

## Коррекция хроматизма двухдиапазонных ИК-вариообъективов

Г.И. Грейсух<sup>1</sup>, Е.Г. Ежов<sup>1</sup>, А.И. Антонов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 440028, Пенза, Россия

### Аннотация

На примере простого по конструкции средне- и длинноволнового двухдиапазонного инфракрасного вариообъектива, состоящего из трёх двухлинзовых компонентов, выполненных из материалов SILICON и GERMANIUM, продемонстрирована возможность снижения хроматических и монохроматических aberrаций до уровня, обеспечивающего достаточно высокое качество формируемого изображения на пространственных частотах до 25 пар линий/мм.

В качестве одного из возможных путей модификации вариообъектива предложено на плоской поверхности рефракционной линзы, ближайшей к апертурной диафрагме, разместить двухслойную двухрельефную дифракционную микроструктуру.

Эффективность перехода к рефракционно-дифракционной схеме подтверждена результатами расчёта и оптимизации вариообъектива, двухлинзовые компоненты которого выполнены из материала SILICON и халькогенидного стекла марки IRG26.

**Ключевые слова:** двухдиапазонное ИК-излучение, хроматизм, двухлинзовый компонент, рефракционный и рефракционно-дифракционный вариообъектив.

**Цитирование:** Грейсух, Г.И. Коррекция хроматизма двухдиапазонных ИК-вариообъективов / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, А.И. Антонов // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 2. – С. 177-182. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-623.

**Citation:** Greisukh GI, Ezhov EG, Antonov AI. Correction of chromatism of dual-infrared zoom lenses. Computer Optics 2020; 44(2): 177-182. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-623.

### Введение

Одной из актуальных задач, которая решается с помощью тепловизоров и приборов ночного видения различного назначения, является распознавание одновременно наблюдаемых объектов, имеющих близкие температуры [1]. Возможности такого распознавания существенно расширились благодаря созданию двухдиапазонных инфракрасных (ИК) фотоприёмных матриц, способных отдельно воспринимать и обрабатывать средневолновые ( $3,7 \leq \lambda \leq 5$  мкм) и длинноволновые ( $8 \leq \lambda \leq 11$  мкм) ИК-изображения, формируемые объективом в общей плоскости фокусировки [2–4].

Очевидно, что возможность непрерывного изменения масштаба изображения на такой фотоприёмной матрице является дополнительным фактором, существенно облегчающим распознавание объектов с близкими температурами. Это и обуславливает всё возрастающий интерес к двухдиапазонным ИК-вариообъективам (см., например, [4]).

В работе [5] предложена методика выбора оптических материалов двухлинзовых компонентов, позволяющая достичь высокой степени коррекции хроматизма и монохроматических aberrаций у простейшего вариообъектива, рассчитанного на средний ИК-диапазон и состоящего всего лишь из трёх таких компонентов. В соответствии с этой методикой пары оптических материалов оцениваются, в частности, по возможности достижения у тонкого двухлинзового компонента, выполненного из выбранной пары материалов той или иной степени апохроматизации. В ка-

честве оценочной функции предложено использовать выражение

$$M = \left| \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{v_2 - v_1} \right|, \quad (1)$$

где  $v_i$  и  $\gamma_i$  – коэффициенты и относительные частные дисперсии материалов линз, вычисленные для выбранного спектрального диапазона:

$$v = (n_{\bar{\lambda}} - 1) / (n_{\lambda_{\min}} - n_{\lambda_{\max}}), \quad (2)$$

$$\gamma = (n_{\lambda_{\min}} - n_{\bar{\lambda}}) / (n_{\lambda_{\min}} - n_{\lambda_{\max}}).$$

Здесь  $n_{\bar{\lambda}}$ ,  $n_{\lambda_{\min}}$  и  $n_{\lambda_{\max}}$  – значения показателя преломления оптического материала на центральной и крайних длинах волн соответственно.

В табл. 1 приведены показатели преломления и коэффициенты дисперсии ряда технологичных и коммерчески доступных сегодня оптических материалов, прозрачных в двойном ИК-диапазоне. Эти характеристики материалов рассчитаны при  $\lambda_{\min} = 3,7$  мкм,  $\bar{\lambda} = 7,35$  мкм и  $\lambda_{\max} = 11$  мкм по дисперсионным формулам каталога «INFRARED» программы оптического проектирования ZEMAX [6] и работ [7, 8].

Использование методики работы [5] для выбора оптических материалов двухлинзовых компонентов, предназначенных для работы с двухдиапазонным ИК-излучением, показало, что и в этом случае так же, как и для излучения среднего ИК-диапазона, оптимальной парой материалов, способной обеспечить практически строгую апохроматизацию двухлинзового компонента, является пара SILICON–GERMANIUM (см. табл. 1).

Поэтому ниже представлены результаты оценки предельно достижимых оптических характеристик простейшего рефракционного вариообъектива, рассчитанного на спектральный диапазон, включающий как средневолновое, так и длинноволновое ИК-излучение, и состоящего из трёх двухлинзовых компонентов, выполненных именно из этих оптических материалов.

