

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-03-5-13

УДК 535.326, 535.317.9, 681.7.067.222.2

Сверхсветосильный тепловизионный триплет с градиентной линзой: этапы моделирования композитного градиентного материала и потенциальные возможности оптической схемы

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 Московской обл., 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. Модель ламинируемого композитного градиентного материала и сверхсветосильный тепловизионный объектив с радиально-градиентной линзой из такого материала. **Цель работы.** Представить этапы моделирования композитного материала для радиально-градиентной линзы и продемонстрировать потенциальные возможности тепловизионного триплета с такой линзой, рассчитанного на работу с неохлаждаемым приемником инфракрасного излучения. **Метод исследования.** Теоретический анализ, компьютерное моделирование и оптимизация с использованием программы оптического проектирования ZEMAX. **Основные результаты.** Продемонстрированы этапы моделирования на основе ряда новых бескислородных стекол композитного материала для градиентной линзы с радиальным распределением показателя преломления, значения оптических постоянных которой являются результатом расчета и оптимизации конструктивных параметров проектируемого объектива. Представлены результаты расчета трехлинзового инфракрасного объектива с задним фокусным расстоянием 40 мм, угловым полем $19,5^\circ$ и диафрагменным числом 0,84, который в рабочем спектральном диапазоне 3–5 мкм формирует изображение с контрастом 0,6 на пространственной частоте 30 мм^{-1} . Модуль дисторсии не превышает 1,5%. Одна из трех линз этого объектива выполнена из композитного оптического материала с радиальным распределением градиента показателя преломления. Полученные значения оптических характеристик позволяют эффективно использовать данный объектив с микроболометрами, имеющими диагональ матрицы не более 14 мм при шаге не менее 6 мкм. **Практическая значимость.** Результаты настоящего исследования открывают возможность создания на основе уже разработанной специальной серии бескислородных стекол радиально-градиентных линз с такими распределениями показателя преломления, которые позволяют использовать их для достижения высоких оптических характеристик у простых по конструкции инфракрасных объективов.

Ключевые слова: сверхсветосильный инфракрасный объектив, бескислородные инфракрасные стекла, композитный градиентный материал, радиально-градиентная линза

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 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>

Коды OCIS: 110.2760, 110.3080, 220.3620

Ultra-high-aperture infrared triplet with grin lens: Modeling stages of composite gradient-index material and potential possibilities of the optical scheme

GRIGORY 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, Moscow region, Russia*

¹*grey@pguas.ru* <https://orcid.org/0000-0003-4339-9245>

²*i.a.levin@mail.ru* <https://orcid.org/0000-0001-7451-589X>

³*subscribing_2002@mail.ru* <https://orcid.org/0000-0001-9281-5394>

Abstract

Subject of the study. A model of laminated composite gradient-index material and an ultra-high-aperture infrared objective with a radial gradient lens made of such material. **Purpose of the study.** To present modeling stages of the composite material for a radial gradient-index lens and demonstrate the potential of an infrared imaging triplet with such a lens, designed to work with a cooled infrared radiation receiver. **The research method.** Theoretical analysis, computer modeling and optimization using the ZEMAX optical design program. **The main results.** The stages of modeling a composite material for a gradient-index lens with radial refractive index distribution are demonstrated. The lens material is assembled from a number of new chalcogenide glasses. The optical characteristics of the lens should correspond to the results of calculation and optimization of the design parameters of the projected objective. The results of calculating a three-lenses infrared objective with a rear focal length 40 mm, an angular field of view of 19.5° and an aperture number of 0.84, which in the operating spectral range 3–5 μm forms an image with a contrast of 0.6 at a spatial frequency of 30 mm⁻¹, are presented. The distortion modulus does not exceed 1.5%. One of the three infrared objective lenses is made of a composite optical material with radial refractive index distribution. The obtained values of optical performance make it possible to effectively use this objective with microbolometers having a matrix diagonal of no more than 14 mm with a step of at least 6 microns. **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: ultra-high-aperture infrared objective, chalcogenide glasses, composite gradient-index material, radial gradient lens

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 infrared triplet with grin lens: Modeling stages of composite gradient-index material and potential possibilities of the optical scheme [in Russian] // *Opticheskii Zhurnal*. 2024. V. 91. № 3. P. 5–13. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-03-5-13>

