

## 39. Дифракционные элементы в оптических системах ИК диапазона

Г. И. Грейсух<sup>1</sup>, В. А. Данилов<sup>2</sup>, Е. Г. Ежов<sup>1</sup>, А. И. Антонов<sup>1</sup>, Б. А. Усиевич<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия

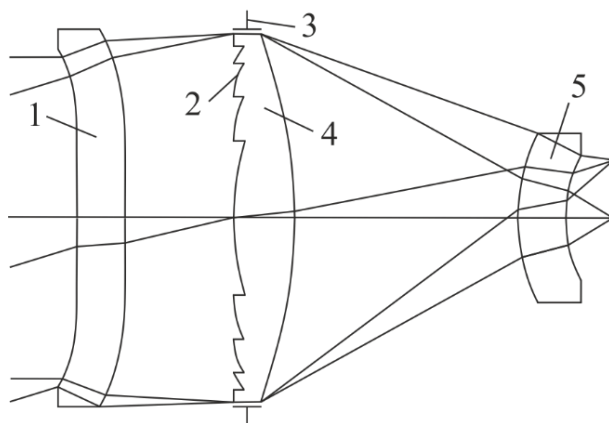
Показано, что размещение дифракционной микроструктуры на плоской поверхности одной из рефракционных линз высокоапертурного триплета позволяет одновременно выполнить условия коррекции как хроматических, так и монохроматических aberrаций и получить объективы, рассчитанные на средний и двойной ИК диапазоны, имеющие достаточно высокие оптические характеристики.

*Ключевые слова:* Средний и двойной ИК диапазоны, Объектив, Дифракционная микроструктура, Хроматические и монохроматические aberrации.

*Цитирование:* Грейсух, Г. И. Дифракционные элементы в оптических системах ИК диапазона / Г. И. Грейсух, В. А. Данилов, Е. Г. Ежов, А. И. Антонов, Б. А. Усиевич // HOLOEXPO 2019 : XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — С. 203–210.

### Введение

Уникальные aberrационные свойства дифракционных оптических элементов наиболее важное значение имеют для инфракрасного (ИК) диапазона. Это относится и к среднему ИК диапазону ( $3 \leq \lambda \leq 5$  мкм), и в еще большей степени к двойному диапазону, включающему средневолновый и длинноволновый ИК диапазоны ( $3 \leq \lambda \leq 11$  мкм). Действительно, введение такого элемента в рефракционный объектив тепловизора позволяет упростить его оптическую схему и получить при этом требуемые оптические характеристики [1, 2]. Так, например, размещение дифракционной микроструктуры на плоской поверхности одной из рефракционных линз высокоапертурного триплета позволяет одновременно выполнить условия коррекции как хроматических, так и монохроматических aberrаций не только в среднем, но и в двойном ИК диапазоне. Не менее важной представляется возможность отказаться от использования в триплете германия, обладающего высоким и нелинейным температурным коэффициентом показателя преломления. При замене германия на аморфное стекло, например, AMTIR3 или GASIR1, дифракционная микроструктура позволяет сохранить апохроматизацию и обеспечить низкий уровень сферохроматизма. Кроме того, незначительное тепловое изменение показателя преломления указанного стекла позволяет избежать тепловой дефокусировки.



1, 4, 5 – рефракционные линзы; 2 – дифракционная микроструктура; 3 – апертурная диафрагма

Рис. 1. Принципиальная оптическая схема ИК объектива

Таблица 1. Основные конструктивные параметры ИК объектива

№ поверхности	Радиус, мм	Толщина, мм	Оптический материал
0 <sup>a</sup>	$\infty$	$\infty$	
1	170,970	7	AMTIR3
2	376,847	16,861	
3 <sup>b</sup>	$\infty$	0	
4 <sup>c</sup>	$\infty$	7	ZnS
5	-71,778	29,855	
6	24,822	7	AMTIR3
7	20,283	6	
8 <sup>d</sup>	$\infty$		

