ОПТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ. 2024. Том 91. № 11. С. 34–42
OPTICHESKII ZHURNAL. 2024. V. 91. № 11. P. 34–42
Научная статья
Research Article

Оптический журнал
Расчет, проектирование и производство оптических систем
Calculation, design and manufacture of optical systems

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-11-34-42
УДК 535.326, 535.317.9, 681.7.067.222.2

Сверхсветосильный двухдиапазонный градиентно-дифракционный инфракрасный объектив

Григорий Исаевич Грейсух[1]✉, Илья Анатольевич Левин[2], Евгений Григорьевич Ежов[3]

[1, 3]Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия,
[2]Красногорский завод им. С.А. Зверева, г. Красногорск Московской обл., Россия

[1]grey@pguas.ru *https://orcid.org/0000-0003-4339-9245*
[2]i.a.levin@mail.ru *https://orcid.org/0000-0001-7451-589X3*
[3]subscribing_2002@mail.ru *https://orcid.org/0000-0001-9281-5394*

Аннотация

Предмет исследования. Исходная схема оптической системы, включающая тонкие однородные линзы и бесконечно тонкую модель толстой радиально-градиентной линзы, а также высокоапертурный двухдиапазонный инфракрасный триплет, рассчитанный с использованием этой исходной схемы. **Цель работы.** Моделирование и расчет оптической системы с коаксиально-ламинированной радиально-градиентной линзой, а также демонстрация потенциальных возможностей высокоапертурного двухдиапазонного инфракрасного объектива, состоящего из двух однородных и одной радиально-градиентной линз. **Метод.** Теоретический анализ, компьютерное моделирование и оптимизация с использованием программы оптического проектирования ZEMAX. **Основные результаты.** Показано, что предложенная бесконечно тонкая модель коаксиально-ламинированной радиально-градиентной линзы, имеющая ту же оптическую силу и продольный хроматизм, что и ее толстый прототип, вместе с тонкими однородными линзами, разделенными воздушными промежутками, может быть использована в качестве исходной схемы разрабатываемой оптической системы. При этом если распределение показателя преломления градиентной линзы известно, то наилучшие сочетание оптических материалов однородных линз и соотношение оптических сил всех элементов схемы могут быть получены из условия ахроматизации, апохроматизации или суперахроматизации путем многократного решения соответствующей системы уравнений. Представлены оптическая схема, конструктивные параметры и оптические характеристики рассчитанного двухдиапазонного (3,5–5 и 8–11,9 мкм) триплета, состоящего из двух однородных и одной градиентной линз, демонстрирующие эффективность предложенного подхода и возможность достижения высоких оптических характеристик у объективов такого типа. **Практическая значимость.** Результаты настоящего исследования открывают возможность создания на основе коаксиально-ламинированных радиально-градиентных линз простых по конструкции высокоапертурных двухдиапазонных инфракрасных объективов.

Ключевые слова: композитный градиентный материал, коаксиально-ламинированная радиально-градиентная линза и ее модель, дифракционный оптический элемент, сверхсветосильный двухдиапазонный инфракрасный объектив

Благодарность: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00081).

Ссылка для цитирования: Грейсух Г.И., Левин И.А., Ежов Е.Г. Сверхсветосильный двухдиапазонный градиентно-дифракционный инфракрасный объектив // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 11. С. 34–42. http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-11-34-42

Коды OCIS: 110.2760, 110.3080, 220.3620

Ultra-high-aperture dual-range gradient index-diffractive infrared objective

Grigory I. Greisukh[1]✉, Il'ya A. Levin[2], Evgeny G. Ezhov[3]

[1, 3]*Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia*
[2]*Krasnogorsk Plant named after S.A. Zverev, Krasnogorsk, Moscow region, Russia*

[1]*grey@pguas.ru* *https://orcid.org/0000-0003-4339-9245*
[2]*i.a.levin@mail.ru* *https://orcid.org/0000-0001-7451-589X3*
[3]*subscribing_2002@mail.ru* *https://orcid.org/0000-0001-9281-5394*

Abstract

Subject of the study. A coaxially laminated optical material for a radial gradient index lens of an ultra-high-aperture infrared objective, as well as a dual-band infrared objective with such lens and a diffractive optical element. **Purpose of the study.** Modeling and calculation of an optical system with a coaxially laminated radial gradient lens. Demonstration of the potential capabilities of an ultra-high-aperture dual-band infrared lens consisting of two uniform and one radial-gradient lenses. **The research method.** Theoretical analysis, computer modeling and optimization using the ZEMAX optical design program. **The main results.** It is shown that the proposed infinitely thin model of a coaxially laminated radial gradient lens, which has the same optical power and longitudinal chromatism as its thick prototype, together with thin homogeneous lenses separated by air gaps, can be used as the initial design of the optical system being developed. Moreover, if the distribution of the a gradient lens refractive index is known, then the best combination of homogeneous lenses optical materials and the optical powers ratio of all elements of the circuit can be obtained from the conditions of achromatization, superachromatization or superchromatization by repeatedly solving the corresponding system of equations. The optical design, design parameters and optical characteristics of the calculated dual-band (3.5–5 and 8–11.9 μm) triplet, consisting of two uniform and one gradient lenses, are presented, demonstrating the effectiveness of the proposed approach and the possibility of achieving high optical characteristics for lenses of this type. **Practical significance.** The results of this study open up the possibility of creating, on the basis of the already developed special series of chalcogenide glasses, radial gradient lenses with such refractive index distributions that allow them to be used to achieve high optical performance in simple infrared objective.

