

Дифракционные элементы в тепловизионных монофокальных двухдиапазонных объективах: проектирование и технологические аспекты

Г.И. Грейсух¹, И.А. Левин², О.А. Захаров¹

¹ Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
440028, Россия, г. Пенза, ул. Германа Титова, д. 28;

² ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», 143400, Россия, г. Красногорск, ул. Речная, д. 8

Аннотация

На примере разработки двух простых по конструкции двухдиапазонных монофокальных ИК-объективов продемонстрированы подходы к компоновке и расчету их оптических схем в зависимости от того, требуется или не требуется компенсация эффектов воздействия изменения температуры на оптические характеристики этих объективов. Показано, что в случае, когда термокомпенсация не требуется, высокие оптические характеристики могут быть достигнуты у простого триплета, у которого плоская поверхность фронтальной рефракционной линзы несет дифракционную микроструктуру. В случае же пассивной атермализации оптическая схема объектива усложняется и состоит из рефракционных двухлинзовых силового и коррекционного компонентов, в последнем из которых плоская поверхность одной из линз несет дифракционную микроструктуру. Благодаря высокоэффективным дифракционным микроструктурам продольный хроматизм у обоих объективов снижен практически до дифракционного предела, и в совокупности с низким уровнем остаточных монохроматических aberrаций при высокой светосиле обеспечивается предельная для используемых в качестве матричных приёмников неохлаждаемых микроболометров разрешающая способность.

Ключевые слова: дифракционный оптический элемент, монофокальный двухдиапазонный ИК-объектив, пассивная атермализация, апохроматизация, компоновка оптической схемы, оптические характеристики.

Цитирование: Грейсух, Г.И. Дифракционные элементы в тепловизионных монофокальных двухдиапазонных объективах: проектирование и технологические аспекты / Г.И. Грейсух, И.А. Левин, О.А. Захаров // Компьютерная оптика. – 2024. – Т. 48, № 2. – С. 210-216. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1336.

Citation: Greisukh GI, Levin IA, Zakharov OA. Diffractive elements in thermal imaging monofocal dual-band objectives: design and technological aspects. Computer Optics 2024; 48(2): 210-216. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1336.

Введение

Всевозрастающий спрос на тепловизионные системы продиктован сегодня, в частности, расширяющейся сферой их гражданского применения. Устройства с использованием тепловизоров позволяют осуществлять наблюдение в условиях плохой видимости и обнаруживать скрытые объекты. Эти устройства широко используются в системах технического зрения, для обеспечения безопасности авиа- и судовождения, контроля и охраны различных объектов. МЧС применяет такие устройства для определения наиболее опасных участков с высокой температурой при спасательных работах во время ликвидации пожаров. Не вызывает сомнений перспективность оснащенных тепловизорами беспилотных летательных аппаратов для дистанционного мониторинга и диагностики объектов промышленного и гражданского строительства, а также инженерных систем и сооружений.

Расширение сферы применения тепловизионных устройств сопровождается повышением требований к их массогабаритным и техническим характеристикам, в частности к ширине рабочего спектрального диапазона. Его расширение и даже переход к созданию

компактных мультиспектральных инфракрасных (ИК) систем с единым входным зрачком стало возможным благодаря созданию неохлаждаемых матричных фотоприёмников, имеющих высокую спектральную чувствительность в двойном ИК-диапазоне, включающем средне- и длинноволновый поддиапазоны излучения (3–5 и 8–12 мкм). Что касается высоких оптических характеристик у двухдиапазонных ИК-систем, то их достижение требует расширения элементной базы и ассортимента коммерчески доступных оптических материалов.

Один из возможных путей расширения элементной базы предполагает использование дифракционных оптических элементов (ДОЭ). При этом уникальные абберационные свойства ДОЭ дают значительный эффект как в видимом, так и в ИК-диапазоне. Действительно, введение такого элемента в рефракционный объектив тепловизора позволяет упростить его оптическую схему и достичь при этом требуемых оптических характеристик (см., например, [1–3]). В то же время реальный положительный эффект от использования ДОЭ будет достигнут только при условии высокой дифракционной эффективности (ДЭ) и минимизации её зависимости от длины волны

и угла падения излучения на элемент. С этой целью микроструктуру ДОЭ выполняют пилообразной и многослойной [4, 5]. Проблема усугубляется при использовании рефракционно-дифракционного объектива в условиях значительного перепада температур эксплуатации. В этом случае необходимо обеспечить сохранение у многослойной микроструктуры механической прочности при высокой ДЭ в широком интервале рабочих температур. Из чего следует, что материалы слоев, прозрачные в ИК-диапазоне и существенно различающиеся как показателями преломления, так и дисперсионными свойствами, должны иметь почти равные температурные коэффициенты линейного расширения (ТКЛР). Последнее обстоятельство в рассматриваемой спектральной области практически исключает использование дифракционных микроструктур, слои которых должны находиться в прямом механическом контакте друг с другом. Следовательно, наиболее приемлемым сегодня вариантом компоновки микроструктуры ДОЭ является двухслойная микроструктура с двумя внутренними пилообразными рельефами, представленная на рис. 1. Ее рельефы выполняются в плоских поверхностях материальных подложек со значительно отличающимися коэффициентами дисперсии [3, 6].

