

Е. В. Шмелев^{1,2}, Т. Н. Хацевич^{1,2}*

Разработка двухдиапазонных инфракрасных объективов

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

² ООО «Оптическое Расчетное Бюро», г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: shmelejev@luggar.biz

Аннотация. Эффективное использование в оптико-электронных приборах двухдиапазонных приемников излучений, имеющих перестраиваемые рабочие спектральные диапазоны 3–5 и 8–12 мкм, предполагает сопряжение их с объективами, обеспечивающими качественное изображение пространства предметов в каждом из указанных диапазонов при фиксированном положении плоскости изображений. Проблема заключается в необходимости устранения хроматических aberrаций в расширенном спектральном диапазоне, превышающем каждый из рабочих диапазонов. Цель статьи – обосновать схемное решение, позволяющее эффективно корректировать хроматические aberrации в широком спектральном диапазоне. Методы исследования – теория хроматизма в параксиальной области и компьютерные методы дизайна оптических систем. Показано, что найденные стартовые системы позволяют при переходе к конечным апертурам и толщинам обеспечить суперапохроматический характер коррекции хроматизма при дифракционном качестве изображения.

Ключевые слова: инфракрасный, двухдиапазонный, хроматизм положения, апохромат

E. V. Shmelev^{1,2}, T. N. Khatsevich^{1,2}*

Development of Dual-Band Infrared Lenses

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

² Optical Settlement Bureau LLC, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: shmelejev@luggar.biz

Abstract. An effective use of dual-band radiation receivers with tunable operating spectral ranges 3–5 and 8–12 μm in optoelectronic devices involves pairing them with lenses that provide a high-quality image of the space of objects in each of the indicated ranges at a fixed position of an image plane. The problem is the need to eliminate chromatic aberrations in extended spectral range that exceeds each of the operating ranges. The aim of the article is to suggest a schematic design that allows an effective correction of chromatic aberrations in a wide spectral range. The methods of study include a theory of chromatism in the paraxial region and computer methods of optical systems design. It is shown that proposed initial systems make it possible to provide a superapochromatic character of chromatism correction with diffractive image quality with transition to finite apertures and thicknesses.

Keywords: infrared, dual-band, position chromatism, apochromatic

Введение

Увеличение спектрального диапазона при использовании оптико-электронных приборов и комплексов, позволяющих формировать изображения объектов, находящихся на различном расстоянии от наблюдателя в атмосфере, значи-

тельно увеличивает информационную емкость изображений. В приборном аспекте наиболее освоенными являются MWIR и LWIR окна прозрачности, свободные от поглощения водяными парами, углекислым газом и прочими химическими компонентами атмосферы.

До относительно недавнего времени для мультиспектральных тепловизионных приборов было характерно использование нескольких приемников излучения, работающих в разных спектральных диапазонах [1, 2]. Изображения наблюдались как по отдельности, давая возможность использовать преимущества конкретного спектрального диапазона, так и вместе, с последующей программной обработкой получаемых изображений для создания мультиспектрального изображения. При таком схемном решении расчет оптической системы каждого из каналов может осуществляться независимо друг от друга и принципиально не требует равенства длин вдоль оптической оси в каждом из каналов.

Наравне с развитием мультиспектральных оптических систем, важной тенденцией является уменьшение габаритных размеров и веса. Уже существуют охлаждаемые мультиспектральные приемники излучения, а в соответствии с аналитическим обзором [3, 4], в ближайшем будущем ожидается решение технологических проблем производства неохлаждаемых приемников излучения. В связи с этим авторами статьи предлагается решение для определения таких параметров стартовой системы, как фокусные расстояния компонентов на основе заранее заданного дизайна и перебора всех возможных комбинаций материалов. Для построения светосильного объектива с фиксированным фокусным расстоянием предлагается использовать двухкомпонентную оптическую систему с двумя линзами в каждом компоненте. Гипотеза заключается в том, что такое схемное решение позволит эффективно скорректировать хроматические aberrации в широком спектральном диапазоне, а количество свободных параметров у линз и возможность использования асферических поверхностей позволят скорректировать монохроматические aberrации до достижения дифракционно ограниченного качества по одному из интегральных критериев.