Keywords: composite gradient index material, coaxial laminated radial gradient index lens and its model, diffractive optical element, ultra-high-aperture dual-range gradient index-diffractive infrared objective

Acknowledgment: this work was supported by the Russian Science Foundation, project № 20-19-00081.

For citation: Greisukh G.I., Levin I.A., Ezhov E.G. Ultra-high-aperture dual-range gradient index-diffractive infrared objective [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 11. P. 34–42. http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-11-34-42

OCIS codes: 110.2760, 110.3080, 220.3620

ВВЕДЕНИЕ

Применение в тепловизорах в качестве приемника излучения неохлаждаемого микроболометра позволяет обеспечить простоту компоновки оптической схемы прибора и улучшить его массогабаритные характеристики по сравнению с вариантом, скомпонованным на основе охлаждаемого матричного фотоприемника. При этом успехи в области совершенствования микроболометров [1–3] открывают новые возможности в проектировании мультиспектральных систем с единым входным зрачком, работающих в двойном инфракрасном (ИК) диапазоне, включающем среднее и длинноволновое излучения [4, 5].

Еще одним фактором, способствующим расширению возможностей разработки двухдиапазонных тепловизионных систем, является появление новых оптических материалов, на основе которых методом ламинирования, заключающимся во взаимной термической диффузии слоев при спекании многокомпонентной

заготовки, обеспечивается получение градиентного материала с заданными оптическими свойствами [6, 7]. В частности, в работах [8, 9] представлены этапы моделирования такого композитного материала для радиально-градиентной линзы (РГЛ), а на примере расчета оптической схемы триплета показана возможность и целесообразность применения РГЛ из композитного материала как в средневолновом (3–5 мкм), так и двойном (3,5–5 и 8–11,9 мкм) диапазонах ИК спектра.

В то же время известно, что увеличение светосилы объектива повышает предельно достижимое значение его разрешающей способности, а в случае тепловизора, сопряженного с неохлаждаемым приемником излучения, уменьшает пороговое значение температурной чувствительности последнего.

В связи с этим целью настоящей работы являлись моделирование и расчет оптической системы с коаксиально-ламинированной РГЛ, а также демонстрация потенциальных возможностей высокоапертурного двухдиапазонного ИК объектива, состоящего из двух однородных линз и одной РГЛ.

В статье показаны возможности увеличения относительного отверстия объектива, описанного в работе [9], при сохранении его основных характеристик — фокусного расстояния $f' = 40$ мм, углового поля $2\omega = 19{,}5°$ и рабочего спектрального диапазона, включающего средневолновое (3,5–5 мкм) и длинноволновое (8–11,9 мкм) излучения ИК диапазона спектра.

КОАКСИАЛЬНО-ЛАМИНИРОВАННЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ РАДИАЛЬНО-ГРАДИЕНТНОЙ ЛИНЗЫ СВЕРХСВЕТОСИЛЬНОГО ДВУХДИАПАЗОННОГО ИНФРАКРАСНОГО ОБЪЕКТИВА

На первом этапе расчета сверхсветосильного тепловизионного объектива с РГЛ в программе оптического проектирования ZEMAX [10] в качестве исходного решения была использована схема триплета, описанного в работе [9], но с заменой поверхности типа Gradient 6 на Gradient 3. Показатель преломления этой поверхности описывается выражением

$$n(\rho) = n_0 + n_1\rho^2 + n_2\rho^4 + n_3\rho^6, \qquad (1)$$

где ρ — расстояние от оптической оси системы, а базовый показатель преломления n_0 и коэффициенты радиального градиента n_1–n_3 не зависят от длины волны излучения. Значения коэффициентов радиального градиента были положены равными соответствующим значениям коэффициентов материала NRLGRIN-D (см. [9]), но на фиксированной длине волны $\lambda_{fix} = 6{,}5$ мкм, принятой за расчетную для расширенного спектрального диапазона.

Оптимизация по всем конструктивным параметрам, включая коэффициенты n_1–n_3, позволила получить триплет-монохромат с относительным отверстием 1:0,84 и числовой апертурой в пространстве изображений 0,52, способный на длине волны $\lambda_{fix} = 6{,}5$ мкм формировать изображение по всему полю с контрастом $T \geq 0{,}7$ на пространственной частоте $N_N = 30$ мм$^{-1}$. При этом максимальная деформация волнового фронта на краю поля зрения у этого триплета не превышает $0{,}3\lambda_{fix}$.

Следует отметить, что при оптимизации базовый показатель преломления поверхности Gradient 3 n_0 был фиксированным и равным соответствующему показателю преломления халькогенидного стекла NRL-16, а показатель преломления $n(\rho)$ на краю поверхности поддерживался равным соответствующему показателю преломления халькогенидного стекла NRL-13 [11–13]. Дело в том, что если коаксиально-ламинированный материал NRLGRIN-D для РГЛ триплета, описанного в работе [9], разрабатывался как достаточно универсальный, т.е. позволял изготовить РГЛ со световым диаметром вплоть до 61 мм, то в случае сверхсветосильного объектива от этой универсальности следовало отказаться. Действительно, принятые меры по контролю показателя преломления на краю поверхности Gradient 3 гарантировали, что световым диаметром РГЛ окажутся охвачены все четыре ламинируемых слоя халькогенидных стекол и будет обеспечено сохранение значения показателя преломления стекла, используемого для данного слоя: на оси внутренней цилиндрической заготовки (NRL-16), на цилиндрических поверхностях каждого внутреннего трубчатого слоя (NRL-15, NRL-14) с радиусами ρ, равными половине суммы радиусов его внутренней и внешней цилиндрических поверхностей, и на внешней цилиндри-

ческой поверхности верхнего трубчатого слоя (NRL-13).