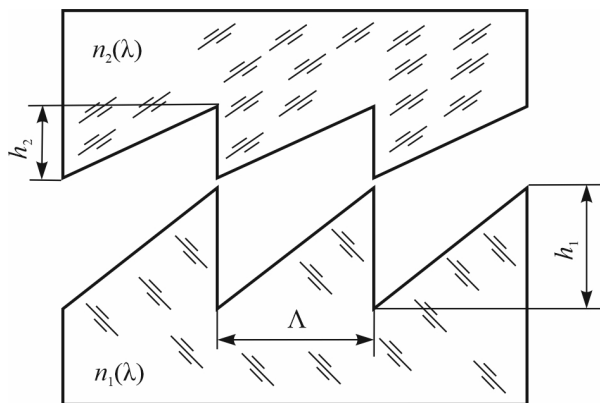


Рис. 1. Двухслойная пилообразная дифракционная микроструктура с двумя внутренними рельефами

Уровень ДЭ двухслойной двухрельфной микроструктуры с оптимально подобранными материалами и глубинами рельефов зависит в первую очередь от ширины интервала углов падения излучения $\Delta\theta$, а во вторую очередь – от величины отношения периода микроструктуры к суммарной глубине ее рельефов $P = \Lambda / (h_1 + h_2)$. Этот уровень уменьшается с ростом $\Delta\theta$ и увеличивается с увеличением P . Перечисленные обстоятельства накладывают ограничения на местоположение ДОЭ в оптической схеме объектива и на минимальный период в ее микроструктуре [7].

Специфике компоновки и расчета оптических схем монофокальных ИК-объективов с ДОЭ, а также учету на этапе проектирования технологической реализуемости многослойной дифракционной микроструктуры посвящена настоящая статья.

1. Компоновка и расчет оптической схемы

Подход к проектированию оптических систем ИК-диапазона во многом определяется тем, требуется ли компенсация эффектов воздействия изменения температуры на оптические характеристики объектива. Если условия эксплуатации предполагают значительный перепад температур, но при этом механическая конструкция объектива предусматривает наличие ручной или автоматической подфокусировки, то компенсация не требуется, за исключением отдельных случаев, например систем космического базирования. Если же механизмы подфокусировки отсутствуют, то требуется компенсация терморасфокусировки, т.е. атермализация.

Сначала рассмотрим наиболее простой вариант, не требующий термокомпенсации. В этом случае благодаря использованию ДОЭ оказалось возможным одновременно выполнить условия коррекции как хроматических, так и монохроматических аберраций у высокоапертурного объектива, состоящего всего лишь из трех рефракционных линз [6]. Ниже продемонстрируем один из вариантов компоновки и результаты расчета на примере двухдиапазонного рефракционно-дифракционного ИК-объектива, матричным приёмником излучения которого является неохлаждаемый микроболومتر марки АСТРОН-64017-2 с форматом 640×512 и шагом матрицы 17 мкм. Спектральный диапазон микроболметра 3–5 и 8–14 мкм, а частота Найквиста $N_N = 30 \text{ мм}^{-1}$ [8].

Оптическая схема объектива представлена на рис. 2. Он рассчитан на спектральный диапазон от 3,5 мкм до 11,9 мкм (за исключением участка 5,1–7,9 мкм нечувствительности микроболметра). Фокусное расстояние объектива $f' = 40 \text{ мм}$, относительное отверстие $D/f' = 0,91$, а линейное поле изображения, соответствующее размеру матрицы микроболметра, $2y' = 13,8 \text{ мм}$. Угловое поле в пространстве предметов $2\omega = 19,57^\circ$, а продольный габарит объектива, т.е. расстояние от фронтальной плоскости до плоскости изображения, $L = 72,13 \text{ мм}$.

Две рефракционные линзы этого объектива выполнены из коммерчески доступного халькогенидного стекла HWS4 [9], обработка которого допускает применение современных методов формообразования на основе прецизионной штамповки. Это обеспечивает технологичность тиражирования линз с асферическими преломляющими поверхностями или с дифракционными микрорельефами. Третья линза объектива выполнена из кристаллического сернистого цинка.

ДОЭ является фронтальным элементом объектива. Это, с одной стороны, обеспечивает равенство углов падения излучения на элемент полевым углом, а с другой – предоставляет ДОЭ при показанном на рис. 2 положении апертурной диафрагмы возможность участия в коррекции как хроматических, так и монохроматических (включая полевые) аберраций всех порядков.