Теоретическая часть

Анализируя известные схемные решения для объективов с фиксированным фокусным расстоянием в LWIR или MWIR диапазоне [5–7], можно прийти к выводу, что четырех линз в стартовой системе будет достаточно для успешной коррекции монохроматических aberrаций, при выборе материалов из условия коррекции хроматических aberrаций. Для дальнейших рассуждений используется схемное решение, представленное на рис. 1.

Схемное решение, представленное на рис. 1, имеет два компонента, разделенных воздушным промежутком d и имеющих по две линзы в каждом.

Известны различные методики для коррекции хроматических aberrаций. Некоторые из известных методик, представленных в обзоре [8], позволяют скорректировать хроматизм в системах со множеством линз, однако все методики не предполагают разнесение их в пространстве на этапе моделирования, тем самым позволяя рассчитывать лишь условно простые объективы, пусть и имеющие скорректированный хроматизм на вплоть до 5 длинах волн.

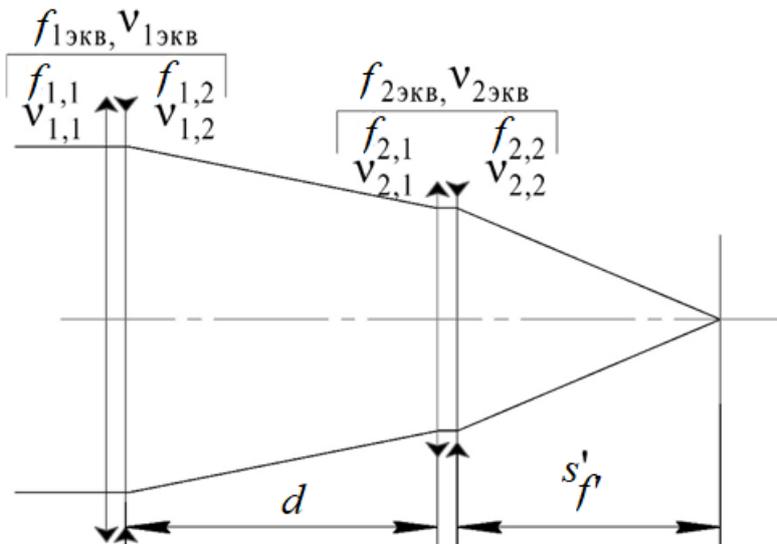


Рис. 1. Схемное решение, взятое за основу

В основе расчета лежат выражения хроматизма компонента для бесконечно удаленного предмета и предмета, располагающегося на конечном расстоянии. Известно, что в общем виде, хроматизм компонента пропорционален квадрату расстояния до изображения, формируемого компонентом, и обратно пропорционален фокусному расстоянию и относительной средней дисперсии. При этом, когда речь заходит о компоненте, состоящем из k линз, целесообразно оперировать определением эквивалентной относительной средней дисперсии $v_{\text{экв}}$, определяемой выражением:

$$v_{i \text{ экв}} = \frac{\sum_{j=1}^k \varphi_{i,j}}{\sum_{j=1}^k \frac{\varphi_{i,j}}{v_{i,j}}}, \quad (1)$$

где $\varphi_{i,j}$ – оптическая сила j линзы i компонента.

Для коррекции хроматических aberrаций в широком диапазоне длин волн в текущей методике следует определить эквивалентные относительные средние дисперсии для нескольких спектральных диапазонов. Так, например, для достижения апохроматической коррекции в диапазоне волн 3–12 мкм необходимо использовать дисперсии $v_{i \text{ экв}}$ в диапазонах 3–7,5 и 7,5–12 мкм. Эти значения отличаются от окон прозрачности атмосферы, но позволяют разделить широкий спектральный диапазон пополам. Значения используемых коэффициентов для основных оптических материалов приведены в табл. 1.