График зависимости показателя преломления композитного градиентного материала поверхности Gradient 3 представлен на рис. 1.

Далее следуя процедуре, подробно изложенной в разделе «Коаксиально-ламинированная РГЛ в программе ZEMAX» работы [9], были получены спектральные коэффициенты A_i–C_i и $D_i = 0$ для каждого из параметров n_i зависимости показателя преломления неоднородного материала поверхности типа Gradient 6 от длины волны λ и расстояния от оптической оси ρ

$$n(\lambda,\rho) = n_0(\lambda) + n_1(\lambda)\rho^2 + n_2(\lambda)\rho^4 + \\ + n_3(\lambda)\rho^6 + n_4(\lambda)\rho^8, \quad (2)$$

где

$$n_i(\lambda) = A_i + B_i\lambda^2 + \frac{C_i}{\lambda^2} + \frac{D_i}{\lambda^4}. \quad (3)$$

Спектральные коэффициенты были занесены в файл GLC.DAT каталога Glasscat программы ZEMAX. В табл. 1 представлены значения коэффициентов A_i–C_i. В качестве названия смоделированного неоднородного материала было выбрано NRLGRIN-D1.

На следующем этапе расчета в ZEMAX-файле оптимизированного триплета-монохромата поверхность типа Gradient 3 была заменена на Gradient 6 с материалом NRLGRIN-D1. В результате на длине волны $\lambda_{fix} = 6{,}5$ мкм как диаграммы рассеяния лучей, так и кривые коэффициентов передачи модуляции остались практически без изменений. Это свидетельствует о совпадении на этой длине волны радиального распределения показателя преломления поверхностей Gradient 3 и Gradient 6 с композитным градиентным материалом NRLGRIN-D1.

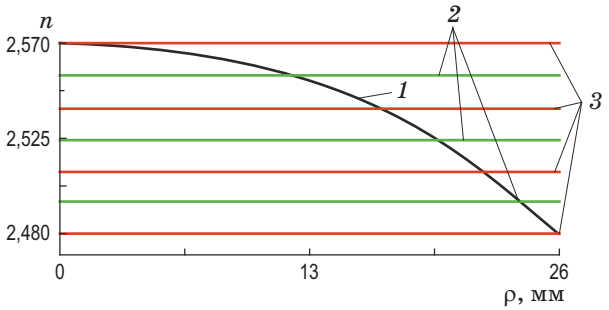


Рис. 1. Иллюстрация к модели композитной структуры градиентного материала. *1* — распределение показателя преломления на длине волны $\lambda_{fix} = 6{,}5$ мкм, горизонтальные прямые *2* — значения показателя преломления неоднородного материала на поверхностях раздела слоев, горизонтальные прямые *3* — значения показателей преломления стекол, используемых для соответствующего слоя неоднородного материала

Fig. 1. Illustration for the model of the composite structure of a gradient material. (*1*) distribution of the refractive index at $\lambda_{fix} = 6.5$ μm, (*2*) horizontal straight lines are values of the refractive index of inhomogeneous material at the interfaces of the layers, (*3*) horizontal straight lines are values of the refractive indices of glasses used for the corresponding layer of inhomogeneous material

РАСЧЕТ ИНФРАКРАСНОГО ОБЪЕКТИВА С ПОВЕРХНОСТЬЮ GRADIENT 6 И ДОСТИГНУТЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Оптимизированный триплет-монохромат с поверхностью типа Gradient 6 из оптического материала NRLGRIN-D1 использовался в качестве исходного решения при поиске конструктивных параметров сверхсветосильного двухдиапазонного объектива для ИК области спектра. Замена при моделировании $\lambda_{fix} = 6{,}5$ мкм на требуемый рабочий спектральный диапазон (3,5–5 и 8–11,9 мкм) привела к резкому увеличению диаграмм рассеяния

Таблица 1. Спектральные коэффициенты A_i–C_i неоднородного оптического материала NRLGRIN-D1
Table 1. Spectral coefficients A_i–C_i of the inhomogeneous optical material NRLGRIN-D1

n_i	A_i	B_i	C_i
n_0	2,57986685	$-2{,}37517956\times10^{-10}$	$6{,}72738317\times10^{4}$
n_1	$-9{,}86012104\times10^{-5}$	$-3{,}30656038\times10^{-14}$	−58,81769065
n_2	$-5{,}06290809\times10^{-8}$	$-9{,}393771585\times10^{-17}$	$1{,}85029302\times10^{-1}$
n_3	$3{,}88580070\times10^{-12}$	$4{,}11560399\times10^{-20}$	$-2{,}09578688\times10^{-4}$

лучей и падению коэффициентов передачи модуляции прежде всего из-за недопустимо большого продольного хроматизма. Последующая оптимизация по кривизне и асферичности поверхностей всех линз, а также по толщине линз и воздушных промежутков показала, что коррекция хроматизма приводит к нарушению ранее достигнутой коррекции полевых аберраций, и добиться их одновременного снижения до приемлемого уровня не представляется возможным. В лучшем варианте в указанном выше двойном спектральном диапазоне триплет способен на пространственной частоте 30 мм$^{-1}$ формировать изображение по всему полю при относительном отверстии 1:0,84 с контрастом $T \geq 0{,}3$ (см. рис. 2).