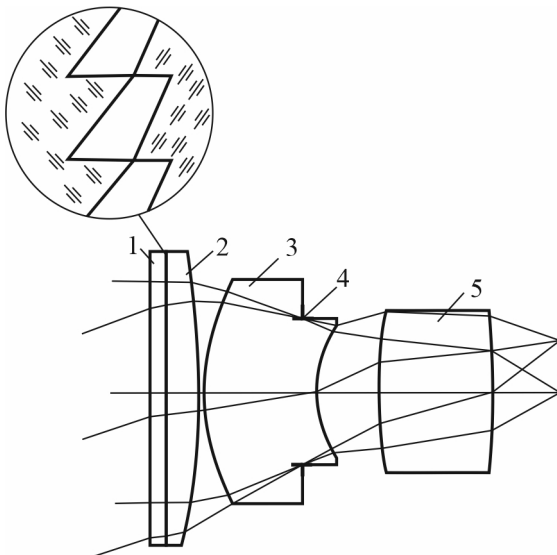


Рис. 2. Оптическая схема рефракционно-дифракционного неатермализованного ИК-объектива: 1 – плоскопараллельная пластина, в которой так же, как и во фронтальной плоскости поверхности рефракционной линзы 2, выполнен рельеф двухслойной дифракционной микроструктуры; 3, 5 – рефракционные линзы; 4 – апертурная диафрагма

В табл. 1 представлены конструктивные параметры объектива, полученные путем оптимизации с помощью программы оптического проектирования ZEMAX [10]. Сразу же заметим, что эта таблица так же, как и табл. 2, содержит наименования кристаллических оптических материалов, названия и технические характеристики которых представлены в каталоге INFRARED программы ZEMAX.

Табл. 1. Конструктивные параметры рефракционно-дифракционного неатермализованного ИК-объектива

Номер поверхности	Радиус, мм	Толщина, мм	Материал	Коэффициенты асферической деформации при $k=0$			
				$\alpha_2 \cdot 10^6$, мм ⁻³	$\alpha_3 \cdot 10^{10}$, мм ⁻⁵	$\alpha_4 \cdot 10^{13}$, мм ⁻⁷	$\alpha_5 \cdot 10^{15}$, мм ⁻⁹
0 ^a	∞	∞					
1	∞	3	PBF2				
2	∞	0					
3 ^b	∞	5	HWS4				
4	-115,591	0,9		-0,633	53,624	-78,776	4,328
5	33,509	17,356	ZNS BROAD	-4,896	8,666	15,071	-14,396
6 ^c	∞	2,644	ZNS BROAD				
7	15,756	11,537		-34,111	-1072,51	1571,17	-2383,51
8	49,184	20	HWS4	2,697	-55,879	452,845	-199,640
9	-115,047	11,696		5,577	3,214	474,276	-381,134
10 ^d	∞						

Примечание. ^a – плоскость предмета; ^b – поверхность типа Binary2; $m=1$, $A_1=-0,119365$ мм⁻², $A_2=0,235523 \cdot 10^{-3}$ мм⁻⁴, $A_3=-7,488916 \cdot 10^{-7}$ мм⁻⁶, $A_4=2,978559 \cdot 10^{-9}$ мм⁻⁸, $A_5=-9,001439 \cdot 10^{-12}$ мм⁻¹⁰, $A_6=1,472481 \cdot 10^{-14}$ мм⁻¹², $A_7=-9,651534 \cdot 10^{-18}$ мм⁻¹⁴; ^c – апертурная диафрагма; ^d – плоскость изображения.

Пассивная оптическая атермализация (основанная на подборе оптических материалов линз и элементов конструкции [11, 12]) в совокупности с апохроматизацией и другими абберационными требованиями неизбежно приводит к усложнению оптической схемы объектива. Это наглядно продемонстрировано в работе [3], в которой представлена методика, вклю-

Каждая из неплоских поверхностей рефракционных линз разработанного объектива представляет собой так называемую чётную асферическую поверхность, описываемую в ZEMAX уравнением:

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

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; κ – коническая константа; α_p – коэффициенты асферичности поверхности. Что же касается дифракционной микроструктуры, то она в рамках ZEMAX моделируется поверхностью типа Binary2 с фазовой задержкой вида

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

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

Аберрационные характеристики неатермализованного рефракционно-дифракционного ИК-объектива таковы, что в пределах углового поля зрения $2\omega \leq 19,57^\circ$ он формирует изображение на частоте Найквиста микроболометра ($N_N = 30$ мм⁻¹) с контрастом $T \geq 0,5$ во всем рабочем спектральном диапазоне. Максимальный хроматизм положения благодаря апохроматической коррекции $\Delta s'_{\max} < 35,3$ мкм при дифракционном пределе 38,6 мкм, а дисторсия не превышает 0,25%.