Табл. 1. Оптические материалы и их основные характеристики

№	Марка	$n_d$	$\nu$	$\gamma$
1	BAF2	1,4323879	6,028805	0,3593
2	AGCL	1,9908115	39,57310	0,3935
3	ZNS BROAD	2,2288047	18,02514	0,3714
4	ZnSe	2,4202859	41,36632	0,4091
5	GASIR1	2,5014890	74,84132	0,4842
6	AMTIR1	2,5053125	68,92580	0,4686
7	AMTIR3	2,6104524	62,37321	0,4635
8	IRG26	2,7847888	84,90865	0,5446
9	SILICON	3,4189856	259,8394	0,8415
10	GERMANIUM	4,0079078	18,02514	0,8311

**1. Двухдиапазонный рефракционный ИК-вариообъектив**

Пересчёт описанного в работе [5] вариообъектива на расширенный спектральный диапазон ( $3,7 \leq \lambda \leq 11$  мкм) и его последующая оптимизация позволили практически сохранить достигнутое ранее (только для средневолновой части ИК-диапазона) разрешение при одновременном увеличении светосилы во всех конфигурациях, но при этом число асферических поверхностей пришлось увеличить с шести до восьми.

Табл. 2. Основные конструктивные параметры рефракционного вариообъектива

Номер поверхности	Радиус $r$ , мм	Толщина $d$ , мм	Оптический материал
ПП*	$\infty$	$\infty$	–
1	43,299	10	SILICON
2	31,843	0,2	–
3	30,771	10	GERMANIUM
4	24,451	Изменяемая $d_4$	–
АД**	$\infty$	0,5	–
5	35,230	9,72	SILICON
6	238,166	0,55	–
7	484,971	8,9	GERMANIUM
8	43,182	Изменяемая $d_8$	–
9	25,896	5	SILICON
10	29,786	3,8	–
11	-284,060	10	GERMANIUM
12	-51,831	Изменяемая $d_{12}$	–
ПИ***	$\infty$	0	–

\* ПП – плоскость предмета;  
 \*\* АД – апертурная диафрагма;  
 \*\*\* ПИ – плоскость изображения.

Оптическая схема оптимизированного объектива представлена на рис. 1. При зуммировании отрицательный фронтальный компонент неподвижен относительно плоскости изображения, а оба последующих положительных компонента подвижны. Апертурная диафрагма фиксированного диаметра (23,3 мм) пере-

мещается вместе с первым положительным компонентом. Расстояние от вершинной касательной плоскости фронтальной линзы до плоскости изображения равно 121,5 мм. Фокусное расстояние, угловое поле в пространстве предметов и диафрагменное число вариообъектива в короткофокусной, промежуточной и длиннофокусной конфигурациях соответственно равны  $f'_1 = 35$  мм,  $2\omega_1 = 29,86^\circ$ ,  $K_1 = 1,3$ ;  $f'_2 = 54$  мм,  $2\omega_2 = 19^\circ$ ,  $K_2 = 1,81$ ;  $f'_3 = 84$  мм,  $2\omega_3 = 12,41^\circ$ ,  $K_3 = 2,52$ . Конструктивные параметры и оптические характеристики объектива сведены в табл. 2–4. Его преломляющие поверхности с номерами 2, 6, 7, 10 – сферические, а остальные – асферические, задаваемые в Zemax уравнением чётной асферической поверхности [6, 9].

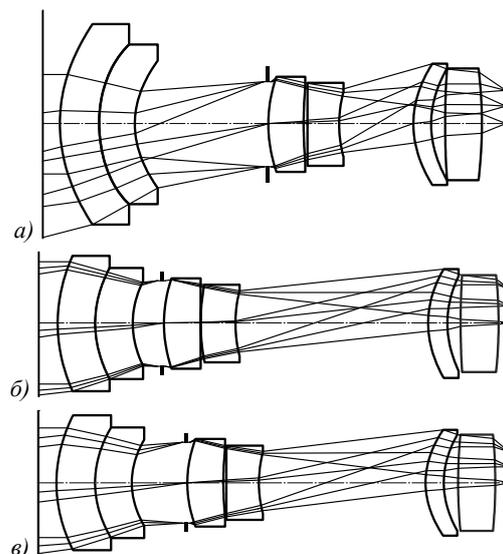


Рис. 1. Оптическая схема двухдиапазонного рефракционного ИК-вариообъектива: (а) короткофокусная конфигурация, соответствующая  $f'_1 = 35$  мм; (б) промежуточная конфигурация, соответствующая  $f'_2 = 54$  мм; (в) длиннофокусная конфигурация, соответствующая  $f'_3 = 84$  мм

Оптические характеристики, представленные в табл. 4, получены в предположении равенства весовых коэффициентов всех длин волн рабочего спектрального диапазона ( $3,7 \leq \lambda \leq 11$  мкм). Из этой таблицы следует, что остаточные хроматизм положения  $\Delta s'_F$  и хроматизм увеличения  $\Delta y'$  во всех конфигурациях существенно меньше допусков, ограниченных дифракцией, в то время как хроматическая разность волновой сферической aberrации  $\Delta W_S/\lambda$  в двух конфигурациях превышает четвертьволновый допуск, установленный Рэлеем, примерно в два раза. Наконец, близость значений дифракционно-ограниченной частотно-контрастной характеристикой (ЧКХ) и минимальных значений ЧКХ, оцененных по меридиональным и сагиттальным составляющим в пределах всего поля зрения, свидетельствует о достаточно высокой степени коррекции aberrаций и вполне приемлемом качестве формируемого изображения во всех конфигурациях.

