

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-10-34-42

УДК 535.326, 535.317.9, 681.7.067.222.2

Моделирование ламинированной радиально-градиентной линзы; расчёт и достижимые характеристики двухдиапазонного инфракрасного триплета с такой линзой

Григорий Исаевич Грейсух^{1✉}, Илья Анатольевич Левин²,
Евгений Григорьевич Ежов³

^{1, 3}Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия,

²Красногорский завод им. С.А. Зверева, Красногорск, Россия

¹grey@pguas.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4339-9245>

²i.a.levin@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7451-589X>

³subscribing_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.** Представить этапы расчёта оптической системы с коаксиально-ламинированной радиально-градиентной линзой и продемонстрировать потенциальные возможности высокоапертурного двухдиапазонного инфракрасного объектива, состоящего из двух однородных и одной радиально-градиентной линзы. **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 её толстый прототип, вместе с тонкими однородными линзами, разделёнными воздушными промежутками, может быть использована в качестве исходной схемы разрабатываемой оптической системы. При этом, если распределение показателя преломления градиентной линзы известно, то наилучшее сочетание оптических материалов однородных линз и соотношение оптических сил всех элементов схемы могут быть получены из условия ахроматизации, апохроматизации или суперхроматизации путём многократного решения соответствующей системы уравнений. Эффективность предложенного подхода и возможность достижения высоких оптических характеристик у двухдиапазонного инфракрасного триплета, состоящего из двух однородных и одной градиентной линзы, продемонстрированы на примере проектирования системы с коаксиально-ламинированной радиально-градиентной линзой. Комбинация марок новых халькогенидных стёкол для композитного материала этой линзы была выбрана исходя из условия достижения требуемого распределения показателя преломления. Само это распределение было получено при проектировании триплета среднего (3–5 мкм) инфракрасного диапазона. Представлены оптическая схема, конструктивные параметры и оптические характеристики рассчитанного двухдиапазонного (3,5–5 и 8–11,9 мкм) триплета. Его фокусное расстояние равно 40 мм, диафрагменное число — 0,98, а числовая апертура в пространстве изображений равна 0,45. В пределах углового поля зрения 19,5° этот объектив формирует изображение с контрастом 0,54 при пространственной частоте 30 мм⁻¹. Модуль его дисторсии не превышает 0,4%.

Практическая значимость. Результаты настоящего исследования открывают возможность создания на основе коаксиально-ламинированных радиально-градиентных линз простых по конструкции высокоапертурных двухдиапазонных инфракрасных объективов.

Ключевые слова: халькогенидные стёкла, композитный градиентный материал, коаксиально-ламинированная радиально-градиентная линза и её модель, сверхсветосильный двухдиапазонный инфракрасный триплет

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

Ссылка для цитирования: Грейсукх Г.И., Левин И.А., Ежов Е.Г. Моделирование ламинированной радиально-градиентной линзы; расчёт 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>

Коды OCIS: 110.2760, 110.3080, 220.3620.

Modeling of a radial laminated grin lens; design and achievable performances of a dual-band infrared triplet with such lens