чающая принципы компоновки оптической схемы и рекомендации по выбору исходных конструктивных параметров при проектировании простых по конструкции двухдиапазонных сверхвысокоапертурных атермальных ИК-объективов. Основные положения методики включают выполнение условий апланатичности на расчётной длине волны, хроматической кор-

рекции в рабочем спектральном диапазоне и устранения терморасфокусировки в заданном интервале температур у разрабатываемого ИК-объектива. Для этого на базе двухкомпонентной оптической схемы проводится подбор оптических материалов линз коррекционного и силового компонентов, определение положения ДОЭ и оптимальной комбинации оптических материалов многослойной дифракционной микроструктуры, а также выбор материала элементов механической конструкции.

С использованием этой методики был рассчитан, в частности, представленный ниже атермализованный сверхвысокоапертурный двухдиапазонный ИК-объектив. Его матричным приёмником излучения также является неохлаждаемый микроболومتر АСТРОН-64017-2. Оптическая схема объектива показана на рис. 3. Он рассчитан на спектральный диапазон от 3,5 мкм до 11,5 мкм (за исключением участка 5,1–7,9 мкм нечувствительности микроболметра). Фокусное расстояние объектива $f' = 40,16$ мм, относительное отверстие $D/f' = 1,64$, а линейное поле изображения, соответствующее размеру матрицы микроболметра, $2y' = 13,8$ мм. Угловое поле в пространстве предметов $2\omega = 19,5^\circ$, а продольный габарит объектива $L \approx 117$ мм.

Три рефракционные линзы этого объектива выполнены из халькогенидного стекла НWS5 [9], четвертая же линза, несущая дифракционную микроструктуру, – из монокристаллического германия.

Оптическая схема объектива двухкомпонентная. Силовой компонент состоит из двух рефракционных линз 5 и 6, а трехэлементный коррекционный компонент включает, наряду с ДОЭ, две рефракционные линзы 2 и 4.

Необходимым, но недостаточным условием атермализации объектива является выполнение силового компонента из материалов с малыми значениями термооптической постоянной. Такими оптическими материалами, в частности, являются халькогенидные стекла.

При выполнении вышеприведенного условия, предъявляемого к материалам силового компонента, для достижения компенсации температурного изменения заднего фокального отрезка объектива необходимо, чтобы отрицательный оптически слабый коррекционный компонент включал линзы из материалов с термооптической постоянной, существенно превышающей по величине аналогичные значения для халькогенидных стекол. Такими материалами являются оптические кристаллы. Если при этом учесть, что коррекционный компонент призван к тому же обеспечить апохроматизацию объектива, то именно в этом компоненте должен быть ДОЭ. К тому же вынос зрачка из плоскости дифракционного элемента позволит ему участвовать в коррекции и монохроматических (включая полевые) аберраций всех порядков.

В табл. 2 представлены конструктивные параметры объектива, полученные путём оптимизации с по-

мощью программы оптического проектирования ZEMAX. Элементы механической конструкции этого объектива предполагаются выполненными из алюминия с ТКЛР, равным $23 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$. Аберрационные характеристики атермализованного объектива таковы, что в заданном спектральном диапазоне при относительном отверстии $D/f' = 1,64$ он формирует изображение на частоте Найквиста микроболметра ($N_N = 30 \text{ мм}^{-1}$) с контрастом $T \geq 0,53$ в пределах углового поля зрения $2\omega \leq 19,5^\circ$ и в интервале рабочих температур от -40°C до $+60^\circ\text{C}$. Максимальный хроматизм положения $\Delta s'_{\text{max}} < 19,5$ мкм при дифракционном пределе 15 мкм, а дисторсия не превышает 1,5 %.