OCIS codes: 110.2760, 110.3080, 220.3620

ВВЕДЕНИЕ

Исследования в области оптического материаловедения привели к разработке специальной серии бескислородных стекол новых марок, прозрачных в широком диапазоне инфракрасного (ИК) спектра и отличающихся близкими значениями температурных коэффициентов теплового расширения, а также совместимыми профилями вязкости [1, 2]. Преимуществом данной серии стекол является возможность создания на их основе композитных градиентных материалов методом ламинирования, заключающимся во взаимной термической диффузии слоев при спекании многокомпонентной заготовки [3, 4]. Диапазон оптических характеристик и количество бескислородных стекол новых марок позволяют с достаточной гибкостью варьировать функцию распределения показателя преломления формируемого материала, что расширяет возможности коррекции аберраций. Действительно, еще в конце прошлого века всесторонний анализ аберрационных свойств одиночной радиально-градиентной линзы (РГЛ) со сферическими поверхностями и вынесенным зрачком показал, что она в принципе может быть свободна от любых четырех из пяти монохроматических аберраций третьего порядка [5–8]. Более поздние работы, содержащие результаты расчета простых по конструкции тепловизионных объективов с линзами из градиентных материалов [9–11], демонстрируют несомненную перспективность разработки и исследования потенциальных возможностей новых схемных решений, которые бы в полной мере раскрывали преимущества используемой элементной базы.

Следует отметить, что бескислородные стекла относятся к материалам, допускающим прецизионное прессование в качестве метода формообразования поверхности оптического элемента [12]. Это в совокупности с методом ламинирования открывает возможности создания градиентного материала для линз с оптимизированными под конкретное схемное решение оптическими свойствами.

Цель работы — на основе бескислородных стекол специальной серии, прозрачных в широком ИК диапазоне спектра, представить этапы моделирования композитного градиентного материала и оценить потенциально достижимые оптические характеристики простого

по конструкции сверхсветосильного объектива с градиентным элементом, рассчитанного на работу с неохлаждаемым приемником ИК излучения.

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТНОЙ РАДИАЛЬНО-ГРАДИЕНТНОЙ ЛИНЗЫ ДЛЯ ТРИПЛЕТА СРЕДНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА СПЕКТРА

В качестве оптической схемы ИК объектива выберем триплет со следующими основными характеристиками: рабочий спектральный диапазон длин волн $\Delta\lambda = 3\text{--}5$ мкм, заднее фокусное расстояние 40 мм, угловое поле $19,5^\circ$ и диафрагменное число не более 1,0. Ограничение значения диафрагменного числа обусловлено выбором неохлаждаемого микроболометра в качестве приемника ИК излучения. Данный тип приемника требует от оптической системы сверхвысоких значений относительного отверстия для уменьшения порогового значения температурной чувствительности.

Выбранная оптическая схема включает две линзы из однородного материала и одну из композитного.

В табл. 1 представлены бескислородные стекла новых марок и ряд их оптических характеристик. Коэффициенты дисперсионной формулы данных материалов приведены в работе [2].

Диапазон значений показателя преломления в представленной серии марок стекол на $\lambda = 4$ мкм может обеспечить изменение данной характеристики у композитного градиентного материала не более чем на $|\Delta n| \leq 0,785$.

При моделировании линзы из композитного оптического материала выберем радиальное направление градиента показателя преломления. На начальном этапе РГЛ представим поверхностью типа «Gradient3» в программе оптического проектирования ZEMAX [13]. Показатель преломления такой поверхности описывается выражением

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

где ρ — расстояние от оптической оси, а базовый показатель преломления n_0 и коэффициенты радиального градиента $n_1\text{--}n_3$ не зависят от длины волны.

Таблица 1. Оптические характеристики бескислородных стекол новых марок
Table 1. Optical characteristics of new series chalcogenide glasses

Марка стекла	Показатель преломления на $\lambda = 4$ мкм	Коэффициент дисперсии в $\Delta\lambda = 3-5$ мкм
NRL-01	2,3970	160,3
NRL-02	2,7045	177,3
NRL-03	2,3966	158,5
NRL-04	2,6423	204,4
NRL-05	2,4766	200,2
NRL-06	3,1716	111,8
NRL-07	2,3866	160,7
NRL-08	2,6632	189,6
NRL-09	2,4174	160,6
NRL-10	2,5262	195,4
NRL-11	2,4295	162,4
NRL-12	2,4583	164,4
NRL-13	2,4901	166,2
NRL-14	2,5194	165,1
NRL-15	2,5492	169,7
NRL-16	2,5801	170,1
NRL-17	2,6131	170,1
NRL-18	2,6441	170,6
NRL-19	2,6798	172,0
NRL-20	2,7077	171,2
NRL-21	2,7441	172,5
NRL-22	2,7779	169,6
NRL-23	2,7811	169,9
NRL-103	2,7152	185,6