Табл. 3. Дополнительные характеристики асферических поверхностей рефракционного вариообъектива

Номер поверхности	Коэффициент асферичности при конической постоянной $k=0$				
	$\alpha_2, \text{мм}^{-3}$	$\alpha_3, \text{мм}^{-5}$	$\alpha_4, \text{мм}^{-7}$	$\alpha_5, \text{мм}^{-9}$	$\alpha_6, \text{мм}^{-11}$
1	$-8,051 \cdot 10^{-7}$	$-1,109 \cdot 10^{-9}$	$-8,844 \cdot 10^{-13}$	$4,243 \cdot 10^{-15}$	$-2,885 \cdot 10^{-18}$
3	$-9,304 \cdot 10^{-7}$	$-1,003 \cdot 10^{-9}$	$1,086 \cdot 10^{-11}$	$-6,081 \cdot 10^{-14}$	$6,765 \cdot 10^{-17}$
4	$-7,536 \cdot 10^{-6}$	$-9,327 \cdot 10^{-9}$	$-1,897 \cdot 10^{-11}$	$-4,392 \cdot 10^{-14}$	$2,075 \cdot 10^{-16}$
5	$2,125 \cdot 10^{-6}$	$9,263 \cdot 10^{-9}$	$-7,707 \cdot 10^{-11}$	$4,250 \cdot 10^{-13}$	$-8,486 \cdot 10^{-16}$
8	$1,148 \cdot 10^{-5}$	$5,570 \cdot 10^{-8}$	$-5,393 \cdot 10^{-10}$	$4,913 \cdot 10^{-12}$	$-1,506 \cdot 10^{-14}$
9	$-1,268 \cdot 10^{-5}$	$6,827 \cdot 10^{-8}$	$-3,518 \cdot 10^{-10}$	$1,367 \cdot 10^{-12}$	$-2,591 \cdot 10^{-15}$
11	$5,497 \cdot 10^{-5}$	$-3,311 \cdot 10^{-7}$	$5,808 \cdot 10^{-10}$	$1,377 \cdot 10^{-12}$	$-3,241 \cdot 10^{-15}$
12	$7,039 \cdot 10^{-5}$	$-3,571 \cdot 10^{-7}$	$1,415 \cdot 10^{-11}$	$6,519 \cdot 10^{-12}$	$-1,534 \cdot 10^{-14}$

Табл. 4. Параметры рефракционного вариообъектива, изменяемые при зуммировании

Параметр	Номер конфигурации		
	1	2	3
Толщина $d_4$ , мм	36,120	21,925	7,992
Толщина $d_8$ , мм	20,276	36,146	51,913
Толщина $d_{12}$ , мм	6,440	4,760	3,003
$\Delta s'_f$ , мкм (в скобках приведён допуск, ограниченный дифракцией)	4 (50)	13 (97)	7 (188)
$\Delta y'$ , мкм (в скобках приведён допуск, ограниченный дифракцией)	2,4 (14)	4,6 (18)	3,4 (23)
$\Delta W_s/\lambda$	0,47	0,53	0,21
Значения дифракционно-ограниченной полихроматической частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) на пространственной частоте $25 \text{ мм}^{-1}$	0,69	0,58	0,43
Минимальные значения полихроматической ЧКХ, оценённые по меридиональным и сагиттальным составляющим в пределах всего поля зрения, на пространственной частоте $25 \text{ мм}^{-1}$	0,56	0,38	0,34

Один из возможных путей модификации рассмотренного вариообъектива предполагает включение в его схему дифракционного оптического элемента (ДОЭ).

### 2. Двухдиапазонный рефракционно-дифракционный ИК-вариообъектив

Предварительный анализ показал, что наиболее перспективной при включении ДОЭ в схему вариообъектива, состоящего из трёх двухлинзовых компонентов, представляется замена материала GERMANIUM на халькогенидные стекла GASIR1 или IRG26 (см. табл. 1). Последующие расчёт и оптимизация показали, что у вариантов вариообъектива на основе двухлинзовых компонентов, выполненных из таких материалов, как SILICON и GASIR1 или SILICON и IRG26, предельно достижимые оптические характеристики весьма близки. Это обеспечивается благодаря одновременному выполнению условий коррекции как хроматических, так и монохроматических абер-

раций, чему, наряду с асферизацией преломляющих поверхностей, в значительной степени способствует дифракционная микроструктура.

ДОЭ, включенный в схему вариообъектива, должен иметь высокую дифракционную эффективность (ДЭ) на всех длинах волн сплошного спектра двухдиапазонного ИК-излучения при углах его падения на микроструктуру от 0 до  $\pm 7$  град. Это исключило возможность использования оригинальных решений, подобных предложенным в работах [10–13], и обратиться к пилообразной двухслойной двухрельфной микроструктуре, представленной на рис. 2. Хорошо отлаженная технология алмазного точения позволяет сегодня в промышленных масштабах тиражировать гибридные элементы ИК-диапазона с киноформной микроструктурой, выполненной в плоской, сферической или даже асферической поверхности рефракционной линзы [14].