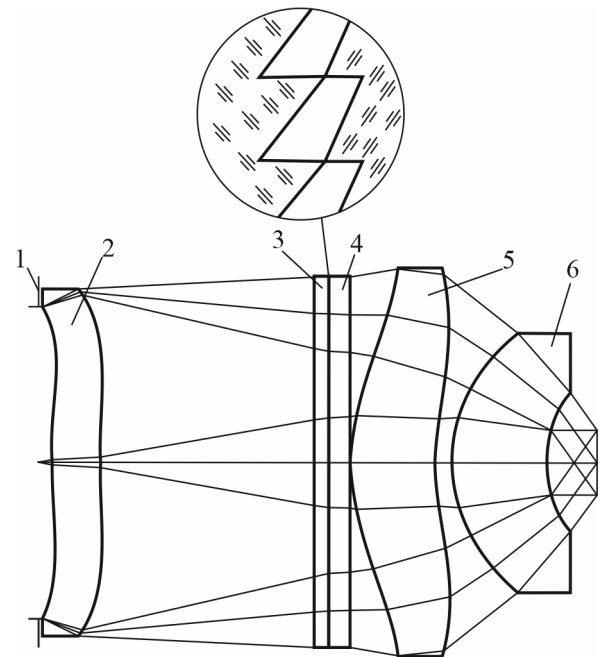


Рис. 3. Оптическая схема рефракционно-дифракционного сверхвысокоапертурного атермального двухдиапазонного ИК-объектива: 1 – апертурная диафрагма; 2, 4 – 6 – рефракционные линзы; 3 – плоскопараллельная пластина, в которой так же, как и во фронтальной плоской поверхности рефракционной линзы 4, выполнен рельеф двухслойной дифракционной микроструктуры

2. Технологические аспекты многослойных ДОЭ

Разработка двухслойной микроструктуры ДОЭ для конкретной оптической схемы следует за её аберрационным расчетом и оптимизацией, результатами которой, в частности, являются минимальный период микроструктуры и диапазон углов падения излучения на неё, а также оптический материал одного из слоев (условно назовем его базовым). Это материал рефракционной линзы, в одной из поверхностей которой выполняется микрорельеф. Далее остается лишь подобрать материал второго слоя, получить оптимальные глубины рельефов и оценить достижимую ДЭ в пределах рабочего спектрального диапазона и интервала углов падения излучения на микроструктуру.

Табл. 2. Конструктивные параметры рефракционно-дифракционного варианта сверхвысокоапертурного атермального двухдиапазонного ИК-объектива

Номер поверхности	Радиус, мм	Толщина, мм	Материал	Коэффициенты асферической деформации при $k=0$			
				$\alpha_2 \cdot 10^6$, мм ⁻³	$\alpha_3 \cdot 10^{10}$, мм ⁻⁵	$\alpha_4 \cdot 10^{13}$, мм ⁻⁷	$\alpha_5 \cdot 10^{15}$, мм ⁻⁹
0 ^a	∞	∞					
1 ^b	∞	3					
2	151,238	10,232	HWS5	-3,483	-10,302	1,126	-0,397
3	244,884	46,334		-4,123	-1,234	0,433	-0,081
4	∞	3	SrF ₂				
5	∞	0					
6 ^c	∞	3,950	Germanium				
7	1172,049	0,4					
8	47,972	16,918	HWS5	-3,031	-7,511	-3,024	0,129
9	46,827	2,668		-13,899	64,619	-22,567	0,260
10	30,278	19,617	HWS5	-5,017	44,024	-45,494	-1,465
11	35,029	10,547		30,959	376,740	940,713	-238,591
12 ^d	∞						

Примечание. ^a – плоскость предмета; ^b – апертурная диафрагма; ^c – поверхность типа Binary2: $m=1$, $A_1=-0,111027$ мм⁻², $A_2=1,569741 \cdot 10^{-5}$ мм⁻⁴, $A_3=-5,201647 \cdot 10^{-8}$ мм⁻⁶, $A_4=3,739249 \cdot 10^{-11}$ мм⁻⁸, $A_5=-7,809142 \cdot 10^{-15}$ мм⁻¹⁰; ^d – плоскость изображения.

На этом этапе не исключена корректировка рабочего спектрального диапазона объектива из-за ограниченности полосы пропускания оптического материала второго слоя. Именно это обстоятельство и определило длинноволновые границы спектральных диапазонов обоих рассмотренных выше объективов. Действительно, оптимальной парой для халькогенидного стекла HWS4 (см. табл. 1) является монокристаллический PBF2, полоса пропускания которого в длинноволновой области ограничена 11,9 мкм, а оптимальной парой для GERMANIUM (см. табл. 2) является монокристаллический SRF2, полоса пропускания которого ограничена 11,5 мкм.

Пилообразная двухрельфная микроструктура PBF2/HWS4 состоит всего из 5 кольцевых зон, и при этом ширина самой узкой зоны, т.е. минимальный период микроструктуры, $\Lambda > 2,9$ мм. Оптимальные глубины рельефов этой микроструктуры $h_1 = 84,4$ мкм и $h_2 = 42,8$ мкм в интервале углов падения излучения на неё из воздуха $\pm 9,78^\circ$ обеспечивают ДЭ $\geq 0,93$ во всем рабочем спектральном диапазоне.

Пилообразная двухрельфная микроструктура SRF2/GERMANIUM состоит из 27 кольцевых зон и при этом минимальный период $\Lambda > 800$ мкм. Оптимальные глубины рельефов этой микроструктуры $h_1 = 53,4$ мкм и $h_2 = 8,7$ мкм в интервале углов падения излучения на неё из воздуха $\pm 14^\circ$ обеспечивают ДЭ $\geq 0,87$ во всем рабочем спектральном диапазоне. Приведенные выше значения ДЭ рассчитаны в рамках строгой теории дифракции RCWA-методом [13, 14] с использованием компьютерной программы «PSUAC-DE» [15] без учета френелевских отражений от гладких и рельефных поверхностей ДОЭ.

