



# Дифракционные элементы в оптических системах среднего и двойного ИК-диапазона

Г. И. Грейсук<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> ФГБОУВО Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, [www.pguas.ru](http://www.pguas.ru), Пенза, Россия

<sup>2</sup> ФГБУН Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, [www.ntcup.ru](http://www.ntcup.ru), Москва, Россия

<sup>3</sup> ФГБУН Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, [www.gpi.ru](http://www.gpi.ru), 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 инфракрасные диапазоны, имеющие достаточно высокие оптические характеристики.**

**Ключевые слова:** средний и двойной ИК-диапазоны, объектив, дифракционная микроструктура, хроматические и монохроматические aberrации

Статья получена: 26.12.2019  
Принята к публикации: 21.01.2020

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из направлений оптического приборостроения, развитие которого наиболее востребовано, является направление, связанное с разработкой и созданием монофо-

# Diffractive Elements in Optical Systems of Middle and Double IR Range

G. I. Greysukh<sup>1</sup>, V. A. Danilov<sup>2</sup>, E. G. Ezhov<sup>1</sup>, A. I. Antonov<sup>1</sup>, B. A. Usievich<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Penza State University of Architecture and Construction, [www.pguas.ru](http://www.pguas.ru), Penza, Russia

<sup>2</sup> Scientific and Technological Center for Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, [www.ntcup.ru](http://www.ntcup.ru), Moscow, Russia

<sup>3</sup> A. M. Prokhorov Institute of General Physics of the Russian Academy of Sciences, [www.gpi.ru](http://www.gpi.ru), Moscow, Russia

**It is shown that placing a diffraction microstructure on the flat surface of one of the refractive lenses of a high-aperture triplet can simultaneously satisfy the correction conditions for both chromatic and monochromatic aberrations and obtain lenses designed for the middle and double infrared ranges having sufficiently high optical characteristics.**

**Key words:** middle and double IR ranges, lens, diffraction microstructure, chromatic and monochromatic aberrations

Received: 26.12.2019

Accepted: 21.01.2020

## INTRODUCTION

Currently, one of the areas of optical instrumentation, the development of which is most in demand, is the direction associated with the development and creation of monofocal optics and optics with variable focal length, designed to work in extended spectral ranges. In the visible and near infrared (IR) ranges, this is primarily the mass optics of mobile phones, smartphones and tablets, as well as security systems and technical vision (in particular, unmanned land, underwater and air vehicles). In the dual IR range, including medium and far infrared radiation (3.7–11 microns), this is the optics of thermal imagers and night vision devices for various purposes. High-quality optics of all the above ranges is also necessary for medical instrumentation. At the same time, it is obvious that in order to meet the increasing requirements for the overall dimensions and technical characteristics of optical systems, it is necessary to expand the elemental base and the range of optical materials.

кальной оптики и оптики с изменяющимся фокусным расстоянием, предназначенной для работы в расширенных спектральных диапазонах. В видимом и ближнем инфракрасных (ИК) диапазонах это прежде всего массовая оптика мобильных телефонов, смартфонов и планшетов, а также систем безопасности и технического зрения (в частности, беспилотных наземных, подводных и воздушных транспортных средств). В двойном ИК-диапазоне, включающем среднее и дальнее ИК-излучение (3,7–11 мкм), это оптика тепловизоров и приборов ночного видения различного назначения. Высококачественная оптика всех вышеперечисленных диапазонов необходима также и медицинскому приборостроению. При этом очевидно, что для удовлетворения все возрастающих требований к массогабаритным и техническим характеристикам оптических систем необходимо расширение элементной базы и ассортимента оптических материалов.

Один из возможных путей расширения элементной базы предполагает использование дифракционных оптических элементов (ДОЭ). При этом уникальные абберационные свойства ДОЭ дают наибольший эффект 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, 2]). Так, в частности, в среднем ИК-диапазоне ( $3 \leq \lambda \leq 5$  мкм) размещение дифракционной микроструктуры на плоской поверхности одной из рефракционных линз высокоапертурного триплета позволяет одновременно выполнить условия коррекции как хроматических, так и монохроматических аббераций. Не менее важной представляется возможность отказаться от использования в триплете германия, обладающего высоким и нелинейным температурным коэффициентом показателя преломления. При замене германия на халькогенидное стекло дифракционная микроструктура обеспечивает возможность сохранения апохроматизации и низкого уровня сферохроматизма, а незначительное тепловое изменение показателя преломления халькогенидного стекла позволяет избежать тепловой дефокусировки. Более того, использование ДОЭ, как будет показано в настоящей статье, весьма эффективно и в объективах двойного ИК-диапазона, причем как монофокальных, так и с механически изменяемым фокусным расстоянием (zoom-объективах).