Оптические параметры наиболее распространенных материалов

Название	$\nu_{3-7,5}$	$\nu_{7,5-12}$	ν_{3-12}
Germanium	107,294	783,207	72,360
ZnSe	177,995	57,470	31,710
KRS5	232,239	165,004	70,451
ZnS	109,636	22,756	13,941
GaAs	146,327	106,181	45,286
IRG201	113,021	109,248	43,685
IRG202	200,621	121,413	55,526
IRG203	172,946	49,230	31,456
IRG204	170,315	171,147	63,358
IRG205	167,250	109,297	49,003
IRG206	163,031	160,153	60,319
IRG207	203,873	168,497	67,785

Второй компонент системы переносит продольные хроматические aberrации первого компонента системы в пространство изображений с квадратом собственного линейного увеличения. Для успешной коррекции необходимо, чтобы перенесенные aberrации первого компонента компенсировались хроматической aberrацией второго компонента. Выражение, определяющее хроматизм положения системы из двух разнесенных в пространстве компонентов по две линзы в каждом, имеет вид:

$$\Delta S_{\text{xp}} = - \frac{f_{2\text{экв}} \left(\nu_{1\text{экв}} d^2 - 2\nu_{1\text{экв}} df_{1\text{экв}} + \nu_{1\text{экв}} f_{1\text{экв}}^2 + f_{2\text{экв}} \nu_{2\text{экв}} f_{1\text{экв}} \right)}{\nu_{1\text{экв}} \nu_{2\text{экв}} (f_{1\text{экв}} - d + f_{2\text{экв}})^2}, \quad (2)$$

где $f_{i\text{экв}} = \frac{f_{i,1} \cdot f_{i,2}}{f_{i,1} + f_{i,2}}$.

Эквивалентные коэффициенты дисперсии в выражении (2) определяются для спектрального диапазона, в котором необходимо скорректировать хроматизм положения.

Практическая часть

Система уравнений, полученная на основе выражения (2), достаточная для определения фокусных расстояний всех линз на основе параметров материалов из табл. 1, решение которой обеспечит апохроматическую коррекцию в расширенном спектральном диапазоне 3–12 мкм, имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{f_{2\text{ЭКВ}} \left(v_{1\text{ЭКВ}} \Delta\lambda_a d^2 - 2v_{1\text{ЭКВ}} \Delta\lambda_a df_{1\text{ЭКВ}} + v_{1\text{ЭКВ}} \Delta\lambda_a f_{1\text{ЭКВ}}^2 + f_{2\text{ЭКВ}} v_{2\text{ЭКВ}} \Delta\lambda_a f_{1\text{ЭКВ}} \right)}{v_{1\text{ЭКВ}} \Delta\lambda_a v_{2\text{ЭКВ}} \Delta\lambda_a (f_{1\text{ЭКВ}} - d + f_{2\text{ЭКВ}})^2} = 0, \\
\frac{f_{2\text{ЭКВ}} \left(v_{1\text{ЭКВ}} \Delta\lambda_b d^2 - 2v_{1\text{ЭКВ}} \Delta\lambda_b df_{1\text{ЭКВ}} + v_{1\text{ЭКВ}} \Delta\lambda_b f_{1\text{ЭКВ}}^2 + f_{2\text{ЭКВ}} v_{2\text{ЭКВ}} \Delta\lambda_b f_{1\text{ЭКВ}} \right)}{v_{1\text{ЭКВ}} \Delta\lambda_b v_{2\text{ЭКВ}} \Delta\lambda_b (f_{1\text{ЭКВ}} - d + f_{2\text{ЭКВ}})^2} = 0, \\
\frac{f_{2\text{ЭКВ}} \left(v_{1\text{ЭКВ}} \Delta\lambda_c d^2 - 2v_{1\text{ЭКВ}} \Delta\lambda_c df_{1\text{ЭКВ}} + v_{1\text{ЭКВ}} \Delta\lambda_c f_{1\text{ЭКВ}}^2 + f_{2\text{ЭКВ}} v_{2\text{ЭКВ}} \Delta\lambda_c f_{1\text{ЭКВ}} \right)}{v_{1\text{ЭКВ}} \Delta\lambda_c v_{2\text{ЭКВ}} \Delta\lambda_c (f_{1\text{ЭКВ}} - d + f_{2\text{ЭКВ}})^2} = 0, \\
\frac{f_{1,2} \cdot f_{2,1} - d \cdot f_{2,1} + f_{2,2} (f_{1,2} + f_{2,1} - d)}{f_{1,2} f_{2,1} f_{2,2}} - \frac{d \cdot f_{2,1} + d \cdot f_{2,2} - f_{2,1} f_{2,2}}{f_{1,1} f_{2,1} f_{2,2}} - 1 = 0.
\end{array} \right. \quad (3)$$

Обозначение $\Delta\lambda_a$, $\Delta\lambda_b$, $\Delta\lambda_c$ в индексе переменных соответствует обозначению используемого спектрального диапазона, где a соответствует диапазону от 3 до 7,5 мкм, b соответствует диапазону от 7,5 до 12 мкм, и c соответствует диапазону от 3 до 12 мкм. В системе (3) для уравнения MWIR диапазона целесообразно несколько расширить область ахроматизации, поделив расширенный спектральный диапазон на два с одной общей границей, а именно от 3 до 7,5 мкм и от 7,5 до 12 мкм.