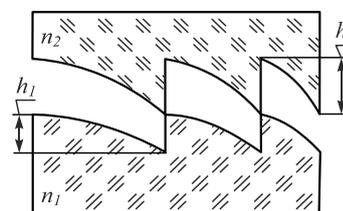


Рис. 2. Двухслойная двухрельфная микроструктура

У двухслойной двухрельфной микроструктуры суммарная глубина рельефов многократно превышает глубину рельефа однослойного киноформа, что существенно ограничивает допустимые минимальный пространственный период микроструктуры и углы падения излучения на нее.

Учесть эти ограничения позволило размещение микроструктуры в пределах оптической схемы объектива в соответствии с методикой, предложенной в работе [15]. В результате дифракционная микроструктура была размещена на плоской поверхности третьей рефракционной линзы, выполненной из материала SILICON.

Выбор материала второго слоя микроструктуры и определение оптимальных глубин рельефов осуществлялись с использованием критерия, предложенного в работе [16] и требующего, чтобы во всем ра-

бочем спектральном диапазоне обеспечивался максимально возможный интервал углов падения излучения, в пределах которого ДЭ (в точке её минимума) не опускается ниже заданного уровня. Оптимальными оказались материал ZnS\_BROAD и глубина рельефа  $h_2 = 129,33$  мкм. При этом глубина рельефа в материале SILICON –  $h_1 = 68,53$  мкм. ДЭ  $\geq 0,94$  во всём рабочем спектральном диапазоне при модуле угла падения излучения на микроструктуру, не превышающем  $10^\circ$ . В итоге оптическая схема рефракционно-дифракционного ИК-вариообъектива (с условно изображенной двухрельефной микроструктурой на поверхности третьей рефракционной линзы) прибора вид, представленный на рис. 3.

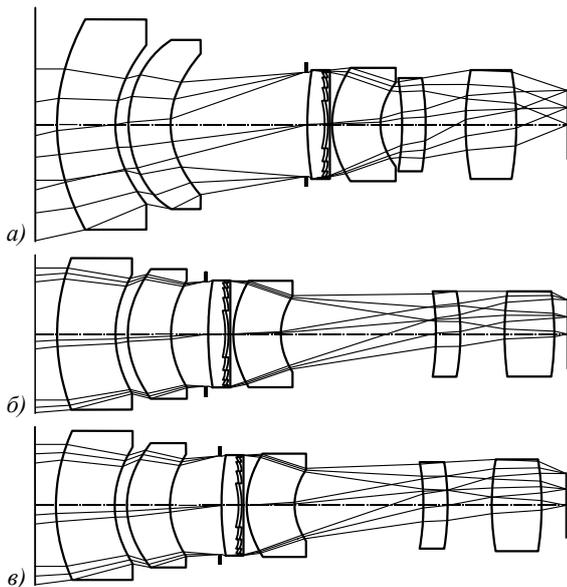


Рис. 3. Оптическая схема двухдиапазонного рефракционно-дифракционного ИК-вариообъектива: (а) короткофокусная конфигурация, соответствующая  $f'_1 = 35$  мм; (б) промежуточная конфигурация, соответствующая  $f'_2 = 54$  мм; (в) длиннофокусная конфигурация, соответствующая  $f'_3 = 84$  мм

Расстояние от вершинной касательной плоскости фронтальной линзы до плоскости изображения, фокусные расстояния и угловые поля в пространстве предметов в трёх конфигурациях остались теми же, что и у рефракционного ИК-вариообъектива, описанного в п. 1, но светосилу удалось увеличить, а диафрагменные числа соответственно уменьшить:  $K_1 = 1,15$ ;  $K_2 = 1,62$ ;  $K_3 = 2,35$ . Апертурная диафрагма, как и ранее, имеет фиксированный диаметр (28,6 мм) и перемещается вместе с первым положительным компонентом.

Конструктивные параметры и оптические характеристики рефракционно-дифракционного объектива сведены в табл. 5–7. Его преломляющие поверхности с номерами 2, 7, 8, 11 – сферические, с номерами 1, 3–5, 9, 10, 12, 13 – асферические, а дифракционная микроструктура, размещенная на плоской

поверхности третьей рефракционной линзы (на поверхности номер 6), смоделирована бесконечно тонкой фазовоадерживающей поверхностью, называемой в Zemax Binary 2 [6, 9]. Эта поверхность на длине волны  $\bar{\lambda} = 7,35$  мкм вносит фазовую задержку от 0 до  $2\pi$ , т.е. содержит три кольцевые зоны Френеля. Ширина самой узкой зоны – 2,19 мм, а модуль угла падения излучения на поверхность не превышает  $6,8^\circ$ . В результате у реальной двухслойной и двухрельефной пилообразной микроструктуры минимальный пространственный период будет более чем в 10 раз превышать суммарную глубину рельефа. Именно это обстоятельство обеспечит практическую независимость ДЭ, прогнозируемой строгой теорией дифракции, от знака угла падения излучения на микроструктуру [16, 17].