One of the possible ways to expand the elemental base involves the use of diffractive optical elements (DOE). Moreover, the unique aberration properties of DOEs give the greatest effect in the infrared range. Indeed, the introduction of such an element into the refractive lens of a thermal imager allows us to simplify its optical design and achieve the required optical characteristics (see, for example, [1, 2]). So, in particular, in the mid-IR range ( $3 \leq \lambda \leq 5$   $\mu\text{m}$ ), the placement of the diffraction microstructure on the flat surface of one of the refractive lenses of a high-aperture triplet allows simultaneous fulfillment of the correction conditions for both chromatic and monochromatic aberrations. Equally important is the ability to refuse to use germanium in a triplet, which has a high and non-linear temperature coefficient of refractive index. When germanium is replaced by chalcogenide glass, the diffraction microstructure makes it possible to maintain apochromatization and a low level of spherochromatism, and a slight thermal change in the refractive index of chalcogenide glass avoids thermal defocusing. Moreover, the use of DOEs, as will be shown in this article, is very effective in dual IR range lenses, both monofocal and mechanically variable focal length (zoom lenses).

## 1. DESIGN PARAMETERS AND OPTICAL CHARACTERISTICS OF THE MIDDLE IR RANGE REFRACTIVE-DIFFRACTIVE LENS

We will demonstrate the above-described capabilities using an IR lens as an example, two refractive lenses of which are made of AMTIR3 glass (refractive index at a wavelength of  $\bar{\lambda}=4$   $\mu\text{m}$   $n_{\text{AMTIR}}=2.621003$ , and a dispersion coefficient of  $\lambda_{\text{min}}=3$   $\mu\text{m}$  and  $\lambda_{\text{max}}=5$   $\mu\text{m}$ ,  $v_{\text{AMTIR}}=173.38$ ), while the third lens, bearing the diffraction microstructure, is made of zinc sulfide ( $n_{\text{ZnS}}=2.250382$ ;  $v_{\text{ZnS}}=112.20$ ). The refractive indices and dispersion coefficients given here and below were calculated using the dispersion formulas of the INFRARED catalog of the ZEMAX optical design program [3] and work [4].

The optical scheme of the lens is shown in Fig. 1. Its focal length is  $f=40$  mm, the aperture value is  $K=0.84$ , and the angular field in the space of objects is  $2\omega=24^\circ$ . The distance from the vertex tangent plane of the front lens to the image plane is  $L=73,7$  mm.

Tables 1 and 2 show the design parameters of the lens obtained after preliminary dimensional and aberration calculations by optimization using the ZEMAX optical design program [3]. Moreover, each of the non-planar surfaces of the refractive lenses of the lens was a so-called even aspherical surface, described in ZEMAX by the equation:

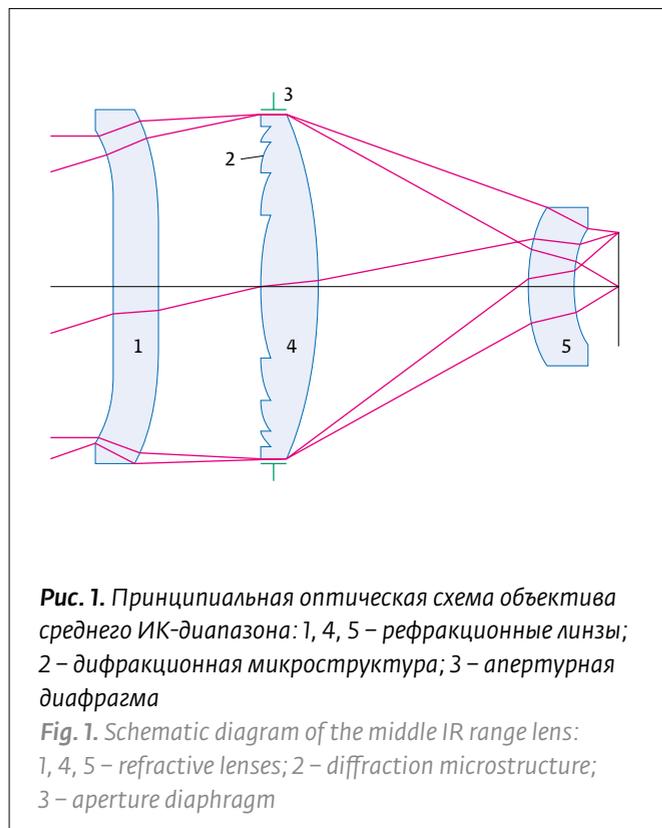
$$z(\rho) = \frac{c\rho^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + \kappa)c^2\rho^2}} + \sum_{p=2} \alpha_p \rho^{2p},$$