### Конструктивные параметры и оптические характеристики рефракционно-дифракционного объектива среднего ИК диапазона

Описанные выше возможности демонстрируются на примере ИК объектива, две рефракционные линзы которого выполнены из стекла AMTIR3 (показатель преломления на длине волны  $\bar{\lambda} = 4$  мкм  $n_{\text{AMTIR}} = 2,621\,003$ , а коэффициент дисперсии при  $\lambda_{\text{min}} = 3$  мкм и  $\lambda_{\text{max}} = 5$  мкм  $\nu_{\text{AMTIR}} = 173,38$ ), третья же линза, несущая дифракционную микроструктуру, выполнена из сернистого цинка ( $n_{\text{ZnS}} = 2,250\,382$ ;  $\nu_{\text{ZnS}} = 112,20$ ). Показатели преломления и коэффициенты дисперсии, приведенные здесь и ниже, рассчитаны по дисперсионным формулам каталога INFRARED программы оптического проектирования ZEMAX [3] и работы [4].

Оптическая схема объектива представлена на рисунке 1. Его фокусное расстояние  $f = 40$  мм, диафрагменное число  $K = 0,84$ , а угловое поле в пространстве предметов  $2\omega = 24^\circ$ . Расстояние от вершинной касательной плоскости фронтальной линзы до плоскости изображения  $L = 73,7$  мм.

В табл. 1 и 2 представлены конструктивные параметры объектива, полученные после предварительного габаритного и абберационного расчета путем оптимизации с помощью

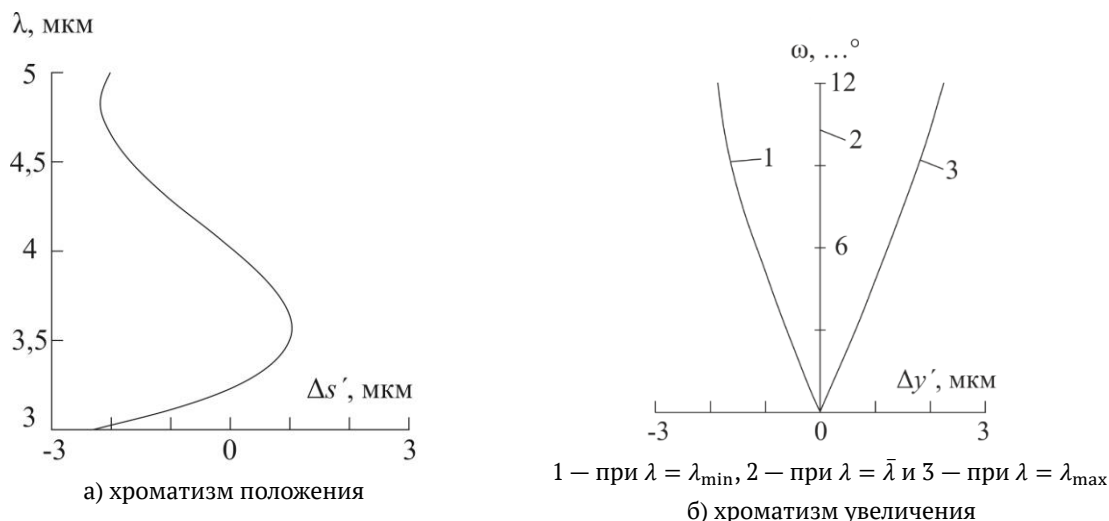


Рис. 2. Хроматизм первого порядка

Таблица 2. Данные о четных асферических поверхностях (коническая постоянная  $k=0$ )