GRIGORIY I. GREISUKH¹✉, IL'YA A. LEVIN², EVGENIY G. EZHOV³

^{1, 3}*Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia*

²*Krasnogorsk Plant named after S.A. Zverev, Krasnogorsk, Russia*

¹*grey@pguas.ru*

<https://orcid.org/0000-0003-4339-9245>

²*i.a.levin@mail.ru*

<https://orcid.org/0000-0001-7451-589X>

³*subscribing_2002@mail.ru*

<https://orcid.org/0000-0001-9281-5394>

Abstract

Subject of the study. The initial scheme of the optical system, including thin homogeneous lenses and an infinitely thin model of a thick radial gradient-index lens, as well as a high-aperture dual-band infrared triplet calculated using this initial scheme. **Purpose of the study.** To present the calculation stages of an optical system with a coaxial laminated radial gradient-index lens and demonstrate the achievable performances of a high-aperture dual-band infrared objective consisting of two homogeneous and one radial gradient-index lens. **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 coaxial laminated radial gradient-index lens, having the same optical power and chromatic focal shift as the thick prototype, together with thin homogeneous lenses separated by air gaps, can be used as the initial scheme of the optical system being developed. At the same time, if the distribution of the refractive index of the gradient-index lens is known, then the best combination of optical materials of homogeneous lenses and the ratio of optical powers of all elements of the scheme can be obtained from the condition of achromatization, apochromatization or superchromatization by repeatedly solving the corresponding system of equations. The effectiveness of the proposed approach and the possibility of achieving high optical performances in a dual-band infrared triplet consisting of two homogeneous and one gradient-index lenses are demonstrated by the example of designing a system with a coaxially laminated radial gradient-index lens. The combination of brands of new chalcogenide glasses for the composite material of this lens was chosen based on the condition of achieving the required distribution of the refractive index. This distribution itself was obtained when designing a triplet of the medium (3–5 μm) infrared range. The layout, design parameters and optical performance of the calculated dual-band (3.5–5 and 8–11.9 μm) triplet are presented. Its focal length is 40 mm, F-number is 0.98 and the numerical aperture in the image space is 0.45. Within the angular field of view of 19.5°, this triplet forms an image with a contrast of 0.54 at a spatial frequency of 30 mm^{-1} . Its distortion modulus does not exceed 0.4%. **Practical significance.** The results of this study open up the possibility of creating simple high-aperture dual-band infrared objectives based on coaxially laminated radial gradient-index lenses.

Keywords: chalcogenide glasses, composite gradient-index material, coaxial laminated radial gradient-index lens and its model, high-aperture dual-band infrared triplet

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. Modeling of a radial laminated grin lens; design and achievable performances of a dual-band infrared triplet with such lens [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 10. P. 34–42. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-10-34-42>

OCIS codes: 110.2760, 110.3080, 220.3620.

ВВЕДЕНИЕ

В ранее опубликованной статье [1] представлен процесс моделирования композитного градиентного материала на основе специальной серии халькогенидных стёкол, прозрачных в широком инфракрасном (ИК) диапазоне спектра. Эта серия стёкол (NRL-01 — NRL-23) разработана в исследовательской лаборатории военно-морских сил США (Naval Research Laboratory). Стёкла серии наряду с достаточно широким интервалом значений показателя преломления ($2,37 < n < 2,79$) отличаются близкими значениями температурных коэффициентов теплового расширения, а также совместимыми профилями вязкости [2–4].

Композитный материал, описанный в [1], предназначен для радиально-градиентной линзы (РГЛ) сверхсветосильного объектива, оптическая схема которого наряду с градиентной включает две однородные рефракционные линзы. Фокусное расстояние этого объектива $f' = 40$ мм; угловое поле зрения $2\omega = 19,5^\circ$, а диафрагменное число $K = 0,84$. Рассчитан объектив на работу в средневолновом ИК диапазоне (3–5 мкм).

Настоящая статья демонстрирует возможность расширения рабочего спектрального диапазона этого объектива без усложнения его оптической схемы и при использовании для его РГЛ того же самого композитного материала.

Цель работы — представить этапы расчёта оптической системы с коаксиально-ламинированной РГЛ и продемонстрировать потенциальные возможности высокоапертурного двухдиапазонного инфракрасного объектива, состоящего из двух однородных и одной радиально-градиентной линзы. При этом в качестве расширенного спектрального диапазона объектива принят диапазон, включающий средневолновое (3,5–5 мкм) и длинноволновое (8–11,9 мкм) ИК излучение.

В работе [1] комбинация марок для композитной структуры градиентного материала подбиралась с учётом наилучшего соответствия требуемому распределению показателя преломления. Само же распределение показателя преломления было получено при расчёте триплета на центральной длине волны среднего ИК диапазона. При этом исходили из того, что технологический процесс коаксиального ламинирования нескольких слоёв стёкол, предполагающий термическую диффузию, обеспечивает сохранение значения показателя преломления стекла, используемого