Табл. 5. Основные конструктивные параметры рефракционно-дифракционного вариообъектива

Номер поверхности	Радиус $r$ , мм	Толщина $d$ , мм	Оптический материал
ПП*		$\infty$	–
1	64,034	14	Silicon
2	37,358	2,954	–
3	28,024	10,27	IRG26
4	29,082	Изменяемая $d_4$	–
АД**	$\infty$	0,5	–
5	153,934	4,0	Silicon
6***	$\infty$	1	ZnS_broad
7	$\infty$	0,198	–
8	28,614	11,9	IRG26
9	20,950	Изменяемая $d_9$	–
10	–101,603	5,920	Silicon
11	–82,491	10,370	–
12	247,500	11,97	IRG26
13	–62,113	Изменяемая $d_{13}$	–
ПИ****	$\infty$	0	–

\* ПП – плоскость предмета;

\*\* АД – апертурная диафрагма;

\*\*\* – поверхность типа Binary 2:  $m = 1$ ,  $A_1 = -1,90428 \text{ мм}^2$ ,  $A_2 = 3,47077 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^4$ ,  $A_3 = -1,90428 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^6$ ,  $A_4 = -8,42224 \cdot 10^{-9} \text{ мм}^8$ ,  $A_5 = 9,95578 \cdot 10^{-11} \text{ мм}^{10}$ ,  $A_6 = -2,28570 \cdot 10^{-13} \text{ мм}^{12}$ ;

\*\*\*\* ПИ – плоскость изображения.

Оптические характеристики, представленные в табл. 7, так же, как и представленные в табл. 4, получены в предположении равенства весовых коэффициентов всех длин волн рабочего спектрального диапазона ( $3,7 \leq \lambda \leq 11$  мкм). Из табл. 7 следует, что остаточные хроматизм положения  $\Delta s'_p$  и хроматизм увеличения  $\Delta u'$  во всех конфигурациях по-прежнему меньше допусков, ограниченных дифракцией, в то время как хроматическая разность волновой сферической аберрации  $\Delta W_s / \bar{\lambda}$  в первой конфигурации, в которой относительное отверстие возросло в наибольшей степени, увеличилась более чем в 2 раза.

Табл. 6. Дополнительные характеристики асферических поверхностей рефракционно-дифракционного вариообъектива

Номер поверхности	Коэффициент асферичности при конической постоянной $k=0$				
	$\alpha_2, \text{мм}^{-3}$	$\alpha_3, \text{мм}^{-5}$	$\alpha_4, \text{мм}^{-7}$	$\alpha_5, \text{мм}^{-9}$	$\alpha_6, \text{мм}^{-11}$
1	$1,403 \cdot 10^{-6}$	$-1,271 \cdot 10^{-9}$	$2,951 \cdot 10^{-13}$	$-5,098 \cdot 10^{-16}$	$6,567 \cdot 10^{-19}$
3	$-7,639 \cdot 10^{-6}$	$-2,346 \cdot 10^{-9}$	$1,612 \cdot 10^{-11}$	$1,062 \cdot 10^{-14}$	$-2,907 \cdot 10^{-17}$
4	$-6,844 \cdot 10^{-6}$	$-2,928 \cdot 10^{-9}$	$4,626 \cdot 10^{-11}$	$7,388 \cdot 10^{-14}$	$-8,187 \cdot 10^{-17}$
5	$3,251 \cdot 10^{-7}$	$2,481 \cdot 10^{-9}$	$-2,537 \cdot 10^{-11}$	$1,160 \cdot 10^{-13}$	$-2,012 \cdot 10^{-16}$
9	$2,946 \cdot 10^{-6}$	$5,808 \cdot 10^{-9}$	$1,799 \cdot 10^{-11}$	$-9,212 \cdot 10^{-14}$	$9,575 \cdot 10^{-17}$
10	$-6,495 \cdot 10^{-6}$	$1,545 \cdot 10^{-8}$	$-2,378 \cdot 10^{-10}$	$1,414 \cdot 10^{-12}$	$-3,615 \cdot 10^{-15}$
12	$4,051 \cdot 10^{-6}$	$3,888 \cdot 10^{-8}$	$-1,721 \cdot 10^{-10}$	$3,167 \cdot 10^{-13}$	$6,976 \cdot 10^{-17}$
13	$5,958 \cdot 10^{-6}$	$4,523 \cdot 10^{-9}$	$1,592 \cdot 10^{-10}$	$-1,211 \cdot 10^{-12}$	$2,806 \cdot 10^{-15}$

Табл. 7. Параметры рефракционно-дифракционного вариообъектива, изменяемые при зуммировании

Параметр Номер конфигурации			
	1	2	3
Толщина $d_4$ , мм	32,138	18,078	8,362
Толщина $d_9$ , мм	4,349	21,922	37,067
Толщина $d_{13}$ , мм	11,932	8,419	2,990
$\Delta s'_f$ , мкм (в скобках приведён допуск, ограниченный дифракцией)	37 (39)	54,3 (77)	91 (163)
$\Delta u'$ , мкм (в скобках приведён допуск, ограниченный дифракцией)	9 (12)	9 (16)	9 (22)
$\Delta W_s/\lambda$	1,16	0,53	0,56
Значения дифракционно-ограниченной полихроматической частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) на пространственной частоте $25 \text{ мм}^{-1}$	0,73	0,62	0,46
Минимальные значения полихроматической ЧКХ, оценённые по меридиональным и сагиттальным составляющим в пределах всего поля зрения, на пространственной частоте $25 \text{ мм}^{-1}$	0,56	0,40	0,34

Сразу же подчеркнём, что к сколь-нибудь ощутимому падению разрешения это не привело, и минимальные значения полихроматической ЧКХ, оценённые по меридиональным и сагиттальным составляющим в пределах всего поля зрения, на пространственных частотах от 0 до  $25 \text{ мм}^{-1}$  у обоих объективов практически одинаковые, т.е. по степени коррекции аберраций и качеству формируемого изображения во всех конфигурациях оба представленных вариообъектива вполне сопоставимы.