№	$\alpha_2, \text{мм}^{-3}$	$\alpha_3, \text{мм}^{-5}$	$\alpha_4, \text{мм}^{-7}$	$\alpha_5, \text{мм}^{-9}$
1	$-7,19179 \times 10^{-6}$	$-5,04931 \times 10^{-9}$	$-1,28006 \times 10^{-12}$	$-3,23291 \times 10^{-15}$
2	$-6,38446 \times 10^{-6}$	$-2,94625 \times 10^{-9}$	$4,25107 \times 10^{-13}$	$3,69895 \times 10^{-16}$
5	$-8,85312 \times 10^{-7}$	$1,63519 \times 10^{-8}$	$-1,64264 \times 10^{-10}$	$3,90923 \times 10^{-15}$
6	$4,98013 \times 10^{-6}$	$2,87470 \times 10^{-7}$	$-3,81400 \times 10^{-9}$	$2,69047 \times 10^{-11}$

программы оптического проектирования ZEMAX [3]. При этом каждая из неплоских поверхностей рефракционных линз объектива представляла собой, так называемую чётную асферическую поверхность, описываемую в ZEMAX уравнением:

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

где  $z(\rho)$  — координата точки поверхности, отстоящей от оптической оси на расстоянии  $\rho$  в системе координат, плоскость  $XOY$  которой касается вершины этой поверхности;  $c$  — кривизна поверхности в её вершине;  $\kappa$  — коническая константа;  $\alpha_p$  — коэффициенты асферичности поверхности.

Что же касается дифракционной микроструктуры, размещенной на плоской фронтальной поверхности второй рефракционной линзы, то она в рамках ZEMAX моделировалась поверхностью типа Binary2 с фазовой задержкой вида

$$\Psi(\rho) = m \sum_{j=1} A_j \rho^{2j}, \quad (3)$$

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

Примечание к таблице 1: а — плоскость предмета; б — апертурная диафрагма; с — поверхность типа Binary2:  $m = 1$ ,  $A_1 = -0,293270 \text{ мм}^{-2}$ ,  $A_2 = 2,63695 \times 10^{-4} \text{ мм}^{-4}$ ,  $A_3 = -1,36419 \times 10^{-6} \text{ мм}^{-6}$ ,  $A_4 = 3,23954 \times 10^{-9} \text{ мм}^{-8}$ ,  $A_5 = -3,73643 \times 10^{-12} \text{ мм}^{-10}$ ,  $A_6 = 1,97365 \times 10^{-15} \text{ мм}^{-12}$ ,  $A_7 = -3,47328 \times 10^{-19} \text{ мм}^{-14}$ ; д — плоскость изображения.