## 1. КОНСТРУКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕФРАКЦИОННО-ДИФРАКЦИОННОГО ОБЪЕКТИВА СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА

Описанные выше возможности продемонстрируем на примере ИК объектива, две рефракционные линзы которого выполнены из стекла AMTIR3 (показатель преломления на длине волны  $\bar{\lambda}=4$  мкм  $n_{\text{AMTIR3}}=2,621003$ , а коэффициент дисперсии при  $\lambda_{\text{min}}=3$  мкм и  $\lambda_{\text{max}}=5$  мкм  $v_{\text{AMTIR3}}=173,38$ ), третья же линза, несущая дифракционную микроструктуру, выполнена из сернистого цинка ( $n_{\text{ZnS}}=2,250382$ ;  $v_{\text{ZnS}}=112,20$ ). 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 рис. 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 пред-



where  $z(\rho)$  is the coordinate of a surface point spaced apart from the optical axis by a distance  $\rho$  in the coordinate system whose  $XOY$  plane touches the top of this surface;  $c$  is the curvature of the surface at its apex;  $\kappa$  is a conical constant;  $\alpha_p$  – surface asphericity coefficients.

As for the diffraction microstructure placed on the flat frontal surface of the second refractive lens, it was modeled in the framework of ZEMAX by a Binary2 type surface with a phase delay of the form

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

where  $m$  is the number of the working diffraction order,  $A_j$  are constant coefficients.

This IR lens with a relative aperture of 1:0.84 provides a resolution of  $50 \text{ mm}^{-1}$  with a contrast of at

**Таблица 1.** Основные конструктивные параметры объектива среднего ИК-диапазона

**Table 1.** Main design parameters of the middle IR range lens

№ поверхности No. of surface	Радиус, мм Radius, mm	Толщина, мм Thickness, mm	Оптический материал Optical material
0*	$\infty$	$\infty$	
1	170,970	7	AMTIR3
2	376,847	16,861	
3**	$\infty$	0	
4***	$\infty$	7	ZnS
5	-71,778	29,855	
6	24,822	7	AMTIR3
7	20,283	6	
8****	$\infty$		

\* Плоскость предмета.

\*\* Апертурная диафрагма.

\*\*\* Поверхность типа Binary2:  $m=1$ ,  $A_1=-0,293270 \text{ мм}^{-2}$ ,  $A_2=2,63695 \times 10^{-4} \text{ мм}^{-4}$ ,  $A_3=-1,36419 \times 10^{-6} \text{ мм}^{-6}$ ,  $A_4=3,23954 \times 10^{-9} \text{ мм}^{-8}$ ,  $A_5=-3,73643 \times 10^{-12} \text{ мм}^{-10}$ ,  $A_6=1,97365 \times 10^{-15} \text{ мм}^{-12}$ ,  $A_7=-3,47328 \times 10^{-19} \text{ мм}^{-14}$ .

\*\*\*\* Плоскость изображения.

\* Object plane.

\*\* Aperture diaphragm.

\*\*\* Binary2 type surface:  $m=1$ ,  $A_1=-0.293270 \text{ mm}^{-2}$ ,  $A_2=2.63695 \times 10^{-4} \text{ mm}^{-4}$ ,  $A_3=-1.36419 \times 10^{-6} \text{ mm}^{-6}$ ,  $A_4=3.23954 \times 10^{-9} \text{ mm}^{-8}$ ,  $A_5=-3.73643 \times 10^{-12} \text{ mm}^{-10}$ ,  $A_6=1.97365 \times 10^{-15} \text{ mm}^{-12}$ ,  $A_7=-3.47328 \times 10^{-19} \text{ mm}^{-14}$ .

\*\*\*\* Image plane.