### Заключение

На примере простого по конструкции вариообъектива, предназначенного для работы с двухдиапазонным ИК-излучением ( $3,7 \leq \lambda \leq 11 \text{ мкм}$ ) и состоящего из трёх двухлинзовых компонентов, выполненных из материалов SILICON и GERMANIUM, продемонстрирована возможность достижения высокой степени коррекции первичного хроматизма.

Действительно, у рассчитанного рефракционного вариообъектива хроматизмы положения и увеличения не превышают допуск, ограниченный дифракцией, а разрешение ограничено лишь хроматическими аберрациями высших порядков, а также монохроматическими аберрациями. При этом близость значений дифракционно-ограниченной ЧКХ и минимальных значений ЧКХ, оценённых по меридиональным и сагиттальным составляющим в пределах всего поля зрения, на пространственных частотах от 0 до  $25 \text{ мм}^{-1}$  свидетельствуют о достаточно высоком качестве формируемого изображения во всех конфигурациях.

В качестве одного из возможных путей модификации вариообъектива предложено на плоской поверхности рефракционной линзы, ближайшей к апертурной диафрагме, разместить двухслойную двухрельефную дифракционную микроструктуру, одновременно заменив во всех трёх компонентах объектива материал GERMANIUM на халькогенидное стекло марки GASIR1 или IRG26.

Эффективность перехода к рефракционно-дифракционной схеме, выражающаяся, в частности, в увеличении светосилы во всем диапазоне зуммирования, подтверждена результатами расчёта и оптимизации вариообъектива, двухлинзовые компоненты которого выполнены из материала SILICON и халькогенидного стекла марки IRG26.

### Литература

1. **Duggin, M.J.** Discrimination of targets from background of similar temperature, using two-channel data in the 3.5-4.1- $\mu\text{m}$  and 11-12- $\mu\text{m}$  regions // *Applied Optics*. – 1986. – Vol. 25, Issue 7. – P. 1186-1195.
2. **Goldberg, A.** Dual-band imaging of military targets using a QWIP focal plane array / A. Goldberg [et al.] [Electronical Resource]. – URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/c188/60cc22053cef00613170f1ae6b4cd6497d28.pdf/> (request date 20.08.2019).
3. **Vizgaitis, J.N.** Dual band infrared picture-in-picture systems / J.N. Vizgaitis, A.R. Hastings // *Optical Engineering*. – 2013. – Vol. 52, Issue 6. – 061306 (8 p).
4. **Zhang, B.** Design of dual-band infrared zoom lens with multilayer diffractive optical elements / B. Zhang, Q. Cui, M. Piao, Y. Hu // *Applied Optics*. – 2019. – Vol. 58, Issue 8. – P. 2058-2067.

5. **Грейсух, Г.И.** Коррекция хроматизма вариообъективов среднего ИК диапазона // Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, А.И. Антонов // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 4. – С. 544-549. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-4-544-549.
6. ZEMAX: software for optical system design [Electronical Resource]. – URL: <http://www.radiantzemax.com/> (request date 21.08.2019).
7. GASIR®1 – Infrared transmitting glass [Electronical Resource]. – URL: <https://eom.unicore.com/storage/eom/gasir1-for-infrared-optics-old.pdf> (request date 20.08.2019).
8. SCHOTT, your reliable solutions provider in the IR industry Infrared Chalcogenide Glass IRG26 [Electronical Resource]. – URL: [https://www.schott.com/d/advanced\\_optics/e8488684-cee0-48c6-8d1b-2eadfb145eca/1.8/schott-infrared-chalcogenide-glasses-irg-26-english-10042017.pdf](https://www.schott.com/d/advanced_optics/e8488684-cee0-48c6-8d1b-2eadfb145eca/1.8/schott-infrared-chalcogenide-glasses-irg-26-english-10042017.pdf) (request date 20.08.2019).
9. **Грейсух, Г.И.** Однослойные киноформные элементы для фото- и видеокамер мобильных устройств // Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.В. Казин, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 2. – С. 218-226. – DOI: 10.18287/0134-2452-2017-41-2-218-226.
10. **Казанский, Н.Л.** Формирование изображений дифракционной многоуровневой линзой / Н.Л. Казанский, С.Н. Хонина, Р.В. Скиданов, А.А. Морозов, С.И. Харитонов, С.Г. Волоотовский // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 3. – С. 425-434.
11. **Карпеев, С.В.** Расчёт и анализ трёхволнового дифракционного фокусирующего дублета / С.В. Карпеев, А.В. Устинов, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 2. – С. 173-178. – DOI: 10.18287/2412-6179-2015-40-2-173-178.
12. **Хонина, С.Н.** Анализ фокусировки гармонической дифракционной линзой с учётом дисперсии показателя преломления / С.Н. Хонина, С.Г. Волоотовский, А.В. Устинов, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 3. – С. 338-347. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-3-338-347.
13. **Скиданов, Р.В.** Гармоническая линза с кольцевой апертурой как изображающая система / Р.В. Скиданов, Ю.С. Стрелков, С.Г. Волоотовский // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 6. – С. 842-847. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-842-847.
14. Edmund Optics: Germanium infrared (IR) hybrid aspheric lenses [Electronical Resource]. – URL: <https://www.edmundoptics.com/f/germanium-infrared-ir-hybrid-aspheric-lenses/14182/> (request date 20.08.2019).
15. **Грейсух, Г.И.** Учёт дифракционной эффективности при проектировании рефракционно-дифракционных оптических систем / Г.И. Грейсух, В.А. Данилов, Е.Г. Ежов, С.А. Степанов // Оптический журнал. – 2016. – Т. 83, № 3. – С. 32-38.
16. **Грейсух, Г.И.** Спектральная и угловая зависимость эффективности дифракционных линз с двухрельефной и двухслойной микроструктурой / Г.И. Грейсух, В.А. Данилов, Е.Г. Ежов, С.А. Степанов, Б.А. Усиевич // Оптический журнал. – 2015. – Т. 82, № 5. – С. 56-61.
17. **Грейсух, Г.И.** Спектральная и угловая зависимость эффективности трёхслойных рельефно-фазовых дифракционных элементов ИК-диапазона / Г.И. Грейсух, В.А. Данилов, С.А. Степанов, А.И. Антонов, Б.А. Усиевич // Оптика и спектроскопия. – 2018. – Т. 125, № 1. – С. 57-61. – DOI: 10.21883/OS.2018.07.46267.57-18.