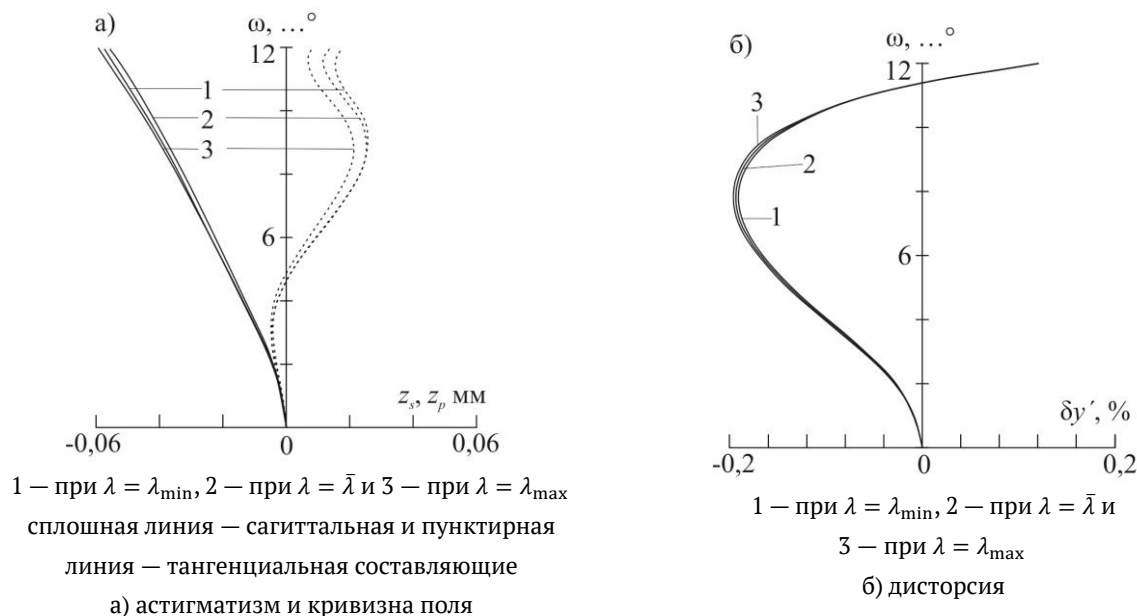
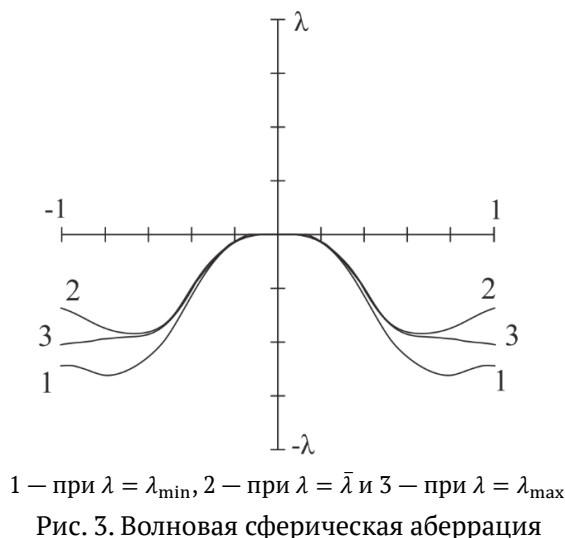
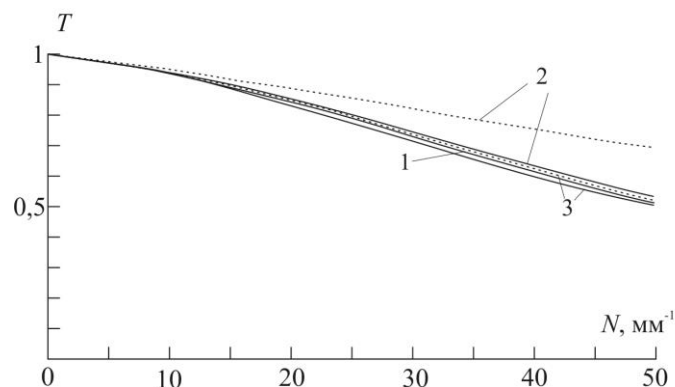


Рис. 4. Аберрации тонких пучков

Кривые лучевых aberrаций и волновой сферической aberrации, а также полихроматической частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) микрообъектива представлены на рисунках 2–5. ЧКХ рассчитана в плоскости наилучшей установки, совпадающей с параксиальной плоскостью изображения:  $s' = 6$  мм. Как следует из представленных кривых, полученный ИК объектив при относительном отверстии 1:0,84 обеспечивает разрешение  $50 \text{ мм}^{-1}$  при контрасте не ниже 0,5 и  $35 \text{ мм}^{-1}$  при контрасте не ниже 0,65 в пределах полевого угла  $2\omega \leq 24^\circ$ . Остаточный хроматизм положения в диапазоне от  $\lambda_{\min} = 3$  мкм до  $\lambda_{\max} = 5$  мкм не превышает 3,4 мкм при допуске, ограниченном дифракцией, равном 11,3 мкм. Хроматизм увеличения составляет 4,1 мкм, что несколько меньше радиуса главного максимума картины Эйри. Дисторсия объектива меньше 0,25 %.



