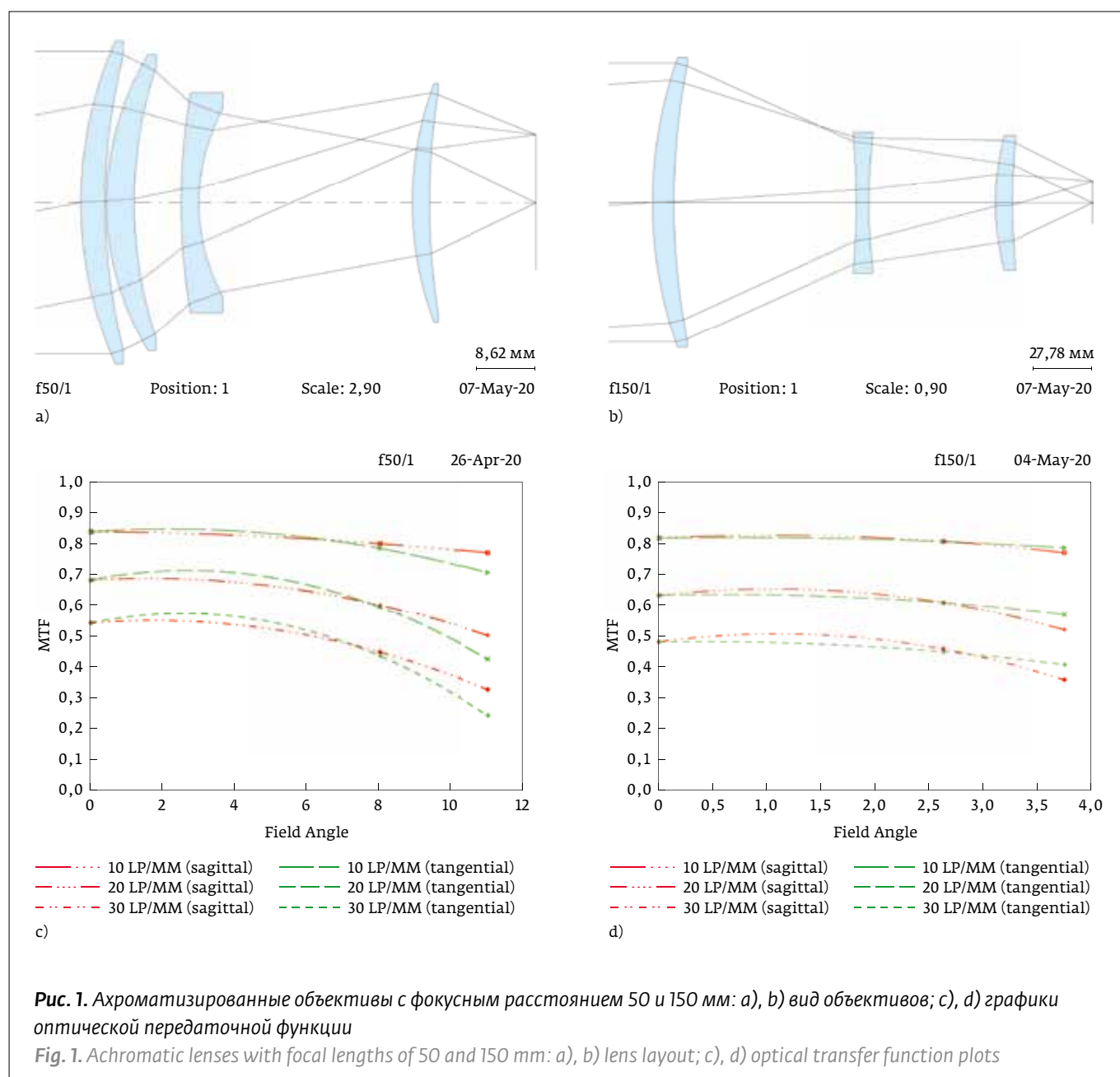


Рис. 1. Ахроматизированные объективы с фокусным расстоянием 50 и 150 мм: а), б) вид объективов; в), г) графики оптической передаточной функции