Обеспечить приемлемый уровень хроматизма и практически восстановить коррекцию полевых аберраций позволило введение в схему триплета дифракционного оптического элемента (ДОЭ) благодаря его большой отрицательной дисперсии и возможности управления в широких пределах составляющими сферической аберрации различных порядков [14]. При этом очевидно, что реальный положительный эффект от использования ДОЭ может быть достигнут только при условии высокой дифракционной эффективности и минимизации ее зависимости от длины волны и угла падения излучения на элемент. С этой целью микроструктуру ДОЭ ИК систем выполняют двуслойной с двумя внутренними пилообразными рельефами, как это изображено на рис. 3.

Рельефы ДОЭ выполняются в материальных подложках со значительно отличающимися коэффициентами дисперсии [5, 15].

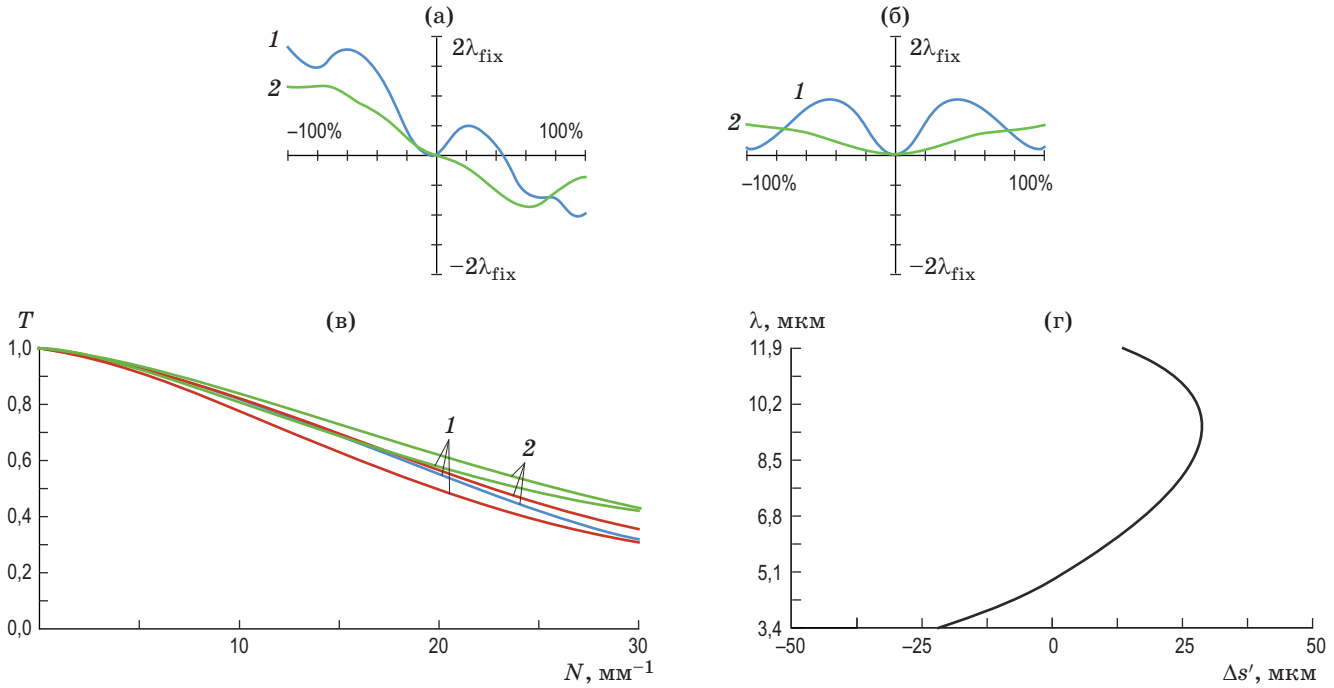


Рис. 2. Аберрационные кривые (а, б), дифракционная полихроматическая модуляционная передаточная функция (в) и хроматизм положения триплета в двойном спектральном диапазоне (г). (а), (б) — отклонения волнового фронта на краю поля зрения на двух длинах волн рабочего спектрального диапазона 3,5 (*1*) и 11,9 (*2*) мкм, которым соответствуют максимальное и минимальное отклонения волнового фронта в меридиональном (а) и сагиттальном (б) сечениях, (в) — модуляционная передаточная функция для трех полевых углов (кривые синие — $\omega = 0°$, зеленые — $\omega = 4{,}9°$, красные — $\omega = 9{,}75°$) в меридиональной (*1*) и сагиттальной (*2*) плоскостях

Fig. 2. (а, б) Aberration curves, (в) polychromatic diffraction modulation transfer function and (г) axial color at the double spectral range of a triplet. (а), (б) are wave aberration at the edge of the field of view at two wavelengths of the operating spectral range (*1*) 3.5 and (*2*) 11.9 μm, which correspond to the maximum and minimum wave aberration in the (a) tangential and (б) sagittal sections, (в) modulation transfer function for three field angles (blue curves — $\omega = 0°$, green — $\omega = 4{,}9°$, red — $\omega = 9{,}75°$) for (*1*) tangential and (*2*) sagittal planes