Поскольку значения коэффициентов дисперсий являются фиксированными для используемых стекол, количество численно решаемых систем уравнений зависит от дискретности приведенной толщины d между компонентами. В данном исследовании используются значения толщины d от 0,1 до 1 с шагом 0,025, что приводит к 767 232 моделируемым системам. Количество систем, подлежащих анализу, в четыре раза меньше количества систем, которое возможно получить при данной дискретности d ввиду того, что исключаются варианты, где тонкие линзы в компонентах меняются местами.

Поскольку для решения системы (3) не использовались дополнительные ограничения, смоделированные системы дополнительно сортировались по критерию положительного заднего фокального отрезка. Сумма абсолютных оптических сил должна быть минимальна для минимизации аберраций, вносимых компонентами. Функции в системе (3) при проверке полученных численных решений должны стремиться к нулю. Совокупность этих критериев сортировки позволило выделить 74 системы, которые можно использовать для дальнейшего перехода к конечным апертурам и толщинам. В табл. 2 приведены параметры шести из выбранных систем.

Из табл. 2 видно, что для некоторых систем эквивалентное значение средней дисперсии принимает отрицательное значение. Данный эффект компонента с отрицательной эквивалентной относительной дисперсией подобен работе некоторых материалов с градиентным распределением показателя преломления, например, комбинации из ZnS/ZnSe, исследованной в работе [9]. Такой компонент,

имея положительную оптическую силу, будет вносить положительный хроматизм и, соответственно, имея отрицательную оптическую силу, будет вносить отрицательный хроматизм. На рис. 2 приводится график хроматизма положения для систем, приведенных в табл. 2.

Таблица 2

Выборка из шести вариантов стартовых систем

Материалы линз				$\nu_{1_{экв}}$	$\nu_{2_{экв}}$	$f_{1,1}$	$f_{1,2}$	$f_{2,1}$	$f_{2,2}$	d
1	2	3	4							
IRG207	Germanium	ZnS	IRG203	64,79	8,78	0,483	-1,144	3,929	-2,017	0,15
IRG203	ZnS	KRS5	IRG201	-24,33	196,97	3,378	-5,229	0,517	-1,010	0,50
KRS5	Germanium	ZnS	IRG203	69,46	6,45	0,570	-1,620	2,712	-1,833	0,20
KRS5	ZnS	IRG203	Germanium	933,69	259,56	1,823	-0,339	0,316	-0,885	0,10
IRG202	Germanium	IRG203	ZnS	48,78	7,94	0,511	-1,370	2,835	-1,633	0,10
KRS5	IRG201	ZnS	IRG203	196,97	-24,33	0,588	-1,149	1,265	-1,958	0,47