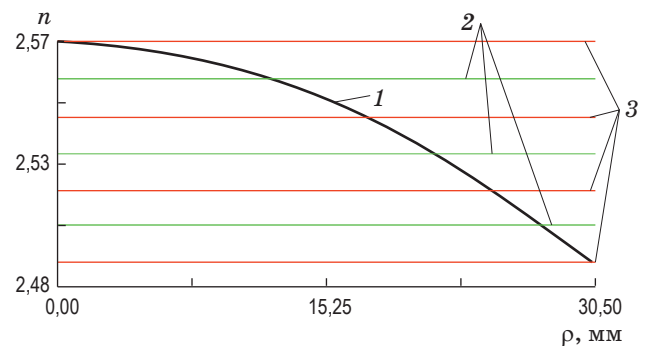


Рис. 1. Иллюстрация к модели композитной структуры градиентного материала: кривая 1 — распределение показателя преломления на длине $\lambda_c = 6,5$ мкм; горизонтальные прямые 2 — значения показателя преломления неоднородного материала на поверхностях раздела слоёв; горизонтальные прямые 3 — значения показателей преломления стёкол, используемых для соответствующего слоя неоднородного материала

Fig. 1. Illustration for the model of the composite structure of a gradient material: curve 1 — distribution of the refractive index at a length of $\lambda_c = 6.5 \mu\text{m}$; horizontal straight lines 2 — values of the refractive index of inhomogeneous material at the interfaces of the layers; horizontal straight lines 3 — values of the refractive indices of glasses used for the corresponding layer of inhomogeneous material

для данного слоя: на оси для 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 цилиндрической поверхности для верхнего трубчатого слоя (NRL-13). График зависимости показателя преломления композитного градиентного материала, описанного в статье [1], но уже на длине волны $\lambda_c = 6,5$ мкм, принятой за расчётную для расширенного спектрального диапазона, представлен на рис. 1.

КОАКСИАЛЬНО-ЛАМИНИРОВАННАЯ РГЛ В ПРОГРАММЕ ZEMAX

Расчёт и оптимизация двухдиапазонного ИК триплета с РГЛ осуществлялись в программе оптического проектирования ZEMAX [5]. При этом РГЛ представлялась поверхностью типа «Gradient 6». Зависимость показателя преломления неоднородного материала от расстояния от оптической оси ρ для данного типа поверхности описывается выражением

$$n(\lambda, \rho) = n_0(\lambda) + n_1(\lambda)\rho^2 + n_2(\lambda)\rho^4 + n_3(\lambda)\rho^6 + n_4(\lambda)\rho^8, \quad (1)$$

а каждый из коэффициентов $n_i(\lambda)$ в формуле (1) является функцией длины волны

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

где $i = 0, 1, \dots, 4$; A_i – D_i — спектральные коэффициенты; λ — длина волны в нанометрах.

Значения показателя преломления поверхности типа «Gradient 6» на тех радиусах цилиндрических поверхностей, на которых они должны совпадать со значениями показателя преломления стекла, используемого для соответствующего слоя неоднородного материала (рис. 1) на трёх длинах волн рабочего спектрального диапазона, представлены в табл. 1. Эти данные необходимы для получения спектральных коэффициентов формулы (2).

Для каждой из трёх длин волн по четырём табличным значениям показателя преломления n были получены коэффициенты n_0 – n_3 выражений (1) и (2). Эти коэффициенты, представленные в табл. 2, были получены путём решения системы четырёх линейных уравнений, составленных с использованием формулы (1) при $n_4(\lambda) = 0$.

С использованием формулы (2) и данных табл. 2 была составлена и решена система трёх

Таблица 1. Исходные данные, необходимые для получения спектральных коэффициентов формулы (2)
Table 1. Initial data required to obtain the spectral coefficients of equation (2)

Марка стекла	ρ , мм	Показатель преломления стекла n на длине волны λ , мкм		
		3,5	6,5	11,9
NRL-16	0	2,582449	2,571424	2,546707
NRL-15	17,53570	2,551510	2,540414	2,514319
NRL-14	24,80844	2,521734	2,510220	2,482311
NRL-13	30,52774	2,492323	2,480867	2,451296

Таблица 2. Промежуточные данные, необходимые для получения спектральных коэффициентов формулы (2)
Table 2. Intermediate data required to obtain the spectral coefficients of equation (2)