Уравнение профиля показателя преломления определялось в процессе получения оптимальных значений конструктивных параметров ИК объектива. Так как поверхность «Gradient3» не имеет дисперсии, то с целью ограничения продольного хроматизма на начальном этапе осуществлялась ахроматизация триплета в заданном спектральном диапазоне выбором материалов двух однородных линз и соотношением их оптических сил.

В результате были получены следующие значения базового показателя преломления и коэффициентов радиального градиента

РГЛ: $n_0 = 2,5801$, $n_1 = -1,0225 \times 10^{-4} \text{ мм}^{-2}$, $n_2 = 5,800 \times 10^{-9} \text{ мм}^{-4}$, $n_3 = 3,000 \times 10^{-13} \text{ мм}^{-6}$. Данная РГЛ в совокупности с линзами из однородных материалов обеспечивает формирование изображения с контрастом 0,69 на пространственной частоте $N_N = 30 \text{ мм}^{-1}$ у ИК объектива с диафрагменным числом 0,84. Модуль дисторсии менее 1,8%, продольный хроматизм на крайних длинах волн рабочего спектрального диапазона без учета дисперсии РГЛ составляет 5,3 мкм.

Здесь напомним, что в качестве критерия оценки предельной разрешающей способности матричных фотоприемников 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* ВВ *Wide-Band* [14] с форматом 640×480 или АСТРОН-64017-2 [15] с форматом 640×512 и шагом матрицы $\Lambda = 17$ мкм.

На следующем этапе необходимо подобрать комбинацию бескислородных стекол, которая бы в наибольшей степени соответствовала полученному ранее распределению показателя преломления. При этом будем исходить из того, что технологический процесс коаксиального ламинирования нескольких слоев стекол, предполагающий термическую диффузию, обеспечивает сохранение значения показателя преломления стекла, используемого для данного слоя: на оси внутренней цилиндрической заготовки, на внешней цилиндрической поверхности верхнего трубчатого слоя, на цилиндрических поверхностях каждого внутреннего трубчатого слоя с радиусами, равными половине суммы радиусов его внутренней и внешней цилиндрических поверхностей.

Сопоставляя данные табл. 1 со значениями показателя преломления РГЛ, получаемыми в соответствии с уравнением (1), композитную структуру градиентного материала можно скомпоновать из бескислородных стекол следующих марок: внутренняя цилиндрическая заготовка из NRL-16, а последовательно расположенные трубчатые слои — из NRL-15, NRL-14 и NRL-13 соответственно. Рисунок 1 демонстрирует, как были получены радиусы

цилиндрических поверхностей раздела слоев и тех поверхностей каждого внутреннего трубчатого слоя, на которых расчетные значения показателя преломления поверхности «Gradient3» совпадают со значениями показателя преломления на $\lambda = 4$ мкм стекла, используемого в соответствующем слое композитного материала.

На заключительном этапе моделирования РГЛ требуется определить ее дисперсионные свойства с учетом оптических характеристик выбранных бескислородных стекол. Для этого перейдем от поверхности типа «Gradient3» к поверхности типа «Gradient6». Зависимость

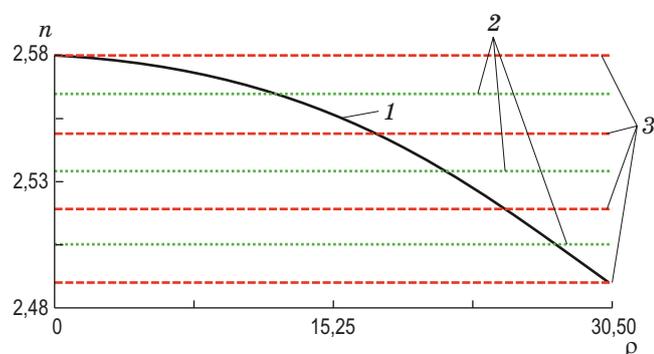


Рис. 1. Иллюстрация к компоновке структуры градиентного материала. Распределение показателя преломления поверхности «Gradient3» — 1, показатели преломления композитного материала на поверхностях раздела слоев — 2, показатели преломления стекол, используемых в соответствующем слое композитного материала — 3