Таблица 2. Основные конструктивные параметры объектива

Table 2. Main design parameters of the objective

Номер поверхности	Радиус, мм	Толщина, мм	Оптический материал
1*	∞	∞	–
2	55,810	17,292	AMTIR3
3	36,499	6,535	–
4	∞	3	PBF2
5**	∞	0	–
6***	∞	3	HWS4
7	∞	0,2	
8****	45,646	12,524	NRLGRIN-D1
9	–115,665	3,686	–
10	–30,363	7,763	IIR-SF1
11	–43,148	24,874	–
12*****	∞	0	–

Примечание. * — плоскость предмета, ** — апертурная диафрагма диаметром 50,8 мм, *** — поверхность типа Binary 2: $m = 1$, $A_1 = -0{,}116657$ мм$^{-2}$, $A_2 = 0{,}108494\times10^{-3}$ мм^4, $A_3 = 8{,}555218\times10^{-7}$ мм$^{-6}$, $A_4 = -2{,}998936\times10^{-9}$ мм$^{-8}$, $A_5 = 3{,}738\times10^{-12}$ мм$^{-10}$, $A_6 = -1{,}718243\times10^{-15}$ мм$^{-12}$, **** — поверхность типа Gradient 6, ***** — плоскость изображения.

Note. * — object plane, ** — aperture diaphragm with a diameter of 50.8 mm, *** — Binary 2 type surface: $m = 1$, $A_1 = -0.116657$ mm^{-2}, $A_2 = 0.108494\times10^{-3}$ mm^4, $A_3 = 8.555218\times10^{-7}$ mm^{-6}, $A_4 = -2.998936\times10^{-9}$ mm^{-8}, $A_5 = 3.738\times10^{-12}$ mm^{-10}, $A_6 = -1.718243\times10^{-15}$ mm^{-12}, **** — Gradient 6 type surface, ***** — image plane.

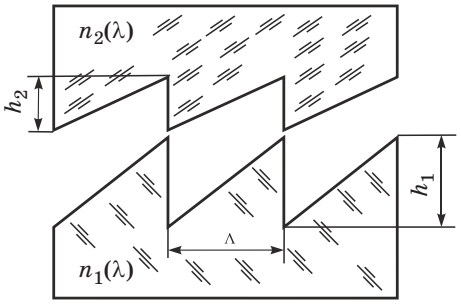


Рис. 3. Двуслойная пилообразная дифракционная микроструктура с двумя внутренними рельефами

Fig. 3. Double-layer sawtooth diffraction microstructure with two internal reliefs

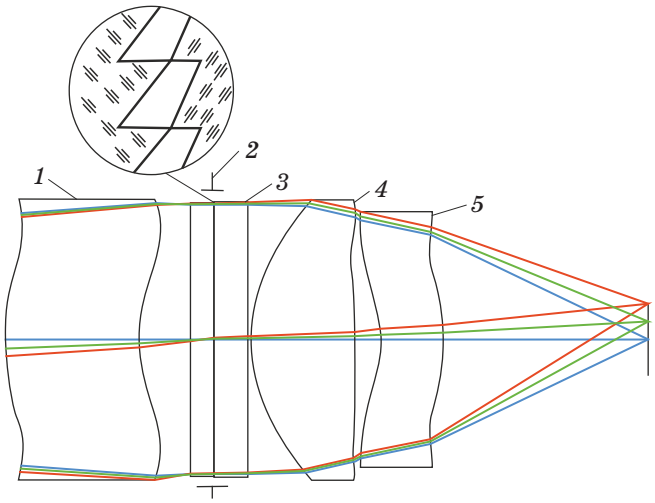


Рис. 4. Оптическая схема градиентно-дифракционного объектива. *1*, *5* — однородные линзы, *2* — апертурная диафрагма, *3* — двуслойный ДОЭ, *4* — РГЛ

Fig. 4. Optical layout of the GRIN-diffractive objective. (*1*), (*5*) are homogeneous lenses, (*2*) aperture stop, (*3*) double-layer diffractive optical element, (*4*) radial gradient index lens

Таблица 3. Дополнительные характеристики поверхностей линз объектива

Table 3. Additional parameters of the working surfaces of the objective lenses

Номер поверхности	Коническая постоянная	Коэффициент асферичности			
		α_2, мм$^{-3}$	α_3, мм$^{-5}$	α_4, мм$^{-7}$	α_5, мм$^{-9}$
2	–	$-7{,}5492\times10^{-6}$	$-3{,}9465\times10^{-9}$	$-6{,}2925\times10^{-13}$	$-2{,}6013\times10^{-15}$
3	–	$-2{,}0473\times10^{-5}$	$-2{,}4776\times10^{-10}$	$6{,}8715\times10^{-12}$	$-4{,}1628\times10^{-15}$
8	–0,639	–	–	–	–
9	–	$1{,}1504\times10^{-5}$	$-7{,}4065\times10^{-9}$	$6{,}1190\times10^{-12}$	$-6{,}2824\times10^{-15}$
10	–	$4{,}4383\times10^{-5}$	$-6{,}2659\times10^{-8}$	$7{,}6895\times10^{-11}$	$-3{,}1792\times10^{-14}$
11	–	$2{,}3750\times10^{-5}$	$-4{,}8255\times10^{-9}$	$-4{,}1912\times10^{-11}$	$8{,}3112\times10^{-14}$

Оптическая схема полученного в результате градиентно-дифракционного объектива представлена на рис. 4, а его конструктивные параметры — в табл. 2 и 3. При этом все поверхности линз в этих таблицах (за исключением поверхности Gradient 6) представляют собой так называемые четные асферические поверхности, описываемые в ZEMAX уравнением

$$z(\rho)=\frac{c\rho^2}{1+\sqrt{1-(1+\kappa)c^2\rho^2}}+\sum_{p=2}\alpha_p\rho^{2p}, \quad \textbf{(4)}$$

где $z(\rho)$ — координата точки поверхности, отстоящей от оптической оси на расстоянии ρ в системе координат, плоскость XOY которой касается вершины этой поверхности, c — кривизна поверхности в ее вершине, κ — коническая постоянная, α_p — коэффициент асферичности поверхности.