λ_j , мкм	3,5	6,5	11,9
n_0	2,58245	2,57142	2,54671
n_1 , мм ⁻²	$-1,02649 \times 10^{-4}$	$-1,01444 \times 10^{-4}$	$-1,04549 \times 10^{-4}$
n_2 , мм ⁻⁴	$6,73558 \times 10^{-9}$	$6,49385 \times 10^{-10}$	$-4,92105 \times 10^{-4}$
n_3 , мм ⁻⁶	$-3,86635 \times 10^{-13}$	$4,22457 \times 10^{-12}$	$7,77932 \times 10^{-12}$

Таблица 3. Спектральные коэффициенты A_i – C_i неоднородного оптического материала NRLGRIN-D
Table 3. Spectral coefficients A_i – C_i of composite gradient-index optical material NRLGRIN-D

n_i	A_i	B_i	C_i
n_0	2,57986685	$-2,37517956 \times 10^{-10}$	$6,72738317 \times 10^4$
n_1	$-9,88812104 \times 10^{-5}$	$-3,80061655 \times 10^{-14}$	$-40,45234534$
n_2	$4,61946493 \times 10^{-10}$	$-4,21606981 \times 10^{-17}$	$8,31787670 \times 10^{-2}$
n_3	$4,766311012 \times 10^{-12}$	$2,46087123 \times 10^{-20}$	$-6,68164395 \times 10^{-5}$

линейных уравнений. В результате этого были получены спектральные коэффициенты A_i – C_i и $D_i = 0$ для каждого из параметров n_i . Эти коэффициенты были занесены в файл GLC.DAT каталога Glasscat программы оптического проектирования ZEMAX. В табл. 3 представлены значения коэффициентов A_i – C_i . В качестве названия смоделированного неоднородного материала было выбрано NRLGRIN-D.

ИСХОДНАЯ СХЕМА ПРОЕКТИРУЕМОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Для формирования исходной схемы оптической системы, используемой затем в программе ZEMAX, необходимо задать последовательность оптических элементов, выбрать материалы однородных линз и получить оптические силы всех элементов. Это можно сделать из условия достижения требуемой оптической силы системы в целом, её ахроматизации, апохроматизации или суперхроматизации. Само же требуемое условие может быть записано в виде системы уравнений в достаточно простом виде в предположении, что исходная оптическая схема состоит из тонких элементов, разделённых воздушными промежутками.

Здесь следует сразу же заметить, что осевая толщина РГЛ d влияет на её оптическую силу в гораздо большей степени, чем в случае однородной рефракционной линзы. В этом легко убедиться обратившись к формулам для оптической силы РГЛ со сферическими преломляющими поверхностями φ_G при $n_1 \leq 0$, приведённым, например, в работе [6]:

$$\varphi_G = (n_0 - 1)(c_1 - c_2)F_1(d\sqrt{-\bar{n}_1}) - \left[2n_0n_1 - (n_0 - 1)^2 c_1c_2\right]B, \quad (3)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \bar{n}_1 &= 2n_1/n_0, \\ F_1(d\sqrt{-\bar{n}_1}) &= \cos(d\sqrt{-\bar{n}_1}), \\ B &= F_2(d\sqrt{-\bar{n}_1})/n_0, \\ F_2(d\sqrt{-\bar{n}_1}) &= \sin(d\sqrt{-\bar{n}_1})/\sqrt{-\bar{n}_1} \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Учитывая это обстоятельство, в систему уравнений, связывающих оптические силы и дисперсионные коэффициенты элементов исходной схемы, следует включить бесконечно тонкий элемент, но с такими же оптической силой и хроматизмом, как у толстой РГЛ.

Ниже приведём указанную систему уравнений для исходной схемы апохроматизированного триплета, состоящего из РГЛ, размещённой между двух однородных линз, и имеющего заданную оптическую силу на расчётной длине волны λ_c рабочего спектрального диапазона:

$$\left. \begin{aligned} h_1\varphi_1 + h_G\varphi_G + h_2\varphi_2 &= h_1\Phi, \\ h_1^2 \frac{\varphi_1}{v_1} + h_G^2 \frac{\varphi_G}{v_G} + h_2^2 \frac{\varphi_2}{v_2} &= \delta_1, \\ h_1^2 \frac{\varphi_1}{v_1^{(\gamma)}} + h_G^2 \frac{\varphi_G}{v_G^{(\gamma)}} + h_2^2 \frac{\varphi_2}{v_2^{(\gamma)}} &= \delta_2 \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