Fig. 1. Illustration for a set of the gradient-index material structure. (1) Refractive index distribution of the “Gradient3” surface, (2) refractive index values of the gradient-index material at the layers interfaces, (3) refractive indices values of the glasses used for the corresponding layer of gradient-index material

показателя преломления композитного материала, описываемого данным типом поверхности, от расстояния от оптической оси определяется выражением

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

но в отличие от описания поверхности «Gradient3» каждый из коэффициентов n_i в формуле (2) является функцией длины волны

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

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

С использованием радиусов цилиндрических поверхностей, численно равных такому расстоянию от оптической оси ρ , при котором расчетное значение показателя преломления поверхности «Gradient3» совпадает со значением показателя преломления на длине волны 4 мкм стекла, используемого для соответствующего слоя композитного материала (см. рис. 1), а также значений показателя преломления каждого из используемых стекол на трех длинах волн рабочего спектрального диапазона, была составлена табл. 2.

По четырем табличным значениям показателя преломления находим коэффициенты $n_0 - n_3$ выражений (2) и (3) на каждой из трех длин волн, решая систему четырех линейных уравнений, составляемых на основе формулы (2) при $n_4(\lambda) = 0$ (см. табл. 3).

Используя формулу (3) и данные табл. 3, составляем и решаем систему трех линейных уравнений. Полученные таким образом спектральные коэффициенты $A_i - C_i$ и $D_i = 0$

Таблица 2. Исходные данные, необходимые для получения спектральных коэффициентов формулы (3)
Table 2. Initial data required to obtain the spectral coefficients of formula (3)

Марка стекла	ρ , мм	Показатель преломления стекла на λ , мкм		
		3	4	5
NRL-16	0	2,58563	2,580064	2,57634
NRL-15	17,53570	2,55459	2,549180	2,54546
NRL-14	24,80844	2,52476	2,519392	2,51556
NRL-13	30,52740	2,49524	2,490056	2,48627

Таблица 3. Промежуточные данные, необходимые для получения спектральных коэффициентов формулы (3)
Table 3. Intermediate data required to obtain the spectral coefficients of formula (3)

λ , мкм	3	4	5
n_0	2,58563	2,58006	2,57634
n_1 , мм ⁻²	-1,03159×10 ⁻⁴	-1,02200×10 ⁻⁴	-1,01709×10 ⁻⁴
n_2 , мм ⁻⁴	7,49885×10 ⁻⁹	5,59349×10 ⁻⁹	3,56796×10 ⁻⁹
n_3 , мм ⁻⁶	-9,44079×10 ⁻¹³	4,67316×10 ⁻¹³	1,99878×10 ⁻¹²

Таблица 4. Спектральные коэффициенты A_i – C_i композитного градиентного оптического материала NRLGRIN
Table 4. Spectral coefficients A_i – C_i of composite gradient-index optical material NRLGRIN

n_i	A_i	B_i	C_i
n_0	2,57788921	-1,99259920×10 ⁻¹⁰	8,58071429×10 ⁴
n_1 , мм ⁻²	-1,01168950×10 ⁻⁴	8,12850529×10 ⁻¹⁵	-1,85730653×10 ¹
n_2 , мм ⁻⁴	8,10739748×10 ⁻⁹	-1,98545889×10 ⁻¹⁶	1,06052522×10 ⁻²
n_3 , мм ⁻⁶	-1,52961165×10 ⁻¹²	1,52463100×10 ⁻¹⁹	-7,07971406×10 ⁻⁶

для каждого из параметров n_i заносим в файл GLC.DAT каталога Glasscat программы оптического проектирования ZEMAX. В табл. 4 представлены значения коэффициентов A_i – C_i . В качестве названия смоделированного композитного градиентного материала выбран NRLGRIN.

2. ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИНФРАКРАСНОГО ОБЪЕКТИВА С ПОВЕРХНОСТЬЮ «GRADIENT6» И ДОСТИГНУТЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

После внесения в файл GLC.DAT данных композитного оптического материала NRLGRIN из табл. 4 в полученном на начальном этапе схемном решении ИК триплета была проведена замена поверхности «Gradient3» на поверхность «Gradient6». В результате на $\lambda_c = 4$ мкм как диаграммы рассеяния лучей, так и график коэффициента передачи модуляции остались практически без изменений. Это свидетельствовало о совпадении на этой длине волны радиального распределения показателя преломления поверхности «Gradient3» и композитного градиентного материала NRLGRIN.

В то же время в среднем ИК спектральном диапазоне ($3 \leq \lambda \leq 5$ мкм) имевшаяся ранее ахроматизация триплета была нарушена. Действительно, как говорилось ранее, у систе-

мы с поверхностью «Gradient3» продольный хроматизм на крайних длинах волн рабочего спектрального диапазона составлял 5,3 мкм, а вторичный спектр — 17,8 мкм при дифракционном пределе 11,3 мкм. После замены поверхности «Gradient3» на «Gradient6» с композитным градиентным материалом NRLGRIN разница задних фокальных отрезков на краях спектрального диапазона увеличилась до 107 мкм. Последующей оптимизацией по всем конструктивным параметрам триплета, за исключением относящихся к закону распределения показателя преломления РГЛ (т.е. поверхности «Gradient6»), ахроматизация была восстановлена, но вторичный спектр увеличился до 50,22 мкм. Одновременно возрос и сферохроматизм на краю зрачка (с $1,12\lambda_c$ до $2,4\lambda_c$). В итоге при диафрагменном числе 0,84 контраст изображения на пространственной частоте 30 мм⁻¹ снизился с 0,69 до 0,6. Модуль дисторсии составил 1,5%.

Оптическая схема триплета с РГЛ представлена на рис. 2, а его конструктивные параметры — в табл. 5 и 6. При этом все поверхности линз в этих таблицах представляют собой так называемые четные асферические поверхности, описываемые в ZEMAX уравнением

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

где $z(\rho)$ — координата точки поверхности, отстоящей от оптической оси на расстоянии ρ в системе координат, плоскость XOY которой касается вершины этой поверхности, $c = 1/r$ — кривизна поверхности в ее вершине, k — коническая постоянная, α_p — коэффициенты асферичности поверхности.

Исходя из рекомендации по согласованию разрешающих способностей объектива и фотоприемника, обеспечивающих минимизацию искажений, обусловленных дискретностью фотоприемника, представленных в работе [16],

Таблица 5. Основные конструктивные параметры объектива

Table 5. The main design parameters of the objective

Номер поверхности	Радиус r , мм	Толщина, мм	Оптический материал
ПП*	∞	∞	—
1	21,501	9,644	SRF2
2	14,637	14,748	—
АД**	∞	0	—
3	23,041	7,997	NRLGRIN
4	22,478	15,012	—
5	51,218	18,474	GASIR1
6	411,440	17,953	—
ПИ***	∞	0	—

Примечание. *ПП — плоскость предмета, **АД — апертурная диафрагма диаметром 44,89 мм, ***ПИ — плоскость изображения.

Note. *ПП is object plane, **АД is aperture diaphragm with a diameter of 44.89 mm, ***ПИ is image plane.

достигнутый уровень контраста изображения, формируемого ИК триплетом с РГЛ, позволяет его эффективно использовать с матричными приемниками излучения, у которых шаг матрицы не менее 6 мкм.

Действительно, как показано в работе [16], искажения дискретизации отклика матричного фотоприемника начинают негативно сказываться на качестве изображения при пространственных частотах $N \geq 0,5N_N = 1/(4\lambda)$. У представленного выше триплета на пространственной частоте 42 мм^{-1} (соответствующей шагу матрицы 6 мкм) контраст не опускается ниже 0,45 в угловом поле $2\omega \leq 19,5^\circ$. Что же касается коммерчески доступных сегодня неохлаждаемых микроболометров [14] и [15], то у них $N = 15 \text{ мм}^{-1}$, а контраст на этой