#### Сведения об авторах

**Грейсух Григорий Исаевич**, 1943 года рождения. В 1965 году окончил Пензенский политехнический институт по специальности «Радиотехника». Заслуженный работник высшей школы РФ, доктор технических наук (1990 год), профессор. Работает заведующим кафедрой физики и химии Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. Является членом Европейского оптического общества (EOS) и Российского оптического общества им. Д.С. Рождественского. Г.И. Грейсух – специалист в области расчёта оптических систем, дифракционной и градиентной оптики. В списке научных работ Г.И. Грейсуха более 200 статей, 3 монографии, 9 авторских свидетельств. E-mail: [grey@pguas.ru](mailto:grey@pguas.ru).

**Ежов Евгений Григорьевич**, 1977 года рождения. В 1999 году окончил Пензенский государственный университет по специальности «Радиотехника». Доктор физико-математических наук (2008 г.). Работает профессором кафедры информационно-вычислительных систем Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. Специалист в области расчёта оптических систем, математического моделирования и защиты информации. В списке научных работ Е.Г. Ежова свыше 60 статей, учебник и 2 патента. E-mail: [grey@pguas.ru](mailto:grey@pguas.ru).

**Антонов Артем Иванович**, 1993 года рождения. В 2014 окончил бакалавриат Пензенского государственного университета по направлению «Физика». В 2016 окончил магистратуру Пензенского государственного университета по направлению «Физика». Аспирант кафедры физики и химии Пензенского государственного университета архитектуры и строительства по направлению «Приборы и методы экспериментальной физики». В списке научных работ А.И. Антонова 14 статей и 1 авторское свидетельство. E-mail: [grey@pguas.ru](mailto:grey@pguas.ru).

ГРНТИ: 29.31.29

Поступила в редакцию 26 августа 2019 г. Окончательный вариант – 29 ноября 2019 г.

---

# Correction of chromatism of dual-infrared zoom lenses

G.I. Greisukh<sup>1</sup>, E.G. Ezhov<sup>1</sup>, A.I. Antonov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia

## Abstract

Using the example of a simple-by-design mid-wave and long-wave dual-band infrared zoom lens consisting of three two-lens components made of silicone and germanium, the possibility of reducing chromatic and monochromatic aberrations to a level that ensures sufficiently high quality of the formed image is demonstrated at spatial frequencies of up to 25 inverse millimeters.

As one of the possible ways to modify the zoom lens, it is proposed to place a two-layer two-relief diffractive microstructure on the flat surface of the refractive lens closest to the aperture stop.

The efficiency of the transition to the refractive-diffraction scheme is confirmed by the results of calculation and optimization of a zoom lens, the two-lens components of which are made of silicone and amorphous glass of the IRG26 brand.

**Keywords:** dual-infrared range, chromatism, two-lens component, refractive and refractive-diffractive zoom lens.

**Citation:** Greisukh GI, Ezhov EG, Antonov AI. Correction of chromatism of dual-infrared zoom lenses. *Computer Optics* 2020; 44(2): 177-182. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-623.