Fig. 1. Achromatic lenses with focal lengths of 50 and 150 mm: a), b) lens layout; c), d) optical transfer function plots

17–25 мкм. С другой стороны, увеличение фокусного расстояния светосильного объектива приводит к значительному росту его габаритов и веса. В табл. 1 показана зависимость веса объектива от фокусного расстояния, светосилы, количества линз и длины. Но надо учитывать, что именно технологические возможности изготовления линз максимального диаметра с требуемой точностью определяют качество изображения создаваемых объективов.

КОНСТРУКЦИЯ ОБЪЕКТИВОВ

На рис. 1 показан вид и характеристики объективов. Слева представлен 4-линзовый объектив с фокусным расстоянием 50 мм и полем зрения 22° , справа – 3-линзовый объектив с фокусным расстоянием 150 мм и полем зрения $7,5^\circ$. Оба объектива рассчитаны для формата 1280×1024 с диагональю 20 мм. Объективы термостабилизированы и имеют функцию фокусировки на ближнюю дистанцию.

В 4-линзовом объективе – термостабилизация пассивная. Ее обеспечивает специальная комбинация стекол: наружные линзы выполнены из германия, а внутренние – из материала с низким показателем преломления. Все линзы объектива сферические. Результат пассивной стабилизации иллюстрируют графики оптической передаточной функции. Определенная комбинация линз обеспечивает постоянство положения плоскости изображения при изменении рабочих температур от -50°C до 50°C . Подвижка последней линзы позволяет выполнить внутреннюю фокусировку на ближнюю дистанцию.

В 3-линзовом объективе функция термостабилизации совмещена с функцией внутренней фокусировки. В зависимости от выбранного конструктивного решения эти функции выполняют подвижки