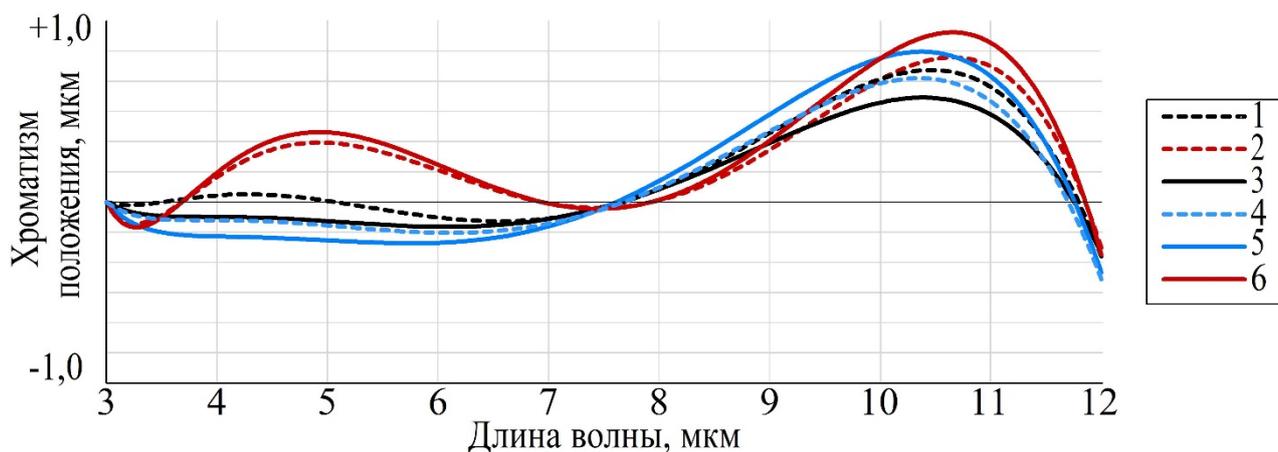


Рис. 1. График хроматизма положения смоделированных систем

Из рис. 2 видно, что во всех системах наблюдается, как минимум, апохроматический характер коррекции хроматизма положения системы. Для дальнейшего перехода к конечным апертурам и толщинам выбрана первая система. Процесс оптимизации стартовой системы построен на оптимизационных функциях, нацеленных на исправление геометрических aberrаций и повышении качества по выбранному интегральному критерию. На рис. 3 приведены ход лучей в оптической системе объектива с фокусным расстоянием 50 мм, относительным отверстием 1:1,2 и полем зрения $12,5 \times 9,3$ градусов в пространстве изображения, а также график хроматизма положения системы.

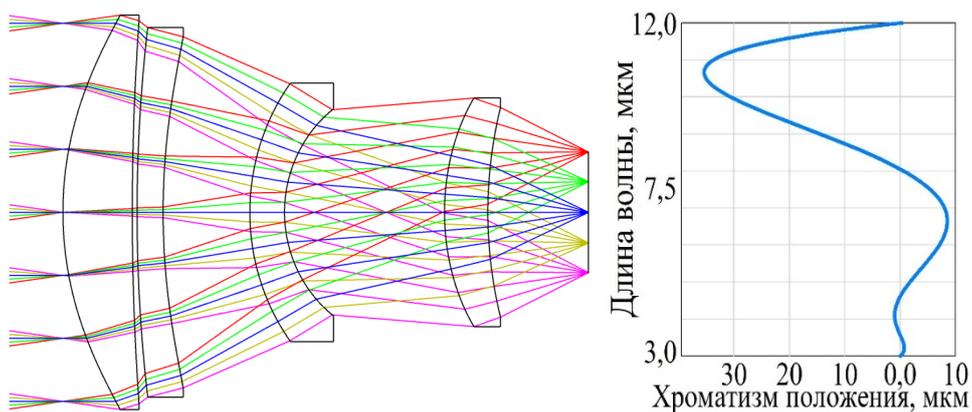


Рис. 2. Ход лучей в итоговой системе и график хроматизма

Сравнивая хроматизм положения на рис. 2 и 3, можно отметить, что сохранился характер коррекции данной aberrации, что, однако, не обязательно, поскольку системы в табл. 1 используются лишь как стартовые. В системе, представленной на рис. 3, применяются три асферические поверхности, две из которых направлены на коррекцию aberrаций широких пучков лучей, и одна – на коррекцию aberrаций узких пучков лучей. На рис. 4 приведен график частотно-контрастной характеристики системы по полю.

Анализ графиков частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) подтверждает, что итоговая оптическая система является дифракционно-ограниченной (рис. 3), и в ней сохраняется суперахроматический характер коррекции хроматических aberrаций (рис. 2) в DWIR диапазоне при сохранении ахроматической или апохроматической коррекций в MWIR и LWIR диапазонах, аналогичный стартовой системе. В полученных системах, в отличие от аналогов, не применяются такие сложные и нетехнологичные элементы как ДОЭ [10] и линзы, выполненные из материалов с градиентным распределением показателя преломления [11].