## References

- [1] Duggin MJ. Discrimination of targets from background of similar temperature, using two-channel data in the 3.5-4.1- $\mu\text{m}$  and 11-12- $\mu\text{m}$  regions. *Appl Opt* 1986; 25(7): 1186-1195.
- [2] Goldberg A, et al. Dual-band imaging of military targets using a QWIP focal plane array. Source: (<https://pdfs.semanticscholar.org/c188/60cc22053cef00613170f1ae6b4cd6497d28.pdf>).
- [3] Vizgaitis JN, Hastings AR. Dual band infrared picture-in-picture systems. *Optical Engineering* 2013; 52(6): 061306-1-061306-8.
- [4] Zhang, B, Cui Q, Piao M, Hu Y. Design of dual-band infrared zoom lens with multilayer diffractive optical elements. *Appl Opt* 2019; 58(8): 2058-2067.
- [5] Greisukh GI, Ezhov EG, Antonov AI. Correction of chromatism of mid-infrared zoom lenses. *Computer Optics* 2019; 43(4): 544-549. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-4-544-549.
- [6] ZEMAX: software for optical system design. Source: (<http://www.radiantzemax.com/>).
- [7] GASIR®1 – Infrared Transmitting Glass. Source: (<https://eom.unicore.com/storage/eom/gasir1-for-infrared-optics-old.pdf>).
- [8] SCHOTT, your reliable solutions provider in the IR industry Infrared Chalcogenide Glass IRG26. Source: ([https://www.schott.com/d/advanced\\_optics/e8488684-ccc0-48c6-8d1b-2eadfb145eca/1.8/schott-infrared-chalcogenide-glasses-irg-26-english-10042017.pdf](https://www.schott.com/d/advanced_optics/e8488684-ccc0-48c6-8d1b-2eadfb145eca/1.8/schott-infrared-chalcogenide-glasses-irg-26-english-10042017.pdf)).
- [9] Greisukh GI, Ezhov EG, Kazin SV, Stepanov SA. Single-layer kinoforms for cameras and video cameras of mobile communication devices. *Computer Optics* 2017; 41(2): 218-226. DOI: 10.18287/0134-2452-2017-41-2-218-226.
- [10] Kazanskiy NL, Khonina SN, Skidanov RV, Morozov AA, Kharitonov SI, Volotovskiy SG. Formation of images using multilevel diffractive lens. *Computer Optics* 2014; 38(3): 425-433.
- [11] Karpeev SV, Ustinov AV, Khonina SN. Design and analysis of a three-wave diffraction focusing doublet. *Computer Optics* 2016; 40(2): 173-178. DOI: 10.18287/2412-6179-2015-40-2-173-178.
- [12] Khonina SN, Volotovskiy SG, Ustinov AV, Kharitonov SI. Analysis of focusing light by a harmonic diffractive lens with regard for the refractive index dispersion. *Computer Optics* 2017; 41(3): 338-347. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-3-338-347.
- [13] Skidanov RV, Strelkov YS, Volotovskiy SG. Harmonic lens with an annular aperture. *Computer Optics* 2017; 41(6): 842-847. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-842-847.
- [14] Edmund Optics: Germanium infrared (IR) Hybrid aspheric lenses. Source: (<https://www.edmundoptics.com/f/germanium-infrared-ir-hybrid-aspheric-lenses/14182/>).
- [15] Greisukh GI, Danilov VA, Ezhov EG, Stepanov SA. Consideration of diffraction efficiency in the design of refractive-diffractive optical systems. *Opt J* 2016; 83(3): 32-38.
- [16] Greisukh GI, Danilov VA, Ezhov EG, Stepanov SA, Usievich BA. Spectral and angular dependence of the efficiency of diffraction lenses with a two-relief and two-layer microstructure. *Opt J* 2015; 82(5): 56-61.
- [17] Greisukh GI, Danilov VA, Stepanov SA, Antonov AI, Usievich BA. Spectral and angular dependence of the efficiency of three-layer relief-phase diffraction elements of the infrared range. *Optics and Spectroscopy* 2018; 125(1): 60-64. DOI: 10.1134/S0030400X18070123.

---

## Authors' information

**Grigoriy Isaevich Greisukh** (b. 1943) graduated (1965) from Penza Politechnical Institute, majoring in Radio Engineering. He is the deserved worker of the Russian Higher School. He received his Doctor in Technical (1990) degrees from the Leningrad Institute of Precision Mechanics and Optics. He is chief of the Physics and Chemistry department of the Penza State University of Architecture and Construction. G.I. Greisukh is EOS and D. S. Rozhdestvensky Optical

---

---

Society member. His current research interests include design of optical system, diffractive and gradient-index optics. He is co-author of 200 scientific papers, 3 monographs, and 9 inventions. E-mail: [grey@pguas.ru](mailto:grey@pguas.ru).

**Evgeniy Grigorievich Ezhov** (b. 1977) graduated (1981) from Penza State University majoring in Radio Engineering. He is Doctor of Physical and Mathematical Sciences (2008), professor of the Information Systems and Computer-Modeling department of Penza State University of Architecture and Construction. His current research interests include design of optical systems, mathematical modeling, and data security. He is coauthor over 55 scientific papers, tutorial and 2 patents. E-mail: [grey@pguas.ru](mailto:grey@pguas.ru).

**Artyom Ivanovich Antonov** (b. 1993). In 2014 he graduated from Penza State University, direction of "Physics", as bachelor. In 2016 he acquired the master degree of direction of "Physics". Now he is a post-graduate student of Physics and Chemistry department of the Penza State University of Architecture and Construction in the direction "Devices and Methods of Experimental Physics". A.I. Antonov is co-author of 5 articles and 1 invention. E-mail: [grey@pguas.ru](mailto:grey@pguas.ru).

---

*Received August 26, 2019. The final version – November 29, 2019.*

---