Отлаженной технологией, позволяющей создавать пилообразный микрорельеф в поверхности кристаллической оптической заготовки, является алмазное

точение. Съём материала происходит в результате односточечного воздействия резца на обрабатываемую поверхность в соответствии с заданным профилем. Профиль задаётся уравнением, включающим кривизну поверхности, коническую постоянную и до 40 коэффициентов асферизации при чётных и нечётных степенях радиальной координаты (см., например, программу DIFFSYS® для станков с ЧПУ [16]).

В ряде работ (см., например, [17–19]) теоретически и экспериментально продемонстрированы возможности выбора формы и радиуса наконечника алмазного инструмента, а также скорости его подачи, обеспечивающих оптимальный профиль фазового рельефа и минимизацию влияния эффектов затенения и рассеяния на ДЭ. Эти возможности в полной мере относятся к глубоким микроструктурам ДОЭ для ИК-объективов.

Известную проблему в ИК-диапазоне представляют френелевские отражения от гладких и рельефных поверхностей оптических элементов. Они обусловлены высокими значениями показателей преломления оптических материалов. Например, у халькогенидных стекол $n \approx 2,5$, а у германия $n \approx 4$. Эта проблема успешно решается с помощью многослойных интерференционных покрытий как в среднем и длинноволновом [20], так и в двойном ИК-диапазонах [21].

Заключение

Совершенствование тепловизионных устройств предполагает расширение их функциональных возможностей, сопровождаемое повышением требований к массогабаритным и техническим характеристикам, а также к ширине рабочего спектрального диапазона. Очевидные успехи в этом направлении сегодня достигаются благодаря созданию широкодиапазонных фотоприёмников и расширению элементной базы

оптики. Здесь имеются в виду прежде всего неохлаждаемые матричные фотоприёмники с высокой спектральной чувствительностью в двойном ИК-диапазоне, включающем средне- и длинноволновый поддиапазоны излучения, а также халькогенидные стекла и ДОЭ.

На примере разработки двух простых по конструкции двухдиапазонных монофокальных ИК-объективов продемонстрированы подходы к компоновке и расчету их оптических схем в зависимости от того, требуется или не требуется компенсация эффектов воздействия изменения температуры на оптические характеристики этих объективов. Матричным приёмником излучения каждого из объективов является неохлаждаемый микроболометр марки АСТРОН-64017-2 с форматом 640×512 и шагом матрицы 17 мкм.

Показано, что в случае, когда термокомпенсация не требуется, высокие оптические характеристики могут быть достигнуты у простого триплета, у которого плоская поверхность фронтальной рефракционной линзы, выполненной из халькогенидного стекла, несет дифракционную микроструктуру. Благодаря ДОЭ у этого объектива достигнута апохроматизация в двойном ИК-диапазоне (3,5–5 и 8–11,9 мкм) и внесен определенный вклад в достижение высокого разрешения практически при единичном относительном отверстии. Фокусное расстояние объектива $f' = 40$ мм, а продольный габарит $L = 72,13$ мм.

Максимальный хроматизм положения благодаря апохроматической коррекции меньше дифракционного предела, и при угловом поле зрения $2\omega \leq 19,57^\circ$ объектив формирует изображение на частоте Найквиста микроболометра ($N_N = 30 \text{ мм}^{-1}$) с контрастом $T \geq 0,5$ во всем рабочем спектральном диапазоне.

В случае же пассивной атермализации, не требующей механического перемещения элементов оптического тракта, оптическая схема объектива усложняется и состоит из рефракционного двухлинзового силового компонента, выполненного из халькогенидного стекла, и коррекционного компонента, состоящего из рефракционных халькогенидной и германиевой линз. При этом плоская фронтальная поверхность последней несет дифракционную микроструктуру ДОЭ.

Усложнение оптической схемы, сопровождающееся увеличением продольного габарита ($L \approx 117$ мм), позволяет, кроме атермализации, резко увеличить относительное отверстие и при этом не только сохранить, но и несколько поднять разрешающую способность объектива. Действительно, при фокусном расстоянии $f' = 40,16$ мм, относительном отверстии $D/f' = 1,64$ он формирует изображение на частоте Найквиста микроболометра ($N_N = 30 \text{ мм}^{-1}$) с контрастом $T \geq 0,53$ в пределах углового поля зрения $2\omega \leq 19,5^\circ$ и в интервале рабочих температур от -40°C до $+60^\circ\text{C}$. Благодаря ДОЭ у этого объектива достигнута апохроматизация в двойном ИК-диапазоне (3,5–5 и 8–11,5 мкм) и внесен определенный вклад в

коррекцию монохроматических aberrаций. Максимальный хроматизм положения при этом лишь в 1,3 раза превышает дифракционный предел, который из-за роста относительного отверстия снизился более чем в 2,5 раза.