Что же касается дифракционной микроструктуры ДОЭ, то она в рамках ZEMAX моделируется поверхностью типа Binary 2 с фазовой задержкой вида

$$\Psi(\rho)=m\sum_{j=1}A_j\rho^{2j}, \quad \textbf{(5)}$$

где m — номер рабочего дифракционного порядка, A_j — постоянные коэффициенты.

Пилообразная двурельефная микроструктура ДОЭ состоит всего из 4-х кольцевых зон и при этом ширина самой узкой зоны, т.е. минимальный период микроструктуры, $\Lambda > 3{,}9$ мм. Оптимальные глубины рельефов этой микроструктуры $h_1 = 84{,}4$ мкм и $h_2 = 42{,}8$ мкм

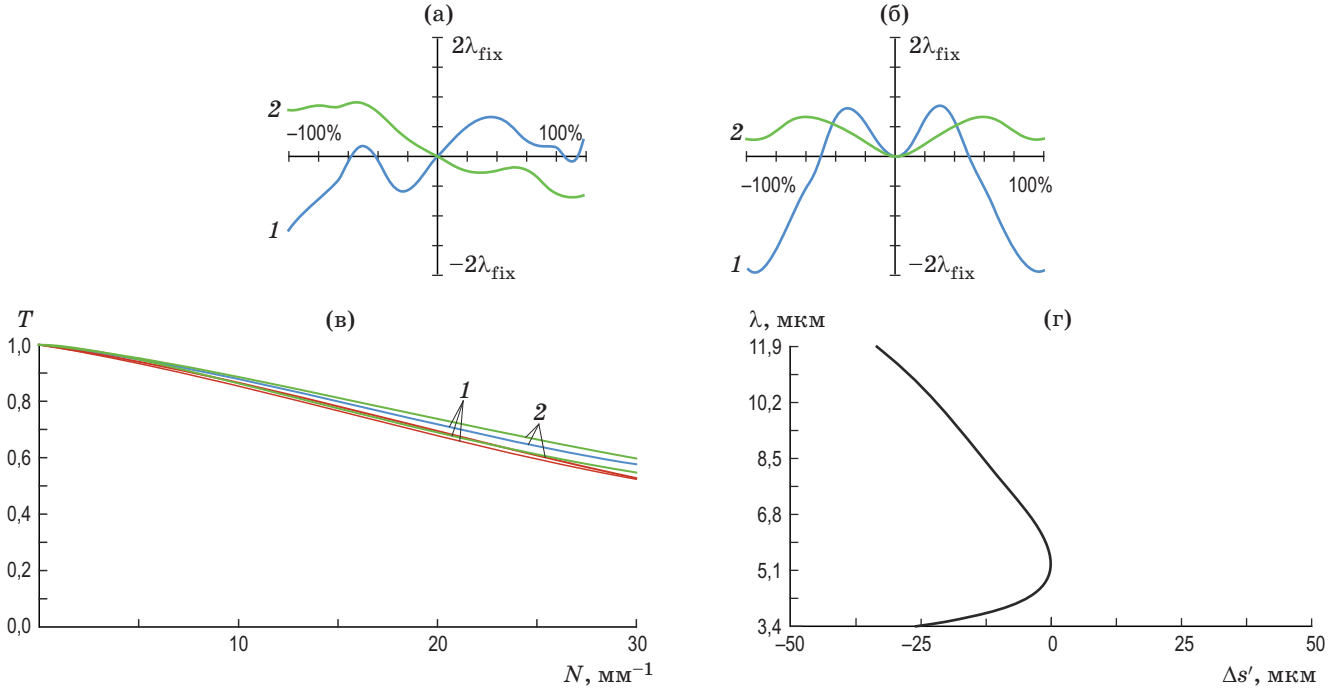


Рис. 5. Аберрационные кривые (а, б), дифракционная полихроматическая модуляционная передаточная функция (в) и хроматизм положения градиентно-дифракционного объектива в двойном спектральном диапазоне (г). (а), (б) — отклонения волнового фронта на краю поля зрения на двух длинах волн рабочего спектрального диапазона 3,5 (*1*) и 11,9 (*2*) мкм, которым соответствуют максимальное и минимальное отклонения волнового фронта в меридиональном (а) и сагиттальном (б) сечениях, (в) — модуляционная передаточная функция для трех полевых углов (кривые синие — $\omega = 0°$, зеленые — $\omega = 4{,}9°$, красные — $\omega = 9{,}75°$) в меридиональной (*1*) и сагиттальной (*2*) плоскостях

Fig. 5. (а, б) Aberration curves, (в) polychromatic diffraction modulation transfer function and (г) axial color at the double spectral range of the GRIN-diffractive objective. (а), (б) are wave aberration at the edge of the field of view at two wavelengths of the operating spectral range (*1*) 3.5 and (*2*) 11.9 μm, which correspond to the maximum and minimum wave aberration in the (а) tangential and (б) sagittal sections, (в) modulation transfer function for three field angles (blue curves — $\omega = 0°$, green — $\omega = 4{,}9°$, red — $\omega = 9{,}75°$) for (*1*) tangential and (*2*) sagittal planes

в материалах PBF2 и HWS4 соответственно. В интервале углов падения излучения на ДОЭ из воздуха ±11° обеспечивается дифракционная эффективность не менее 93% во всем рабочем спектральном диапазоне.