**Таблица 2.** Данные о четных асферических поверхностях объектива среднего ИК-диапазона (коническая постоянная  $k=0$ )

**Table 2.** Data on even aspherical surfaces of the middle IR range lens (conical constant  $k=0$ )

№	$\alpha_2, \text{мм}^{-3}$ $\alpha_2, \text{mm}^{-3}$	$\alpha_3, \text{мм}^{-5}$ $\alpha_3, \text{mm}^{-5}$	$\alpha_4, \text{мм}^{-7}$ $\alpha_4, \text{mm}^{-7}$	$\alpha_5, \text{мм}^{-9}$ $\alpha_5, \text{mm}^{-9}$
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	$-8,85312 \times 10^{-7}$	$1,63519 \times 10^{-8}$	$-1,64264 \times 10^{-10}$	$3,90923 \times 10^{-13}$
6	$4,98013 \times 10^{-6}$	$2,87470 \times 10^{-7}$	$-3,81400 \times 10^{-9}$	$2,69047 \times 10^{-11}$

варительного габаритного и абберационного расчета путем оптимизации с помощью программы оптического проектирования ZEMAX [3]. При этом каждая из неплоских поверхностей рефракционных линз объектива представляла собой так называемую четную асферическую поверхность, описываемую в ZEMAX уравнением:

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

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 ее вершине;  $k$  – 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

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

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

Данный 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  $\lambda_{\min} = 3 \text{ мкм}$  до  $\lambda_{\max} = 5 \text{ мкм}$  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%.

least 0.5 and  $35 \text{ мм}^{-1}$  with a contrast of at least 0.65 within a field angle of  $2\omega \leq 24^\circ$ . The residual position chromatism in the range from  $\lambda_{\min} = 3 \text{ мкм}$  to  $\lambda_{\max} = 5 \text{ мкм}$  does not exceed 3.4 мкм with a tolerance limited by diffraction equal to 11.3 мкм. The chromaticity of the increase is 4.1 мкм, which is slightly smaller than the radius of the main maximum of the Airy picture. Lens distortion is less than 0.25%.

## 2. DESIGN PARAMETERS AND OPTICAL CHARACTERISTICS OF THE DOUBLE IR RANGE REFRACTIVE-DIFFRACTION LENS

Aberration calculation and subsequent optimization using ZEMAX optical design programs have shown that the refractive-diffraction triplet, after a corresponding modification of the optical scheme, is able to successfully operate in the double IR range [5]. The modification of the optical scheme included, in particular, the replacement of the used optical materials with GASIRI (refractive index at a wavelength of  $\bar{\lambda} = 7.35 \text{ мкм}$   $n_{\text{GASIRI}} = 2.501489$ , and the dispersion coefficient at  $\lambda_{\min} = 3.7 \text{ мкм}$  and  $\lambda_{\max} = 11 \text{ мкм}$   $v_{\text{GASIRI}} = 74.84$ ) and ZnS\_broad ( $n_{\text{ZnS\_broad}} = 2.228805$ ;  $v_{\text{ZnS\_broad}} = 18.03$ ).

For the obtained lens (see Fig. 2, Tables 3 and 4), the apochromatic correction of longitudinal chromatism with a tertiary spectrum not exceeding the tolerance limited by diffraction and correction of chromaticity increase to a value on the order of the radius of the main maximum of the Airy picture are preserved in the double IR range.

However, chromatic aberrations of higher orders with an expansion of the spectral range increased significantly, which led to a decrease in aperture ( $K=1.1$ ) and resolution. Within the same angular field for which the above-presented mid-IR lens ( $2\omega \leq 24^\circ$ ) is designed, this dual-IR lens provides a resolution of  $35 \text{ мм}^{-1}$  with a contrast of at least 0.3 and  $25 \text{ мм}^{-1}$  with contrast not lower than 0.5. The focal length of the lens is still  $f = 40 \text{ мм}$ , and the distance from the vertex

## 2. 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 способен успешно работать и в двойном ИК диапазоне [5]. Модификация оптической схемы включала, в частности, замену используемых оптических материалов на CASIRI (показатель преломления на длине волны  $\bar{\lambda}=7,35$  мкм  $n_{\text{CASIRI}}=2,501489$ , а коэффициент дисперсии при  $\lambda_{\text{min}}=3,7$  мкм и  $\lambda_{\text{max}}=11$  мкм  $v_{\text{CASIRI}}=74,84$ ) и ZnS\_broad ( $n_{\text{ZnS\_broad}}=2,228805$ ;  $v_{\text{ZnS\_broad}}=18,03$ ).