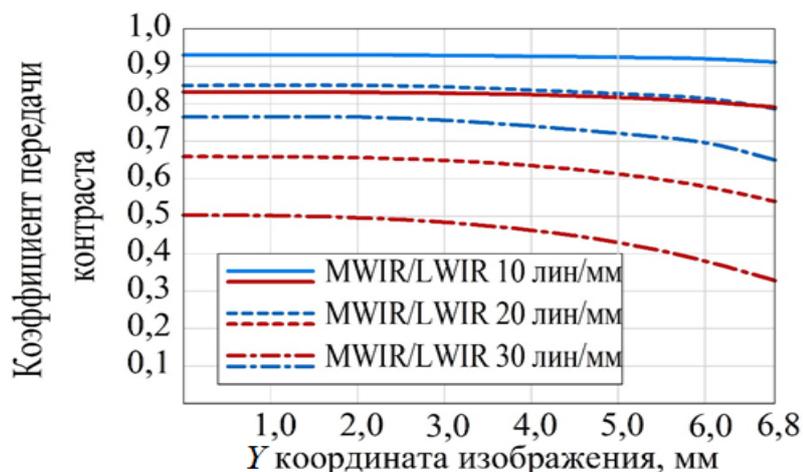


Рис. 3. ЧКХ системы по полю

Заключение

Показано, что в схеме с двумя разнесенными компонентами, каждый из которых включает по две линзы, среди решений уравнений (3) устранения хроматизма положения в диапазоне от 3 до 12 мкм имеются такие, в которых при определенных значениях оптических параметров линз эквивалентная относительная средняя дисперсия компонента принимает отрицательное значение. Такой эффект компонента с отрицательной эквивалентной относительной дисперсией подобен работе некоторых материалов с градиентным распределением показателя преломления.

На примере разработки объектива с фокусным расстоянием 50 мм продемонстрированы возможности предложенного схемного решения по коррекции хроматизма положения в спектральном диапазоне от 3 до 12 мкм при дифракционном качестве изображения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bing Jia, Yuchen Zhao, Xie Yuan Design of dual band common aperture continuous zoom optical system // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – Т. 1601, № 6. – С. 1–7.
2. Catanzaro B. E., Dombrowski M., Hendrixson J., Hillenbrand E. Design of dual-band SWIR/MWIR and MWIR/LWIR imagers // *Proc. SPIE 5406, Infrared Technology and Applications XXX*, (30 августа 2004). – 2004.
3. Кульчицкий, Н. А. Матричные фотоприемные устройства ИК-диапазона: «постпандемические» тенденции развития. Часть I // *Фотоника*. – 2020. – Т. 14. – № 3. – С. 234–244.
4. Кульчицкий, Н. А. Матричные фотоприемные устройства ИК-диапазона: «постпандемические» тенденции развития. Часть II // *Фотоника*. – 2020. – Т. 14. – № 4. – С. 320–330.
5. Атермализованный объектив для ИК-области спектра: пат. 2538423 Рос. Федерация. № 2013145121/28 / Белоусов А. И.; заявл. 08.10.2013; опубл. 10.01.2015, Бюл. № 1. – 11 с.
6. Светосильный объектив: пат. 2413261 Рос. Федерация. № 2010100559/28 / Медведев А.В., Гринкевич А.В., Мельникова Н.Н., Князева С.Н.; заявл. 11.01.2010; опубл. 27.02.2011, Бюл. № 6. – 7 с.
7. Светосильный объектив ИК-области: пат. 2506616 Рос. Федерация. № 2012130584/28 / Бушмелев Н.И., Погорельский С.Л., Просвирнов Р.А., Шилин А.А.; заявл. 17.07.2012; опубл. 10.02.2014, Бюл. № 4. – 9 с.
8. Serna P. S., Revuelta J. S. Optical glass selection for color corrected broadband instrumentation: an overview // *Applied Optics*. – 2022. – Т. 61, № 3. – С. A50–A61.
9. Corsetti J. A., McCarthy P., Moore D. T. Color correction in the infrared using gradient-index materials // *Optical Engineering*. – 2013. – Т. 52, № 11. – С. 1–6.
10. Bo Zhang, Qingfeng Cui, Mingxu Piao, and Yang Hu Design of dual-band infrared zoom lens with multilayer diffractive optical elements // *Applied Optics*. – 2019. – Т. 58, № 8. – С. 2058–2067.
11. Gibson D., Bayya S. S. и др. Diffusion-based gradient index optics for infrared imaging // *Optical Engineering*. – 2020. – Т. 52, № 11. – С. 1–22.

© Е. В. Шмелев, Т. Н. Хацевич, 2023