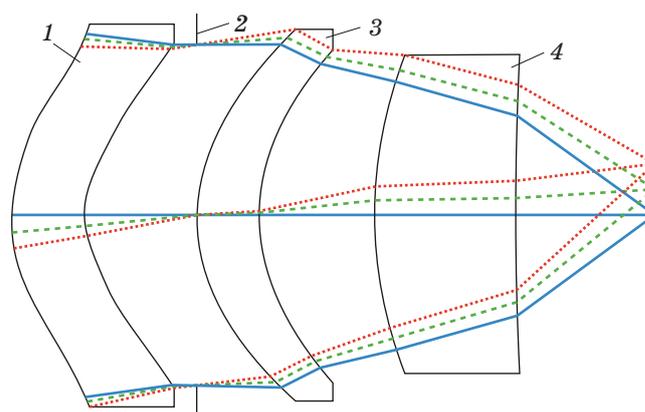


Рис. 2. Оптическая схема триплета с РГЛ. 1, 4 — однородные линзы, 2 — апертурная диафрагма, 3 — РГЛ

Fig. 2. Optical scheme of the triplet with radial gradient-index lens. (1), (4) Homogeneous lenses, (2) aperture diaphragm, (3) radial gradient-index lens

Таблица 6. Дополнительные характеристики поверхностей объектива

Table 6. Additional characteristics of objective's surfaces

Номер поверхности	Коническая постоянная	Коэффициент асферичности			
		$\alpha_2, \text{мм}^{-3}$	$\alpha_3, \text{мм}^{-5}$	$\alpha_4, \text{мм}^{-7}$	$\alpha_5, \text{мм}^{-9}$
1	-1,935	$1,805 \times 10^{-6}$	$-3,859 \times 10^{-9}$	$-4,868 \times 10^{-12}$	$-2,608 \times 10^{-15}$
2	-1,568	$-6,729 \times 10^{-6}$	$1,175 \times 10^{-8}$	$-4,470 \times 10^{-11}$	$2,765 \times 10^{-14}$
3	-1,148	—	—	—	—
4	-1,569	—	—	—	—
5	0,038	$-1,920 \times 10^{-6}$	$8,935 \times 10^{-10}$	$2,669 \times 10^{-12}$	$-1,263 \times 10^{-14}$
6	23,9553	$1,849 \times 10^{-6}$	$8,837 \times 10^{-9}$	$-1,917 \times 10^{-11}$	$-2,414 \times 10^{-14}$

пространственной частоте изображения, формируемого представленным ИК триплетом с РГЛ, превышает 0,78.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современный уровень технологий создания градиентных материалов в совокупности с успехами в области оптического материаловедения создают предпосылки к расширению элементной базы проектирования новых и совершенствования существующих оптико-электронных систем. Так, в частности, разработка бескислородных стекол специальной серии марок, прозрачных в широком диапазоне ИК спектра, открыла возможности производства градиентных линз с требуемыми в конкретном схемном решении оптическими свойствами.

В настоящей статье продемонстрированы этапы моделирования на основе ряда новых

бескислородных стекол композитного градиентного материала для РГЛ, значения оптических постоянных которой являются результатом расчета и оптимизации конструктивных параметров проектируемого объектива.

Проведен расчет трехлинзового ИК объектива с задним фокусным расстоянием 40 мм, угловым полем $19,5^\circ$ и диафрагменным числом 0,84, который в рабочем спектральном диапазоне 3–5 мкм формирует изображение с контрастом 0,6 на пространственной частоте 30 мм^{-1} . Модуль дисторсии не превышает 1,5%. Одна из трех линз ИК объектива выполнена из композитного оптического материала с радиальным распределением градиента показателя преломления. Полученные значения оптических характеристик позволяют эффективно использовать данный ИК объектив с микроболометрами, имеющими диагональ матрицы не более 14 мм при шаге не менее 6 мкм.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 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>
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. 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>
4. Gibson D., Bayya S., Nguyen V., Sanghera J., Kotov M., Drake G. GRIN optics for multispectral infrared imaging // Proc. SPIE. 2015. V. 9451. P. 94511P (7 p). <https://doi.org/10.1117/12.2177136>
5. Moore D.T. Design of singlets with continuously varying indices of refraction // JOSA. 1971. V. 61. № 7. P. 886–894. <https://doi.org/10.1364/JOSA.61.000886>
6. Moore D.T., Salvage R.T. Radial gradient-index lenses with zero Petzval aberration // Applied Optics. 1980. V. 19. № 7. P. 1081–1086. <https://doi.org/10.1364/AO.19.001081>
7. Грейсух Г.И., Степанов С.А. Возможности коррекции монохроматических аберраций градиентных линз с радиальным распределением показателя преломления // Опт. и спектр. 1995. Т. 79. № 1. С. 173–176.
8. 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
9. Кулакова Н.А., Насыров А.Р., Несмелова И.М. Современные тенденции создания оптических систем для инфракрасной области спектра // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 5. С. 36–44.
10. McCarthy P.W. Gradient-index materials, design, and metrology for broadband imaging systems // PhD