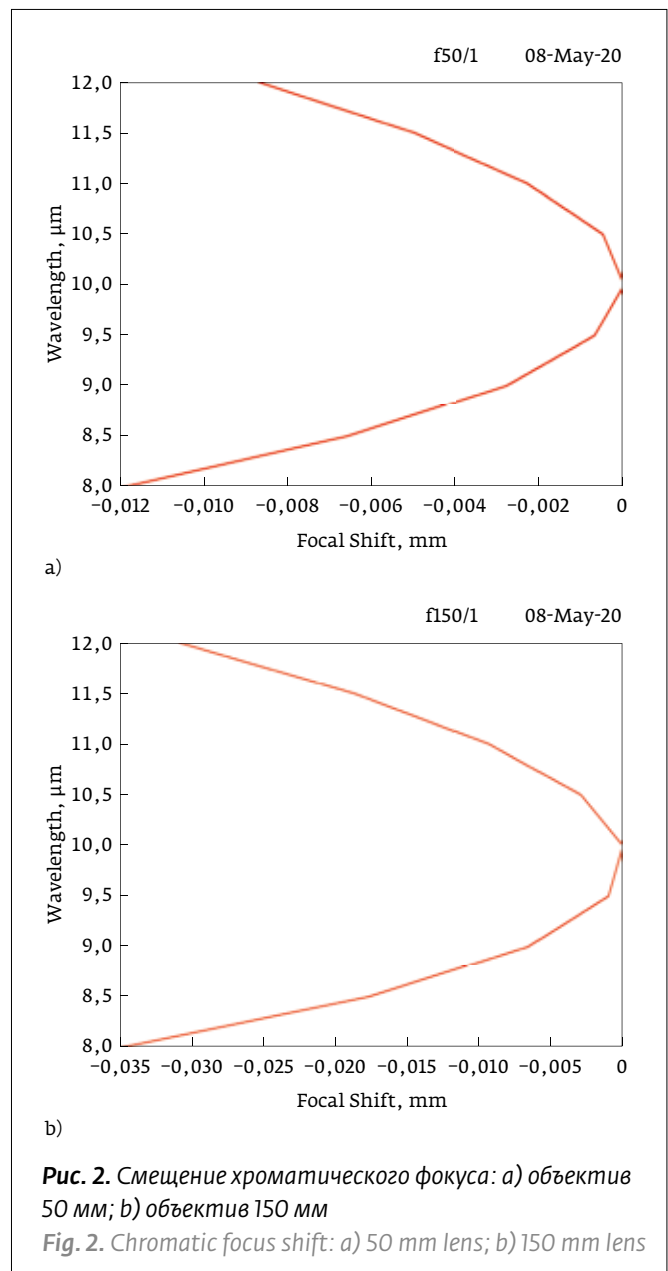


Рис. 2. Смещение хроматического фокуса: а) объектив 50 мм; б) объектив 150 мм

Fig. 2. Chromatic focus shift: a) 50 mm lens; b) 150 mm lens

Таблица 2. Влияние допусков на контраст изображения объективов

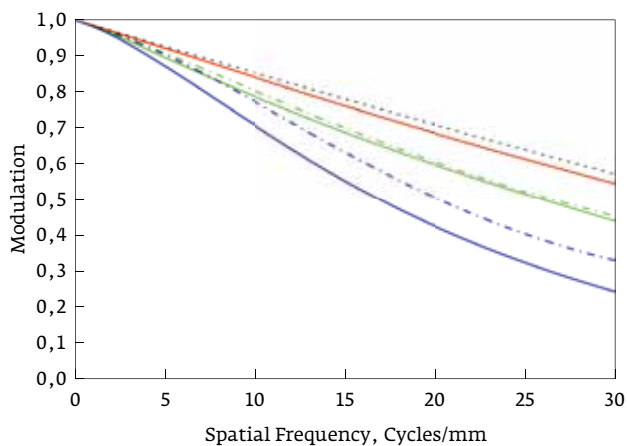
Table 2. Tolerance effect on the lens image contrast

4-линзовый объектив 4-element lens			
Field Point	Relative Field	MTF Design	Design+ Tolerance
1	0	0,55	0,47
2	0,5	0,44	0,35
3	0,7	0,42	0,35
4	0,85	0,42	0,35
5	1,0	0,24	0,13

3-линзовый объектив 3-element lens			
Field Point	Relative Field	MTF Design	Design+ Tolerance
1	0	0,47	0,43
2	0,5	0,47	0,43
3	0,7	0,45	0,42
4	0,85	0,43	0,40
5	1,0	0,40	0,36

f50/1		Wavelength	Weight
Diffraction MTF		12 000 nm	1
Position 1	Defocusing	10 000 nm	1
06-May-20	-0,00000	8 000 nm	1

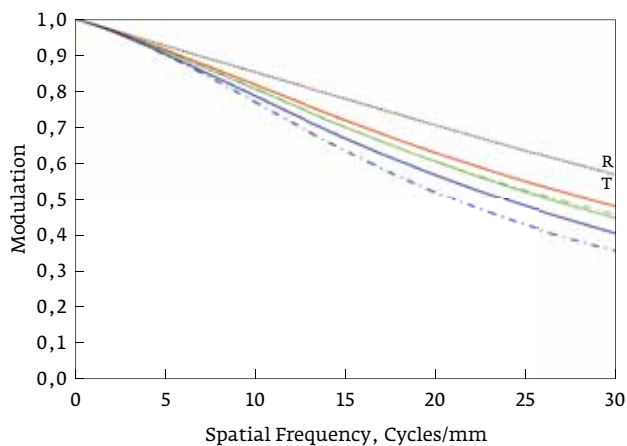
..... Diffraction Limit — T 0,7 Field (8,00°)
 — Axis - - - R
 — T 1,0 Field (11,00°)
 - - - R



a)

f150/1		Wavelength	Weight
Diffraction MTF		12 000 nm	1
Position 1	Defocusing	10 000 nm	1
06-May-20	-0,00000	8 000 nm	1