Что касается ДОЭ обоих объективов, то с целью достижения высокой ДЭ и минимизации её зависимости от длины волны и угла падения излучения на элемент их микроструктуры выполняются пилообразными, двухслойными, с двумя внутренними рельефами. Требуемые рельефы в халькогенидных стеклах могут быть выполнены прецизионной штамповкой, а в кристаллических оптических материалах – алмазным точением. Благодаря рациональному размещению ДОЭ в оптических схемах обоих объективов углы падения излучения и минимальные пространственные периоды их микроструктур таковы, что у ДОЭ неатермализованного объектива $DЭ \geq 0,93$, а у атермализованного $DЭ \geq 0,87$. Эти значения приведены без учета френелевских потерь на гладких и рельефных поверхностях, которые могут быть минимизированы с помощью многослойных интерференционных покрытий.

Благодарности

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

References

- [1] Wang H, Bai Y, Luo J. Hybrid refractive/diffractive optical system design for light and compact uncooled longwave infrared imager. Proc SPIE 2012; 8416: 84162N.
- [2] Tarasishin AV, Bezdidko SN. Compact lens of mid-infrared range [In Russian]. Pat RF of Invent N 2621366 of June 2, 2017, Russian Bull of Inventions N16, 2017.
- [3] Greisukh GI, Levin IA, Ezhov EG. Design of ultra-high-aperture dual-range athermal infrared objectives. Photonics 2022; 9: 742. DOI: 10.3390/photonics9100742.
- [4] Laborde V, Loicq J, Hastanin J, Habraken S. Multilayer diffractive optical element material selection method based on transmission, total internal reflection, and thickness. Appl Opt 2022; 61(25): 7415-7423. DOI: 10.1364/AO.465999.
- [5] Mao S, Zhao J, He D. Analytical and comprehensive optimization design for multilayer diffractive optical elements in infrared dual band. Opt Commun 2020; 472: 125831. DOI: 10.1016/j.optcom.2020.125831.
- [6] Greisukh GI, Danilov VA, Ezhov EG, Antonov AI, Usievich BA. Diffractive elements in optical systems of middle and double IR range [In Russian]. Fotonika 2020; 14(2): 160-169. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.2.160.169.
- [7] Greisukh GI, Ezhov EG, Stepanov SA. Taking diffractive efficiency into account in the design of refractive/diffractive optical systems. J Opt Technol 2016; 83(3): 163-167. DOI: 10.1364/JOT.83.000163.
- [8] АСТРОН-64017-2. Microbolometer dual-spectral array detector. 2023. Source: <<https://astrohn.ru/product/astrohn-64017-2/>>.
- [9] CDGM. Optics. HWS Chalcogenide Infrared Glass. 2023. Source: <http://www.cdgm.com/go.htm?url=goods&k=HWS_Infrared_Glass>.

- [10] ZEMAX: software for optical system design. 2023. Source: <<https://www.zemax.com/>>.
- [11] Hassan HM, Eldessouky TA-E, Medhat M. Compact athermalized LWIR objective lens. *J Opt* 2023; 52(1): 261-268. DOI: 10.1007/s12596-022-00892-2.
- [12] Doğan A, Bacioğlu A. Design of a passive optical athermalization of dual-band IR seeker for precision-guided systems. *J Mod Opt* 2021; 68(11): 593-603. DOI: 10.1080/09500340.2021.1937734.
- [13] Moharam MG, Pommert DA, Grann EB, Gaylord TK. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach. *J Opt Soc Am A* 1995; 12(5): 1077-1086. DOI: 10.1364/JOSAA.12.001077.
- [14] Antonov AI, Vasin LA, Greisukh GI. Approaches to the algorithmization of the rigorous coupled-wave analysis. *Computer Optics* 2019; 43(2): 209-219. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-2-209-219.
- [15] Antonov AI, Greisukh GI, Kazin SV. Certificate of state registration of the computer program «PSUAC-DE» No. 2022681578 (Russian Federation), 2022.
- [16] Cam software for ultra precision diamond machined optics. 2023. Source: <<https://www.precitech.com/-/media/ameteprecitech/documents/brochures/diffsys/diffsys%20brochure%20160323.pdf?la=en>>.
- [17] Zhou P, Xue C, Yang C, Liu C, Liu X. Diffraction efficiency evaluation for diamond turning of harmonic diffractive optical elements. *Appl Opt* 2020; 59(6): 1537-1544.
- [18] Blough CG, Rossi M, Mack SK, Michaels RL. Single-point diamond turning and replication of visible and near-infrared diffractive optical elements. *Appl Opt* 1997; 36(20): 4648-4654.
- [19] Khatri N, Berwal S, Manjunath K, Singh B, Mishra V, Goel S, Research on development of aspheric diffractive optical element for mid-infrared imaging. *Infrared Phys Technol* 2023; 129: 104582.
- [20] Germanium infrared (IR) hybrid aspheric lenses. 2023. Source: <<https://www.edmundoptics.com/f/germanium-infrared-ir-hybrid-aspheric-lenses/14182/>>.
- [21] Rahmloow TD Jr, Lazo-Wasem JE, Vizgaitis JN, Flanagan-Hyde J. Dual-band antireflection coatings on 3rd Gen lenses. *Proc SPIE* 2011; 8012: 80123D. DOI: 10.1117/12.888100.