Здесь φ_i и h_i — оптические силы фронтальной и оконечной однородных линз и высоты падения апертурного параксиального луча на них; φ_G и h_G — оптическая сила модели РГЛ и высота падения апертурного параксиального луча на неё; Φ — оптическая сила объектива в целом. Число Аббе v_i и нормированное число Аббе на относительную частную

дисперсию $v_i^{(\gamma)}$ однородных линз описываются выражениями

$$\left. \begin{aligned} v_i &= (n_{\lambda_c} - 1) / (n_{\lambda_{\min}} - n_{\lambda_{\max}}) \\ v_i^{(\gamma)} &= v_i / \gamma_i = (n_{\lambda_c} - 1) / (n_{\lambda_{\min}} - n_{\lambda_c}) \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

где n_{λ_c} , $n_{\lambda_{\min}}$ и $n_{\lambda_{\max}}$ — показатели преломления материала i -й линзы на соответствующей длине волны. Строгая апохроматизация будет достигнута при $\delta_1 = \delta_2 = 0$.

Для того чтобы получить выражения для числа Аббе бесконечно тонкой модели толстой РГЛ, можно воспользоваться параметром

$$\zeta = \varphi / \Delta\varphi, \quad (7)$$

где φ — оптическая сила на расчётной длине волны, а под $\Delta\varphi$ понимается приращение оптической силы при изменении длины волны от $\lambda_{\min}$ до $\lambda_{\max}$. Здесь заметим, что равенство $v = \zeta$ строго выполняется в случае как дифракционной, так и тонкой однородной линзы.

Применив выражение (7) к бесконечно тонкому аналогу РГЛ v_G и $v_G^{(\gamma)}$, можно записать в виде:

$$\left. \begin{aligned} v_G &= \varphi_G(\lambda_c) / (\varphi_G(\lambda_{\min}) - \varphi_G(\lambda_{\max})) \\ v_G^{(\gamma)} &= \varphi_G(\lambda_c) / (\varphi_G(\lambda_{\min}) - \varphi_G(\lambda_c)) \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

Здесь $\varphi_G(\lambda)$ — оптическая сила реальной РГЛ на соответствующей длине волны.

Используя выражения (3), (4) и (8), нетрудно показать, что при неизменных осевой толщине и оптической силе на расчётной длине волны λ_c заданного спектрального диапазона дисперсионные коэффициенты РГЛ слабо зависят от соотношения кривизн её преломляющих поверхностей. Это обстоятельство позволяет задавать в системе уравнений (5) модель реальной РГЛ, выполненной из известного градиентного материала, только одной оптической силой $\varphi_G(\lambda_c)$.

Действительно полагая, что РГЛ плоско- или двояковыпуклая (т.е. что $c = c_1$ при $c_2 = 0$ или $c = c_1 = -c_2$), при заданной оптической силе $\varphi_G(\lambda_c)$, используя формулы (1)–(4), можно найти кривизну c . Затем при найденной кривизне по этим же формулам можно вычислить $\varphi_G(\lambda_{\min})$ и $\varphi_G(\lambda_{\max})$.

При выбранной паре однородных оптических материалов известными в системе уравнений (5) окажутся дисперсионные параметры v_i и $v_i^{(\gamma)}$, а неизвестными — оптические силы $\varphi_i(\lambda_c)$ и $\varphi_G(\lambda_c)$. Наконец, для каждого набора оптических сил элементов и для двух воздушных промежутков между ними, применяя формулы расчёта хода апертурного параксиального луча, можно легко получить требуемые значения высот h_i . Тот или иной выбор воздушных промежутков в разумных пределах принципиально не повлияет на конечный результат. Авторами настоящей статьи они выбирались так, чтобы сохранить продольный габарит сверхсветосильного объектива в средневолновом ИК диапазоне, описанного в статье [1].