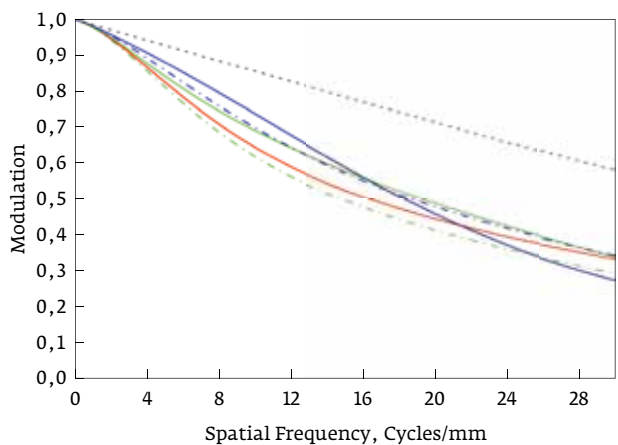
..... Diffraction Limit — T 0,7 Field (2,63°)
 — Axis - - - R
 — T 0,0 Field (0,00°)
 - - - R — T 1,0 Field (3,75°)
 - - - R



b)

2,5 m		Wavelength	Weight
Diffraction MTF		12 000 nm	1
Position 2	Defocusing	10 000 nm	1
07-May-20	-0,00000	8 000 nm	1

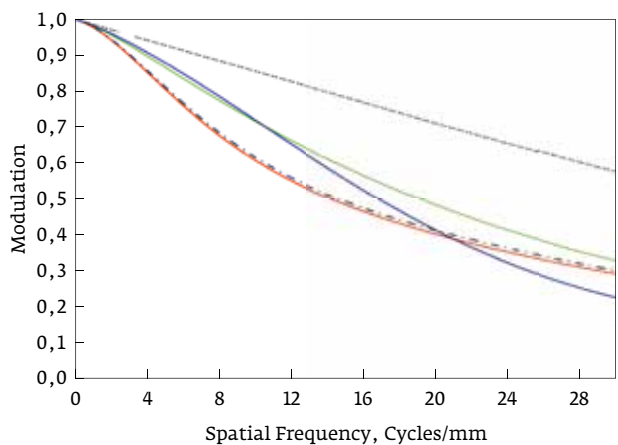
..... Diffraction Limit — T 0,7 Field (8,00°)
 — Axis - - - R
 — T 1,0 Field (11,00°)
 - - - R



c)

15 m		Wavelength	Weight
Diffraction MTF		12 000 nm	1
Position 3	Defocusing	10 000 nm	1
06-May-20	-0,00000	8 000 nm	1

..... Diffraction Limit — T 0,7 Field (2,63°)
 — Axis - - - R
 — T 0,0 Field (0,00°)
 - - - R — T 1,0 Field (3,75°)
 - - - R



d)

Рис. 3. Графики оптической передаточной функции: а), б) на бесконечности; с), д) ближняя дистанция
 Fig. 3. Graphs of the optical transfer function: a), b) at infinity; c), d) close distance

Таблица 3. Допуски на децентрировку и наклон
Table 3. Decentration and Tilt Tolerances

4-линзовый объектив 4-element lens		
Element	Tilt Arc Min	Dec/Roll
1-2	1,0	0,02
3-4	1,0	0,02
5-6	1,0	0,02
7-8	1,0	0,02

3-линзовый объектив 3-element lens		
Element	Tilt Arc Min	Dec/Roll
1-2	1,0	0,04
3-4	1,0	0,04
5-6	1,0	0,04