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 250 статей, 3 монографии, 9 авторских свидетельств и 2 патента. E-mail: grey@pguas.ru

Левин Илья Анатольевич, 1987 года рождения. В 2009 году окончил Пензенский государственный университет по специальности 01.07.01 «Физика». Кандидат физико-математических наук (2013 год), работает ведущим инженером-конструктором отдела разработки и проектирования объективов ТНП и ГП ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева». И.А. Левин – специалист в области расчёта оптических систем. В списке научных работ И.А. Левина 15 статей и 9 патентов. E-mail: i.a.levin@mail.ru

Захаров Олег Александрович, 1978 года рождения. В 2001 году окончил Пензенский государственный педагогический университет по специальности «Физика». Кандидат технических наук (2006 год), доцент кафедры физики и химии Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. В списке научных работ О.А. Захарова 25 статей и 4 патента. E-mail: zakh@pguas.ru

ГРНТИ: 29.31.29

Поступила в редакцию 12 мая 2023 г. Окончательный вариант – 7 августа 2023 г.

Diffractive elements in thermal imaging monofocal dual-band objectives: design and technological aspects

G.I. Greisukh¹, I.A. Levin², O.A. Zakharov¹

¹ Penza State University of Architecture and Construction,
440028, Russia, Penza, Germana Titova 28;

² PJSC "Krasnogorsky Zavod", 143400, Russia, Krasnogorsk, Rechnaya 8

Abstract

Using the example of the development of two simple dual-band monofocal IR objectives, approaches to the layout and design of their optical schemes are demonstrated, depending on whether compensation for the effects of temperature changes on the optical characteristics of these lenses is required or not. It is shown that in the case when thermal compensation is not required, superior optical characteristics can be achieved in a simple triplet, in which the flat surface of the frontal fractional lens carries a diffractive microstructure. In the case of passive athermalization, the optical scheme of the objective becomes more complicated and consists of refractive two-line power and correction components, in the latter of which the flat surface of one of the lenses carries a diffractive microstructure. Due to highly efficient diffractive microstructures, the longitudinal chromaticism of both objectives is reduced almost to the diffraction limit and, in combination with a low level of residual monochromatic aberrations at high light intensity, the maximum resolution is provided for uncooled microbolometers used as matrix receivers.

Keywords: diffractive optical element, monofocal dual-band IR objective, passive athermalization, apochromatization, optical circuit layout, optical characteristics.

Citation: Greisukh GI, Levin IA, Zakharov OA. Diffractive elements in thermal imaging monofocal dual-band objectives: design and technological aspects. *Computer Optics* 2024; 48(2): 210-216. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1336.

Acknowledgements: This work was funded by the Russian Science Foundation under project No. 20-19-00081.

Authors' information

Grigoriy Isaevitch Greisukh (b. 1943) graduated (1965) from Penza Politechnical Institute, majoring in Radio Engineering. He is the deserved worker of 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 250 scientific papers, 3 monographs, and 9 inventions. E-mail: grey@pguas.ru

Il'ya Anatolievich Levin (b. 1987) graduated (2009) from Penza State University, majoring in Physics. He is Ph.D (2013). He works as a leading design engineer of the department of development and design of lenses for TNP and GP PJSC "Krasnogorsk Plant named after S.A. Zverev". I.A. Levin is a specialist in the field of design of optical systems. The list of scientific works by I.A. Levin includes 15 articles and 9 patents. E-mail: i.a.levin@mail.ru

Oleg Alexandrovich Zakharov, (b. 1978), graduated (2001) from Penza State Pedagogical University, majoring in Physics. Candidate of Technical Sciences (2006), Associate Professor of Physics and Chemistry department of the Penza State University of Architecture and Construction. The list of scientific works by O.A. Zakharov includes 25 articles and 4 patents. E-mail: zakh@pguas.ru

Received May 12, 2023. The final version – August 7, 2023.