Таким образом, для каждой пары однородных оптических материалов, компонуемых последовательно из заранее составленного каталога, в результате итерационного решения системы уравнений (5) можно получить набор оптических сил двух однородных и одной РГЛ. При этом лучшей парой однородных оптических материалов можно считать ту, которой соответствует минимальное значение $\delta = (\delta_1^2 + \delta_2^2)^{0,5}$ и наилучшее соотношение оптических сил всех трёх элементов схемы.

Оптическая схема, состоящая из бесконечно тонкой модели РГЛ, выполненной из неоднородного материала NRLGRIN-D и двух тонких линз, выполненных из найденной лучшей пары однородных оптических материалов (AMTIR3 [7] и IIR-SF1 [8]), была использована в качестве исходной при расчёте триплета в программе ZEMAX.

РАСЧЁТ ТРИПЛЕТА С ПОВЕРХНОСТЬЮ «GRADIENT 6» И ДОСТИГНУТЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Оптическая схема триплета с РГЛ представлена на рис. 2, а его конструктивные параметры — в табл. 4 и 5. При этом все поверхности линз в этих таблицах (за исключением поверхности «GRADIENT 6») представляют собой так называемые чётные асферические поверхности, описываемые в ZEMAX уравнением

$$z(\rho) = \frac{c\rho^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + \kappa)c^2\rho^2}} + \sum_{p=2} \alpha_p \rho^{2p}, \quad (9)$$

Таблица 4. Основные конструктивные параметры объектива
Table 4. The main design parameters of the objective

Номер поверхности	Радиус r , мм	Толщина d , мм	Оптический материал
ПП*	∞	∞	—
1	51,718	20	AMTIR3
2	35,728	2,633	—
АД**	∞	3,694	—
3	43,403	5,501	NRLGRIN-D
4	-66,869	2,249	—
5	-26,853	7,637	IIR-SF1
6	-47,159	25,045	—
ПИ***	∞	0	—

* ПП — плоскость предмета;

** АД — апертурная диафрагма диаметром 44,89 мм;

*** ПИ — плоскость изображения.

Таблица 5. Дополнительные характеристики поверхностей объектива
Table 5. Additional characteristics of objective surfaces

Номер поверхности	Коническая постоянная k	Коэффициент асферичности			
		α_2 , мм ⁻³	α_3 , мм ⁻⁵	α_4 , мм ⁻⁷	α_5 , мм ⁻⁹
1	—	$-7,1797 \times 10^{-6}$	$-7,1444 \times 10^{-9}$	$1,76125 \times 10^{-12}$	$-1,3092 \times 10^{-14}$
2	—	$-2,8349 \times 10^{-5}$	$-1,1838 \times 10^{-8}$	$5,0370 \times 10^{-11}$	$-3,5901 \times 10^{-14}$
3	-5,1343	—	—	—	—
4	—	$2,0506 \times 10^{-5}$	$7,6468 \times 10^{-9}$	$-8,3906 \times 10^{-11}$	$8,1984 \times 10^{-14}$
5	—	$8,1555 \times 10^{-5}$	$1,9424 \times 10^{-7}$	$3,4570 \times 10^{-10}$	$-2,1734 \times 10^{-13}$
6	—	$3,9662 \times 10^{-5}$	$-3,7462 \times 10^{-8}$	$-1,1791 \times 10^{-10}$	$5,5409 \times 10^{-13}$

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 её вершине; k — коническая постоянная; α_p — коэффициенты асферичности поверхности.

Как и у прототипа, рассчитанного на средневолновый ИК диапазон, у этого триплета заднее фокусное расстояние $f' = 40$ мм, а угловое поле зрения $2\omega = 19,5^\circ$. При числовой апертуре в пространстве изображений, равной 0,45 ($K = 0,98$), в двойном ИК диапазоне (3,5–5 и 8–11,9 мкм) он формирует изображение по всему полю с контрастом $T \geq 0,53$ на пространственной частоте $N_N = 30$ мм⁻¹.