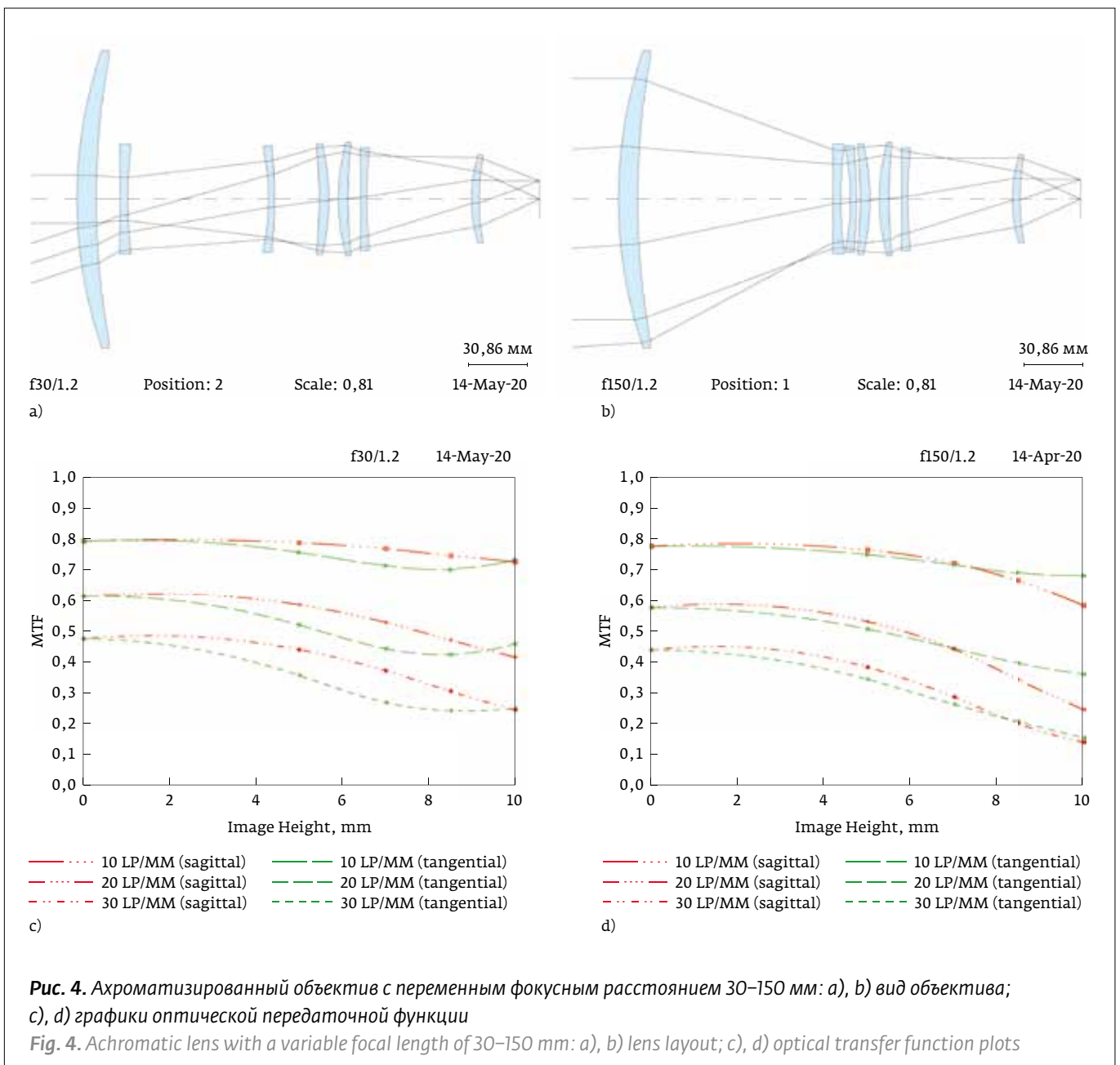


Таблица 4. Допуски на форму и толщину линз, воздушные промежутки и стекло
Table 4. Tolerances for the lens elements thickness and shape and for other parameters