1 — при  $\omega = 0$ ; 2 — при  $\omega = 6^\circ$  и 3 — при  $\omega = 12^\circ$  для меридиональной (пунктирная линия) и сагиттальной (сплошная линия) плоскостей, соответственно

Рис. 5. Дифракционная полихроматическая ЧКХ ИК объектива

### Конструктивные параметры и оптические характеристики рефракционно-дифракционного объектива двойного ИК диапазона

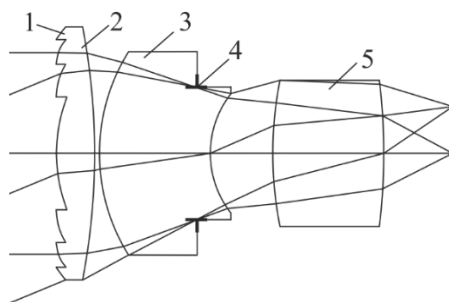
Аберрационный расчет и последующая оптимизация с помощью программы оптического проектирования ZEMAX показали, что рефракционно-дифракционный триплет, после соответствующей модификации оптической схемы (см. рисунок 6 и табл. 3), способен успешно работать и в двойном ИК диапазоне. При этом сохраняются апохроматическая коррекция продольного хроматизма с третичным спектром, не превышающим допуск, ограниченный дифракцией, и коррекция хроматизма увеличения до величины порядка радиуса главного максимума картины Эйри.

Однако хроматические aberrации высших порядков с расширением спектрального диапазона ощутимо возросли, что привело к снижению апертуры ( $K = 1,1$ ) и разрешения. В пределах того же углового поля, на которое рассчитан выше представленный объектив среднего ИК диапазона ( $2\omega \leq 24^\circ$ ) данный объектив двойного ИК диапазона обеспечивает разрешение  $35 \text{ мм}^{-1}$  при контрасте не ниже 0,3 и  $25 \text{ мм}^{-1}$  при контрасте не ниже 0,5. Фокусное расстояние объектива по-прежнему  $f = 40 \text{ мм}$ , а расстояние от вершинной касательной плоскости фронтальной линзы до плоскости изображения  $L = 69,03 \text{ мм}$ . Дисторсия не превышает 0,3 %.

Примечание к таблице 3: a — плоскость предмета; b — поверхность типа Binary2; c — апертурная диафрагма; d — плоскость изображения. Все неплоские поверхности асферические.

### Дифракционная эффективность ИК киноформа и пути ее повышения

Дифракционная микроструктура, моделируемая в Zemax бесконечно тонким транспарантом, осуществляющим заданную фазовую задержку, в реальности выполняется в виде киноформа, т. е. пилообразного рельефа в поверхности оптического материала. Сегодня хорошо отлаженная технология алмазного точения позволяет в промышленных масштабах тиражировать гибридные элементы ИК диапазона с киноформной микроструктурой, выполненной в плоской, сферической или даже асферической поверхности рефракционной линзы [5].



1 — дифракционная микроструктура; 2, 3, 5 — рефракционные линзы; 4 — апертурная диафрагма

Рис. 6. Принципиальная оптическая схема объектива двойного ИК диапазона

Таблица 3. Основные конструктивные параметры объектива двойного ИК диапазона

№ поверхности	Радиус, мм	Толщина, мм	Оптический материал
0 <sup>a</sup>	$\infty$	$\infty$	
1 <sup>b</sup>	$\infty$	5	GASIR1
2	-117,261	0,9	
3	33,82	17,356	ZnS_broad
4 <sup>c</sup>	$\infty$	2,644	ZnS_broad
5	16,153	10,684	
6	55,274	20	GASIR1
7	-94,313	12,444	
8 <sup>d</sup>	$\infty$		

Дифракционная эффективность (ДЭ) киноформной микроструктуры может приближаться к единице, но только на одной длине волны и при одном угле падения излучения, а достоверную оценку падения ДЭ в зависимости от длины волны и угла падения дает только строгая теория дифракции, основанная на решении системы уравнений Максвелла. Расчет ДЭ киноформных микроструктур обоих объективов, описанных в настоящей работе, выполнялся методом строгого анализа связанных волн [rigorous coupled-wave analysis (RCWA)] [6]. При этом расчет микроструктур объектива среднего ИК диапазона выполнялся с использованием разработанной авторами компьютерной программы RCWA-PSUACE, а — микроструктур объектива двойного ИК диапазона с использованием компьютерной программы, представленной в работе [7].