REFERENCES

1. 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>
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. 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>
4. Gibson D., Bayya S., Nguyen V., Sanghera J., Kotov M., Drake G. GRIN optics for multispectral infrared imaging // Proc. SPIE. 2015. V. 9451. P. 94511P (7 p). <https://doi.org/10.1117/12.2177136>
5. Moore D.T. Design of singlets with continuously varying indices of refraction // JOSA. 1971. V. 61. № 7. P. 886–894. <https://doi.org/10.1364/JOSA.61.000886>
6. Moore D.T., Salvage R.T. Radial gradient-index lenses with zero Petzval aberration // Applied Optics. 1980. V. 19. № 7. P. 1081–1086. <https://doi.org/10.1364/AO.19.001081>
7. Greisukh G.I., Stepanov S.A. Possibilities for correcting monochromatic aberrations of gradient lenses with a radial distribution of the refractive index // Optics and spectroscopy. 1995. V. 79. № 1. P. 173–176.
8. 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
9. Kulakova N.A., Nasyrov A.R., Nesmelova I.M. Current trends in creating optical systems for the IR region // J. Opt. Technol. 2010. V.77. № 5. P. 324–330. <https://doi.org/10.1364/JOT.77.000324>
10. McCarthy P.W. Gradient-index materials, design, and metrology for broadband imaging systems // PhD

- (Optics) thesis. Rochester: University of Rochester, 2015. 219 p.
11. Yee A.J. Mid-wave and long-wave infrared gradient-index optics: Metrology, design, and athermalization // PhD (Optics) thesis. Rochester: University of Rochester, 2018. 164 p.
 12. Schaub M., Schwiegerling J., Fest E.C., Symmons A., Shepard R.H. Molded optics design and manufacture. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011. 260 p. ISBN: 978-1-4398-3256-1
 13. ZEMAX [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.zemax.com/pages/opticstudio/>
 14. SemiConductor Devices. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.scd.co.il/wp-content/uploads/2019/07/Bird640-17-ceramic_brochure_v3_PRINT.pdf (дата обращения 28.06.2022).
 15. АСТРОН-64017-2. Микроболометрический матричный детектор. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://astrohn.ru/product/astrohn-64017-2/> (дата обращения 15.04.2023).
 16. Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Казин С.В., Степанов С.А. Отклик матричного фотоприемника на составляющие оптического сигнала с различными пространственными частотами // Квант. электрон. 2017. Т. 47. № 1. С. 71–74. <https://doi.org/10.1070/QEL16256>
- (Optics) thesis. Rochester: University of Rochester, 2015. 219 p.
11. Yee A.J. Mid-wave and long-wave infrared gradient-index optics: Metrology, design, and athermalization // PhD (Optics) thesis. Rochester: University of Rochester, 2018. 164 p.
 12. Schaub M., Schwiegerling J., Fest E.C., Symmons A., Shepard R.H. Molded optics design and manufacture. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011. 260 p. ISBN: 978-1-4398-3256-1
 13. ZEMAX [Electronic Resource]. Access Mode: <http://www.zemax.com/pages/opticstudio/>
 14. SemiConductor [Electronic Resource]. Access Mode: https://www.scd.co.il/wp-content/uploads/2019/07/Bird640-17-ceramic_brochure_v3_PRINT.pdf (accessed on 28 June 2022).
 15. АСТРОН-64017-2. Microbolometer Matrix Detector. [Electronic Resource]. Access Mode: <https://astrohn.ru/product/astrohn-64017-2/> (accessed on 15 April 2023).
 16. 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 технических 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 — кандидат физико-математических 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 физико-математических 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

Статья поступила в редакцию 23.10.2023
Одобрена после рецензирования 22.11.2023
Принята к печати 28.01.2023

AUTHORS

Grigory I. Greisukh — Dr. Sci. (Engineering), 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 (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 — Dr. Sci. (Physics and Mathematics), 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

The article was submitted to the editorial office 23.10.2023
Approved after review 22.11.2023
Accepted for publication 28.01.2023