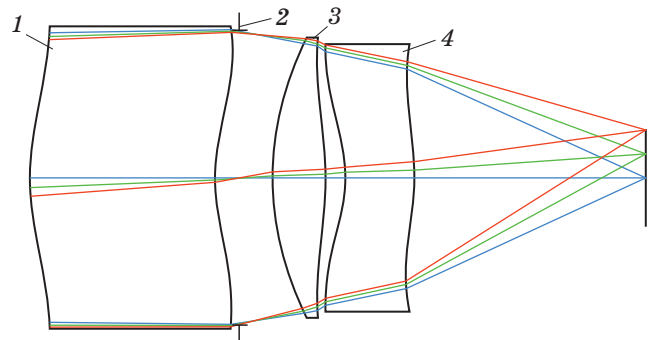


Рис. 2. Оптическая схема триплета с РГЛ: 1, 4 — однородные линзы; 2 — апертурная диафрагма; 3 — РГЛ

Fig. 2. Lay out of the triplet with GRIN lens: 1, 4 — homogeneous lenses; 2 — aperture stop; 3 — GRIN lens

Здесь напомним, что в качестве критерия оценки предельной разрешающей способности матричных фотоприёмников наиболее часто используют частоту Найквиста, связанную с шагом матрицы Λ (т.е. пространственным периодом следования элементов матрицы, практически совпадающим с их размером) соотношением $N_N = 1/(2\Lambda)$. И $N_N = 30 \text{ мм}^{-1}$ — это частота Найквиста коммерчески доступных сегодня неохлаждаемых микроболометров, например, Bird 640 Ceramic Packaging BB Wide-Band [9] с форматом 640×480 или АСТРОН-64017-2 [10] с форматом 640×512 и шагом матрицы $\Lambda = 17 \text{ мкм}$.

В то же время, как показано в [11], искажения дискретизации отклика матричного фотоприёмника начинают негативно сказываться на качестве изображения при пространственных частотах $N \geq 0,5N_N = 1/(4\Lambda)$. У вышеприведённых неохлаждаемых микроболометров $N = 15 \text{ мм}^{-1}$, а контраст на этой пространственной частоте у ИК триплета с РГЛ в угловом поле зрения $2\omega \leq 19,5^\circ$ превышает 0,74.

В перспективе не исключается принципиальная возможность достижения у неохлаждаемых микроболометров шага матрицы порядка 6 мкм. Очевидно, что представленный ИК триплет обеспечит требуемое качество изображения даже и для таких фотоприёмников. Действительно, у этого триплета в угловом поле зрения $2\omega \leq 19,5^\circ$ на пространственной частоте $N = 42 \text{ мм}^{-1}$ (соответствующей шагу матрицы $\Lambda = 6 \text{ мкм}$) контраст не опускается ниже 0,41.

Модуль дисторсии представленного триплета не превышает 0,4%, продольный хроматизм – 24,95 мкм при дифракционном пределе 30,6 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка специальной серии марок бескислородных стёкол, прозрачных в широком диапазоне ИК спектра, открыла возможность создания на их основе композитных градиентных материалов методом ламинирования, заключающимся во взаимной термической диффузии слоёв при спекании многокомпонентной заготовки. Диапазон оптических ха-

рактеристик и количество марок новых бескислородных стёкол позволяют с достаточной гибкостью варьировать значением градиента показателя преломления формируемого неоднородного материала градиентной линзы. Это создаёт предпосылки к расширению элементной базы проектирования новых и совершенствованию существующих оптико-электронных систем.

В настоящей статье представлена процедура моделирования коаксиально-ламинированной РГЛ бесконечно тонким элементом. Эта процедура позволила получить у тонкой модели градиентной линзы такие же оптическую силу и продольный хроматизм, как у толстого прототипа.

Комбинация марок новых халькогенидных стёкол для композитного материала этой линзы была выбрана исходя из условия достижения требуемого распределения показателя преломления. Само это распределение было получено при проектировании триплета среднего (3–5 мкм) ИК диапазона.

Из условия апохроматизации оптической схемы, включающей бесконечно тонкую модель толстой РГЛ совместно с двумя тонкими однородными линзами, разделёнными воздушными промежутками, были получены наилучшие комбинация оптических материалов однородных линз (AMTIR3 и IIR-SF1) и соотношение оптических сил всех элементов схемы. Это решение стало исходным при последующем переходе к реальным толщинам и оптимизации в программе оптического проектирования ZEMAX.