4-линзовый объектив 4-element lens			
Surface	Fringes Pow/IRR	Thick Δd	Glass $\Delta n / \Delta v$
1	4/1	0,03	0,0005/0,5
2	4/1	0,03	–
3	8/2	0,03	0,0005/0,5
4	8/2	0,03	–
5	8/2	0,03	0,0005/0,5
6	8/2	0,03	–
7	8/2	0,1	0,0005/0,5
8	8/2	$\pm 0,23$	–

3-линзовый объектив 3-element lens			
Surface	Fringes Pow/IRR	Thick Δd	Glass $\Delta n / \Delta v$
1	4/1	0,1	0,0005/0,5
2	4/1	0,2	–
3	8/2	0,3	0,0005/0,5
4	8/2	0,2	–
5	8/2	0,5	0,0005/0,5
6	8/2	$\pm 0,57$	–

2-й или 3-й линзы. В объективе наружные линзы созданы из германия, а средняя линза – из материала с низким показателем преломления.

АХРОМАТИЗАЦИЯ

На рис. 2 представлены графики, которые иллюстрируют уровень ахроматизации объективов. Смещение фокуса в пределах рабочего спектра (8–12 мкм) в объективе с фокусным расстоянием 50 мм составляет 12 мкм, а в объективе с фокусным расстоянием 150 мм достигает приблизительно 35 мкм.

ФОКУСИРОВКА

На рис. 3 показаны характеристики объективов при фокусировке на бесконечность и на ближнюю дистанцию: 2,5 м и 15 м соответственно.

АНАЛИЗ ДОПУСКОВ

В табл. 2 представлен результат влияния допусков на контраст изображения 4-линзового (слева) и 3-линзового (справа) объективов. Изменение контраста показано для пяти точек углового поля на пространственной частоте 30 лин/мм.

В табл. 3 приведены допуски на децентрировку и наклон. Табл. 4 содержит значения допусков на форму и толщину линз, воздушных промежутков и стекол.

with a diagonal of 20 mm. The lenses are thermally stabilized and have the function of focusing at close range.

In a 4-lens lens, thermal stabilization is passive. It is provided by a special combination of glasses: the outer lenses are made of germanium, and the inner ones are made of a material with a low refractive index. All lenses are spherical. The result of passive stabilization is illustrated by graphs of the optical transfer function. A certain combination of lenses ensures a constant position of the image plane when the operating temperature changes from $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Moving the last lens allows for internal focusing at close range.

In the 3-lens lens, the thermal stabilization function is combined with the internal focusing function and performed. Depending on the chosen constructive solution, these functions are performed by the movements of the 2nd or 3rd lens. In the lens, the outer lenses are made of Germany, and the middle lens is made of a material with a low refractive index.

ACHROMATIZATION

Fig. 2 presents graphs that illustrate the level of achromatization of lenses. The focus shift within the working spectrum (8–12 μm) in a lens with a focal length of 50 mm is 12 μm , and in a lens with a focal length of 150 mm it reaches approximately 35 μm .



Расчет показывает, что допуски на линзы 4-линзового объектива более строгие. Это значит, что конструкция 3-линзового объектива обладает меньшей чувствительностью к допускам.