Как и у прототипа, заднее фокусное расстояние рассчитанного градиентно-дифракционного объектива составляет 40 мм, а угловое поле — 19,5°. При относительном отверстии 1:0,84 и числовой апертуре в пространстве изображений, равной 0,52, в двойном ИК диапазоне (3,5–5 и 8–11,9 мкм) он формирует изображение по всему полю с контрастом не менее 0,52 на пространственной частоте N_N = 30 мм$^{-1}$ — частоте Найквиста коммерчески доступных сегодня неохлаждаемых микроболометров *Bird* 640 *Ceramic Packaging* BB *Wide-Band* [16] и АСТРОН-64017-2 [17] форматом 640×512 и с шагом матрицы 17 мкм.

Продольный габарит объектива, т.е. расстояние от фронтальной плоскости до плоскости изображения, составляет 79 мм, а наибольший световой диаметр — 52 мм. Максимальный хроматизм положения менее 35 мкм при дифракционном пределе 14 мкм, а дисторсия не превышает 0,9%.

Аберрационные кривые и дифракционная полихроматическая модуляционная передаточная функция градиентно-дифракционного объектива представлены на рис. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Успехи в области совершенствования широкодиапазонных ИК микроболометров в совокупности с достигнутым уровнем технологий создания градиентных оптических материалов открывают новые возможности тепловизоров с единым входным зрачком, работающих в двойном спектральном диапазоне, включающем ИК излучение среднего и длинноволнового диапазонов.

В настоящей статье представлены этапы моделирования и расчета простого по конструкции сверхсветосильного двухдиапазонного градиентно-дифракционного ИК объектива, включающие компоновку и моделирование коаксиально-ламинированного оптического материала для градиентной линзы такого объектива.

На первом этапе путем оптимизации с использованием программы ZEMAX был получен сверхсветосильный триплет-монохромат с относительным отверстием 1:0,84 и числовой апертурой в пространстве изображений 0,52, способный на длине волны 6,5 мкм в пределах углового поля 19,5° формировать изображение с контрастом более 0,7 на пространственной частоте 30 мм$^{-1}$. В качестве исходного решения до оптимизации был принят ранее рассчитанный двухдиапазонный ИК триплет с РГЛ из четырехслойного коаксиально-ламинированного оптического материала.

На втором этапе были определены радиусы границ слоев коаксиально-ламинированного оптического материала РГЛ и получены спектральные коэффициенты, необходимые для моделирования РГЛ в программе ZEMAX поверхностью Gradient 6.

Обеспечить приемлемый уровень хроматизма и практически восстановить коррекцию полевых аберраций позволило введение в схему триплета ДОЭ.

В итоге был получен градиентно-дифракционный объектив с заданными оптическими характеристиками, при этом максимальный хроматизм положения составляет менее 35 мкм при дифракционном пределе 14 мкм, а дисторсия не превышает 0,9%.

Достигнутые оптические характеристики позволят этому объективу в полной мере использовать потенциальные возможности таких коммерчески доступных сегодня неохлаждаемых микроболометров, как *Bird* 640 *Ceramic Packaging* BB *Wide-Band* и АСТРОН-64017-2.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Tissot J.L., Trouilleau C., Fieque B., et al. Uncooled microbolometer detector: Recent developments at Ulis // Opto-Electron. Rev. 2006. V. 14. № 1. P. 25–32. https://doi.org/10.2478/s11772-006-0004-2
2. Keskin S., Akin T. The first fabricated dual-band uncooled infrared microbolometer detector with a tunable micro-mirror structure // Proc. SPIE. 2012. V. 8353. P. 83531 (11 p.). https://doi.org/10.1117/12.964551
3. Smith E.M., Panjwani D., Ginn J., et al. Dual band sensitivity enhancements of a VO_x microbolometer array using a patterned gold black absorber // Appl. Opt. 2016. V. 55. № 8. P. 2071–2078. https://doi.org/10.1364/AO.55.002071
4. Alaruri S.D. f/1.6 diffraction-limited air-spaced Cooke triplet photographic lens designs for MWIR and LWIR imaging applications: Geometrical optics performance comparison between Ge–ZnSe–Ge and Si–Ge–Si triplet