Киноформная микроструктура объектива среднего ИК диапазона, состоит из 33 кольцевых зон. При этом ширина самой узкой зоны (минимальный период киноформа) превышает 400 мкм, а максимальный угол падения излучения на микроструктуру из воздуха  $\theta \leq 13,5^\circ$ . Расчет показал, что ДЭ этого киноформа при оптимальной глубине рельефа ( $h = 3,2$  мкм), благодаря значительному отношению пространственного периода микроструктуры к глубине рельефа ( $\Lambda/h > 125$ ) оказалась близкой к пределу, прогнозируемому скалярной теорией дифракции, т. е. не ниже 0,8 во всем рабочем спектральном диапазоне. При этом двадцать про-

центров падающей на киноформ энергии, приходящиеся на побочные дифракционные порядки, неминуемо приведут к падению контраста в формируемом объективом изображении и в ряде случаев к недопустимому снижению отношения сигнал/шум. Поднять ДЭ во всем спектральном диапазоне и для всего интервала углов падения излучения до уровня 0,85 и даже до 0,95 можно путем перехода к двух- или трехслойным киноформным микроструктурам.

Так, в частности, двухслойная однорельефная микроструктура, скомпонованная из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{ZnS}$  ( $n_1 = 1,660\,731$ ,  $n_2 = 2,250\,382$ ) при оптимальной глубине рельефа ( $h = 6,72$  мкм), углах падения излучения  $-15 \leq \theta \leq 15^\circ$  и в спектральном диапазоне  $3 \leq \lambda \leq 5$  мкм обеспечивает ДЭ  $\leq 0,87$  при  $\Lambda/h \leq 5$  и ДЭ  $\geq 0,90$  при  $\Lambda/h \geq 30$ .

Трехслойная же микроструктура при оптимальных глубинах двух рельефов ( $h_1 = 18,76$  мкм,  $h_2 = 10,96$  мкм), скомпонованная из  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgF}_2$  и  $\text{ZnS}$  ( $n_1 = 1,660\,731$ ,  $n_2 = 1,348\,829$ ,  $n_3 = 2,250\,382$ ) в тех же угловом и спектральном диапазонах обеспечивает ДЭ  $\leq 0,92$  при  $\Lambda/(h_1 + h_2) \leq 5$  и ДЭ  $\geq 0,95$  при  $\Lambda/(h_1 + h_2) \geq 30$ .

Киноформная микроструктура, представленного выше объектива двойного ИК диапазона состоит всего из 5 кольцевых зон и выполняется в плоской поверхности оптического материала GASIR1 (показатель преломления на длине волны  $\bar{\lambda} = 7,35$  мкм  $n_{\text{GASIR1}} = 2,501\,489$ , а коэффициент дисперсии при  $\lambda_{\min} = 3,7$  мкм и  $\lambda_{\max} = 11$  мкм  $v_{\text{GASIR1}} = 74,84$ ). При этом ширина самой узкой зоны, т. е. минимальный период киноформа  $\Lambda > 2,8$  мкм, а максимальный угол падения излучения на микроструктуру из воздуха  $\theta \leq 12^\circ$ . Расчет показал, что при оптимальной глубине рельефа  $h = 3,7$  мкм ДЭ на краях рабочего спектрального диапазона ( $3,7 \leq \lambda \leq 11$  мкм) будет опускаться до 0,4 даже при очень больших отношениях пространственного периода микроструктуры к глубине рельефа.