ОБЪЕКТИВ С ПЕРЕМЕННЫМ ФОКУСНЫМ РАССТОЯНИЕМ

Ахроматизированный 7-линзовый объектив с переменным фокусным расстоянием 30–150 мм, относительным отверстием 1:1,2 и полем зрения 33,7–7,6° показан на рис. 4. Все линзы объектива сферические, три линзы выполнены из материала с более низким, чем у германия, показателем преломления. Смещение фокуса в пределах рабочего спектра (8–12 мкм) в положении фокуса 30 мм составляет приблизительно 20 мкм, а в положении фокуса 150 мм достигает около 30 мкм. Температурная стабилизация выполняется при помощи функции зум. Длина объектива составляет 240 мм, задний отрезок 32 мм, вес линз 1 кг. Дисторсия при фокусном расстоянии 30 мм не превышает 5%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ахроматизация позволяет повысить качество изображения объектива, обеспечить термостабилизацию, фокусировку и зум без выполнения технологически сложных асферических поверхностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. US7835071. Far-infrared camera lens, lens unit and imaging apparatus / Tatsuya Izumi. – Pub. Date: Nov. 16, 2010.
2. US8279520. Wide field of view LWIR high speed imager / Lacy G. Cook, Eric M. Moskun – Pub. Date: Oct. 2, 2012.
3. **Шишкин И. П., Шкадаревич А. П.** Ахроматизированные ИК-объективы. Приборостроение-2019: материалы 12-й Международной научно-технической конференции, 13–15 ноября 2019 года, Минск, Республика Беларусь / редкол.: О. К. Гусев. – Минск: БНТУ, 2019; 5–6.
SHishkin I. P., SHkadarevich A. P. Ahromatizirovannyye IK-ob'ektivy. Priborostroenie-2019: materialy 12-j Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, 13–15 noyabrya 2019 goda, Minsk, Respublika Belarus' / redkol.: O. K. Gusev. – Minsk: BNTU, 2019; 5–6.

ОБ АВТОРАХ

Шишкин Игорь Петрович, к. т. н, shipoflens@mail.ru, НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО, Минск, Республика Беларусь.
ORCID ID: 0000-0002-4592-1060
Шкадаревич Алексей Петрович, НТЦ «ЛЭМТ», БелОМО, Минск, Республика Беларусь.

ВКЛАД ЧЛЕНОВ АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА

Статья подготовлена на основе работы всех членов авторского коллектива. Разработка и исследования выполнены за счет собственных средств НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

FOCUSING

Fig. 3 shows the characteristics of the lenses when focusing on infinity and at close range: 2.5 m and 15 m, respectively.

TOLERANCE ANALYSIS

In the table. Figure 2 shows the result of the influence of tolerances on the contrast of the image of a 4-lens (left) and a 3-lens (right) lens. A change in contrast is shown for five points of the angular field at a spatial frequency of 30 lines/mm.

Table 3 shows the tolerances for decentration and inclination. Table 4 contains the tolerance values for the shape and thickness of the lenses, air gaps and glasses.

The calculation shows that the tolerances on the lenses of the 4-lens are stricter. This means that the design of the 3-lens lens is less sensitive to tolerances.

VARIABLE FOCUS DISTANCE LENS

An achromatized 7-lens lens with a variable focal length of 30–150 mm, a relative aperture of 1:1.2, and a field of view of 33.7–7.6° is shown in Fig. 4. All lenses are spherical, three lenses are made of a material with a lower refractive index than germanium. The focus shift within the working spectrum (8–12 μm) in the focal position of 30 mm is approximately 20 μm, and in the focal position of 150 mm it reaches about 30 μm. Temperature stabilization is performed using the zoom function. The lens length is 240 mm, the back focus is 32 mm, the weight of the lenses is 1 kg. Distortion at a focal length of 30 mm does not exceed 5%.

CONCLUSION

Achromatization can improve the quality of the image of the lens, provide thermal stabilization, focusing and zoom without performing technologically complex aspherical surfaces.

ABOUT AUTHORS

Shishkin Igor Petrovich, Candidate of Technical Sciences, shipoflens@mail.ru, RTC "LEMT" BelOMO, Minsk, Republic of Belarus.
ORCID ID: 0000-0002-4592-1060
Shkadarevich Alexey Petrovich, Doctor of Technical Sciences, RTC "LEMT" BelOMO, Minsk, Republic of Belarus.

CONTRIBUTION BY THE MEMBERS OF THE TEAM OF AUTHORS

The article was prepared on the basis of many years of work by all members of the team of authors. Development and research are carried out at the expense of RTC "LEMT" BELOMO.

CONFLICT OF INTEREST

The authors claim that they have no conflict of interest.