designs using Zemax // Optik. 2016. V. 127. Iss. 1. P. 254–258. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.10.085
5. Greisukh G.I., Levin I.A, Ezhov E.G. Design of ultra-high-aperture dual-range athermal infrared objectives // Photonics. 2022. V. 9. № 10. P. 742. https://doi.org/10.3390/photonics9100742
6. Gibson D., Bayya S., Nguyen V., et al. IR GRIN optics for imaging // Proc. SPIE. 2016. V. 9822. P. 98220R (9 p.). https://doi.org/10.1117/12.2224094
7. Gibson D., Bayya S., Nguyen V., et al. GRIN optics for multispectral infrared imaging // Proc. SPIE. 2015. V. 9451. P. 94511P (7 p.). https://doi.org/10.1117/12.2177136
8. Грейсух Г.И., Левин И.А., Ежов Е.Г. Сверхсветосильный тепловизионный триплет с градиентной линзой: этапы моделирования композитного градиентного материала и потенциальные возможности оптической схемы // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 3. С. 5–13. http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-03-5-13
Greisukh G.I., Levin I.A., Ezhov E.G. Ultra-high-aperture infrared triplet with grin lens: Modeling stages of composite gradient-index material and potential possibilities of the optical scheme // J. Opt. Technol. 2024. V. 91. № 3. P. 137–141. https://doi.org/10.1364/JOT.91.000137
9. Грейсух Г.И., Левин И.А., Ежов Е.Г. Моделирование ламинированной радиально-градиентной линзы; расчет и достижимые характеристики двухдиапазонного инфракрасного триплета с такой линзой // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 10. С. 34–42. http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-10-34-42
Greisukh G.I., Levin I.A., Ezhov E.G. Modeling of a radial laminated GRIN lens; design and achievable performances of a dual-band infrared triplet with such lens // J. Opt. Technol. 2024. V. 91. № 10. P. 00–00. https://doi.org/10.1364/JOT.91.000000
10. Электронный ресурс URL: https://www.ansys.com/products/optics/ansys-zemax-opticstudio (Ansys Zemax Optic: Studio Comprehensive Optical Design Software).
Electronic resource URL: https://www.ansys.com/products/optics/ansys-zemax-opticstudio (Ansys Zemax Optic: Studio Comprehensive Optical Design Software).
11. Beadie G., Stover E., Gibson D. Temperature-dependent dispersion fitting for a recent infrared glass catalog // Proc. SPIE. 2019. V. 10998. P. 1099804 (6 p.). https://doi.org/10.1117/12.2518494
12. Bayya S., Gibson D., Nuygen V., et al. Design and fabrication of multispectral optics using expanded glass map // Proc. SPIE. 2015. V. 9451. P. 94511N (7 p.). https://doi.org/10.1117/12.2177289
13. Gibson D., Bayya S., Nguyen V.Q., et al. Diffusion-based gradient index optics for infrared imaging // Opt. Eng. 2020. V. 59. № 11. P. 112604. https://doi.org/10.1117/1.OE.59.11.112604
14. Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Степанов С.А. Сравнительный анализ хроматизма дифракционных и рефракционных линз // Компьютерная оптика. М.: МЦНТИ, 2005. Вып. 28. С. 60–65.
Greisukh G.I., Ezhov E.G., Stepanov S.A. Comparative analysis of chromatism of diffractive and refractive lenses [in Russian] // Computer Opt. Moscow: ICSTI, 2005. Iss. 28. P. 60–65.
15. Greisukh G.I., Levin I.A., Zakharov O.A. Diffractive elements in thermal imaging monofocal dual-band objectives: Design and technological aspects // Computer Opt. 2024. V. 48. № 2. P. 210–216. https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1336
16. Электронный ресурс URL: https://www.scd.co.il/wp-content/uploads/2019/07/Bird640-17-ceramic_brochure_v3_PRINT.pdf (SemiConductor Devices).
Electronic resource URL: https://www.scd.co.il/wp-content/uploads/2019/07/Bird640-17-ceramic_brochure_v3_PRINT.pdf (SemiConductor Devices).
17. Электронный ресурс URL: https://astrohn.ru/product/astrohn-64017-2/ (ASTRON-64017-2. Microbolometer Matrix Detector.).
Electronic resource URL: https://astrohn.ru/product/astrohn-64017-2/ (ASTRON-64017-2. Microbolometer Matrix Detector.).

АВТОРЫ

Григорий Исаевич Грейсух — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, 400028, Россия; Scopus ID: 6603957506; https://orcid.org/0000-0003-4339-9245; grey@pguas.ru

Илья Анатольевич Левин — кандидат физико-математических наук, ведущий инженер-конструктор, Красногорский завод им. С.А. Зверева, г. Красногорск Московской обл., 143402, Россия; Scopus ID: 36463827600; https://orcid.org/0000-0001-7451-589X3; i.a.levin@mail.ru

Евгений Григорьевич Ежов — доктор физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник (консультант), Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, 400028, Россия; Scopus ID: 35619370900; https://orcid.org/0000-0001-9281-5394; subscribing_2002@mail.ru

Статья поступила в редакцию 04.03.2024
Одобрена после рецензирования 17.04.2024
Принята к печати 30.09.2024

AUTHORS

Grigory I. Greisukh — Dr. Sci. (Engineering), Full Professor, Head of Department, Penza State University of Architecture and Construction, Penza, 400028, Russia; Scopus ID: 6603957506; https://orcid.org/0000-0003-4339-9245; grey@pguas.ru

Il'ya A. Levin — PhD (Physics and Mathematics), Leading Design Engineer, Krasnogorsk Plant named after S.A. Zverev, Krasnogorsk, Moscow region, 143402, Russia; Scopus ID: 36463827600; https://orcid.org/0000-0001-7451-589X3; i.a.levin@mail.ru

Evgeniy G. Ezhov — Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Senior Research Fellow (consultant), Penza State University of Architecture and Construction, Penza, 400028, Russia; Scopus ID: 35619370900; https://orcid.org/0000-0001-9281-5394; subscribing_2002@mail.ru

The article was submitted to the editorial office 04.03.2024
Approved after review 17.04.2024
Accepted for publication 30.09.2024