В случае двухслойной однорельефной микроструктуры, скомпонованной из GASIR1 и  $\text{ZnS}_{\text{broad}}$  (показатель преломления на длине волны  $\bar{\lambda} = 7,35$  мкм  $n_{\text{ZnS}_{\text{broad}}} = 2,228\,805$ , а коэффициент дисперсии при  $\lambda_{\min} = 3,7$  мкм и  $\lambda_{\max} = 11$  мкм  $v_{\text{ZnS}_{\text{broad}}} = 18,03$ ) при оптимальной глубине рельефа ( $h = 20,43$  мкм) ДЭ  $\leq 0,52$ . Ситуация становится принципиально иной при компоновке микроструктуры из этих же материалов, но с двумя рельефами разной глубины ( $h_1 = 132$  мкм,  $h_2 = 155,8$  мкм). Несмотря на столь значительную суммарную глубину рельефа и благодаря большому отношению пространственного периода микроструктуры к суммарной глубине ( $\Lambda/h \approx 10$ ) ДЭ  $\geq 0,90$ .

### Заключение

Результаты исследований, представленные в настоящей работе, наглядно демонстрируют эффективность использования дифракционных элементов в объективах среднего и двойного ИК диапазонов. Показано, что размещение дифракционной микроструктуры на плоской поверхности одной из рефракционных линз высокоапертурного триплета позволяет одновременно выполнить условия коррекции как хроматических, так и монохроматических aberrаций и достичь достаточно высоких оптических характеристик. В то же время значительная

ширина рабочего спектрального диапазона вынуждает для обеспечения приемлемой ДЭ пилообразной рельефной микроструктуры переходить к двухслойным одно- или двухрельефным микроструктурам. При этом глубины рельефов многократно возрастают, что существенно ограничивает допустимые минимальный пространственный период микроструктуры и углы падения излучения на нее. Это в свою очередь накладывает определенные ограничения на размещение микроструктуры в пределах оптической схемы объектива [8]. Однако, как показано в настоящей работе, скомпоновать оптическую схему объектива, обеспечивающую надлежащую коррекцию aberrаций при приемлемых минимальном пространственном периоде дифракционной микроструктуры и углах падения излучения на нее, удастся даже в простейшем случае триплета.

### Список источников

- [1] **Wang, H.** Hybrid refractive/diffractive optical system design for light and compact uncooled longwave infrared imager / H. Wang, Y. Bai, J. Luo // Proc. of SPIE. — Vol. 8416. — P. 84162N-1.
- [2] **Бездидько, С. Н.** Компактный объектив среднего ИК диапазона / С. Н. Бездидько, А. В. Тарасишин // Патент России № 2621366.
- [3] **ZEMAX:** software for optical system design. — URL: <http://www.radiantzemax.com>.
- [4] **Xie, H.** Design of high-efficiency diffractive optical elements towards ultrafast mid-infrared timestretched imaging and spectroscopy / H. Xie, D. Ren, C. Wang, C. Mao, L. Yang // Journal of Modern Optics. — 2018. — Vol. 65. — № 3. — P. 255–261.
- [5] **Edmund Optics:** Germanium Infrared (IR) Hybrid Aspheric Lenses. — URL: <https://www.edmundoptics.com/f/germanium-infrared-ir-hybrid-aspheric-lense>. — 14182.
- [6] **Moharam, M. G.** Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction / M. G. Moharam, T. K. Gaylord // J. Opt. Soc. Am. — 1981. — Vol. 71. — № 7. — P. 811–818.
- [7] **Lyndin, N. M.** Modal and C Methods Grating Design and Analysis Software. — URL: <http://www.mcgrating.com>
- [8] **Грейсух, Г. И.** Учет дифракционной эффективности при проектировании рефракционно-дифракционных оптических систем / Г. И. Грейсух, В. А. Данилов, Е. Г. Ежов, С. А. Степанов // Оптический журнал. — 2016. — Том 83. — № 3. — С. 32–38.