В итоге был получен объектив с задним фокусным расстоянием 40 мм, имеющий числовую апертуру в пространстве изображений 0,45 ($K = 0,98$) и рассчитанный на работу с двухдиапазонным ИК излучением (3,5–5 и 8–11,9 мкм). В пределах углового поля зрения $19,5^\circ$ этот объектив формирует изображение с контрастом 0,54 при пространственной частоте 30 мм^{-1} . Модуль дисторсии не превышает 0,4%. Достигнутые оптические характеристики позволяют эффективно использовать данный ИК объектив с микроболометрами, имеющими диагональ матрицы не более 14 мм при шаге не менее 6 мкм.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 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 // Journal of Optical Technology. 2024. V. 91. № 3. (in print)
2. 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>
3. 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>
4. Gibson D., Bayya S., Nuygen V., Myers J., Fleet E. et al. Diffusion-based gradient index optics for infrared imaging // Optical Engineering, 2020. V. 59. № 11. P. 112604. <https://doi.org/10.1117/1.OE.59.11.112604>
5. Электронный ресурс URL: <https://www.zemax.com/> (ZEMAX: Software for optical system design).
6. Greisukh G.I., Bobrov S.T., Stepanov S.A. Optics of diffractive and gradient-index elements and systems. Bellingham: SPIE Press, 1997. 414 p. ISBN: 978-0819424518.
7. Электронный ресурс URL: <https://www.amorphousmaterials.com/> (Amorphous Materials Inc.)
8. Электронный ресурс URL: <https://www.isuzuglass.com/development/> (Isuzu Chalcogenide glass).
9. Электронный ресурс URL: https://www.scd.co.il/wp-content/uploads/2019/07/Bird640-17-ceramic_brochure_v3_PRINT.pdf (SemiConductor Devices).
10. Электронный ресурс URL: <https://astrohn.ru/product/astrohn-64017-2/> (АСТРОН-64017-2. Микроболометрический матричный детектор).
11. Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Казин С.В., Степанов С.А. Отклик матричного фотоприемника на составляющие оптического сигнала с различными пространственными частотами // Квантовая электроника. 2017. Т. 47. № 1. С. 71–74. <https://doi.org/10.1070/QEL16256>
Greisukh G.I., Ezhov E.G., Kazin S.V., Stepanov S.A. Response of a matrix photodetector into components of an optical signal with different spatial frequencies // Quantum electronics. 2017. V. 47. № 1. P. 71–74. <https://doi.org/10.1070/QEL16256>

АВТОРЫ

Григорий Исаевич Грейсух — доктор техн. наук, профессор, 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 — канд. физ.-мат. наук, ведущий инженер-конструктор, Красногорский завод им. С.А. Зверева, Красногорск Московской обл., 143402, Россия; Scopus ID: 36463827600; <https://orcid.org/0000-0001-7451-589X>; i.a.levin@mail.ru

Евгений Григорьевич Ежов — доктор физ.-мат. наук, профессор, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, 400028, Россия; Scopus ID: 35619370900; <https://orcid.org/0000-0001-9281-5394>; subscribing_2002@mail.ru

AUTHORS

Grigory I. Greisukh — Doctor of Technical Sciences, Professor, Penza State University of Architecture and Construction, Penza, 400028, Russia; Scopus ID: 6603957506; <https://orcid.org/0000-0003-4339-9245>; grey@pguas.ru

Ilya A. Levin — PhD in Physics and Mathematics, Leading Design Engineer, Krasnogorsk Plant named after S.A. Zverev, Krasnogorsk, Moscow region, 143402, Russia; Scopus ID: 36463827600; <https://orcid.org/0000-0001-7451-589X>; i.a.levin@mail.ru

Evgeniy G. Ezhov — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Penza State University of Architecture and Construction, Penza, 400028, Russia; Scopus ID: 35619370900; <https://orcid.org/0000-0001-9281-5394>; subscribing_2002@mail.ru

Статья поступила в редакцию 08.02.2024
Одобрена после рецензирования 26.04.2024
Принята к печати 30.08.2024

The article was submitted to the editorial office 08.02.2024
Approved after review 26.04.2024
Accepted for publication 30.08.2024