У полученного объектива (см. рис. 2, табл. 3 и 4) в двойном ИК диапазоне сохранены 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 аберрации 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  $f=40$  мм, а расстояние от вершинной касательной плоскости фронтальной линзы до плоскости изображения  $L=69,03$  мм. Дисторсия не превышает 0,3%.

## 3. 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 на поверхности оптического материала. Сегодня хорошо отлаженная технология алмазного точения позволяет в промышленных масштабах тиражировать гибридные элементы ИК диапазона с киноформной микроструктурой, выполненной в плоской, сфериче-

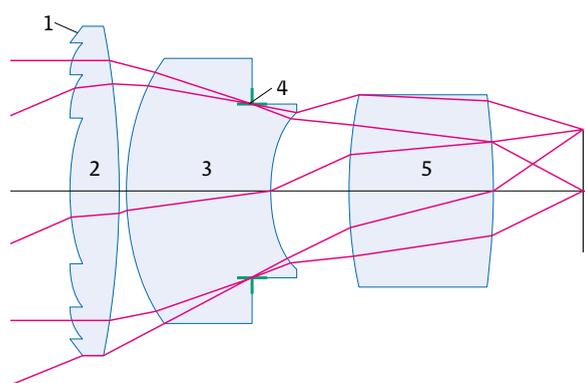
tangent plane of the front lens to the image plane is  $L=69.03$  mm. Distortion does not exceed 0.3%.

## 3. DIFFRACTION EFFICIENCY OF IR KINIFORM AND WAYS TO INCREASE IT

The diffraction microstructure modeled in Zemax by an infinitely thin banner that performs a given phase delay is actually performed in the form of a kinoform, i. e. sawtooth relief on the surface of the optical material. Today, a well-established technology of diamond turning allows the industrial production of hybrid elements of the IR range with a kinoform microstructure made on a flat, spherical or even aspherical surface of a refractive lens [6].

The diffraction efficiency (DE) of a kinoform microstructure can approach unity, but only at a single wavelength and at a single angle of incidence of radiation, and only a strict theory of diffraction based on the solution of the Maxwell equation system gives a reliable estimate of the decrease in DE depending on the wavelength and angle of incidence. The DE of kinoform microstructures of both lenses described in this work was calculated by rigorous coupled-wave analysis (RCWA) [7]. In this case, the calculation of the microstructures of the mid-IR lens was performed using the RCWA-PSUACE computer program developed by the authors, and the microstructures of the dual-IR lens using the computer program presented in [8].

The kinoform microstructure of the middle IR range lens consists of 33 ring zones. In this case, the width of the narrowest zone (the minimum period of the kino-



**Рис. 2.** Принципиальная оптическая схема объектива двойного ИК-диапазона: 1 – дифракционная микроструктура; 2, 3, 5 – рефракционные линзы; 4 – апертурная диафрагма

**Fig. 2.** Schematic diagram of a dual IR range lens: 1 – diffraction microstructure; 2, 3, 5 – refractive lenses; 4 – aperture diaphragm

ской или даже асферической поверхности рефракционной линзы [6].

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)] [7]. 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 [8].

Киноформная микроструктура объектива среднего ИК диапазона состоит из 33 кольцевых зон. При этом ширина самой узкой зоны (минимальный период киноформа)  $P > 400$  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 ( $P/h > 125$ ), оказалась близкой к пределу, прогнозируемому скалярной теорией дифракции, т.е. не ниже 0,8 во всем рабочем спектральном диапазоне. При этом двадцать процентов 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.

**Таблица 3.** Основные конструктивные параметры объектива двойного ИК-диапазона

**Table 3.** Main design parameters of the dual IR range lens

№ поверхности No. of surface	Радиус, мм Radius, mm	Толщина, мм Thickness, mm	Оптический материал Optical material
0°	$\infty$	$\infty$	
1**	$\infty$	5	GASIR1
2	-117,261	0,9	
3	33,82	17,356	ZnS_broad
4***	$\infty$	2,644	ZnS_broad
5	16,153	10,684	
6	55,274	20	GASIR1
7	-94,313	12,444	
8****	$\infty$		

\* Плоскость предмета.

\*\* Поверхность типа Binary2:  $m=1$ ,  $A_1=-0,120730$  мм<sup>-2</sup>,  
 $A_2=2,35222 \times 10^{-4}$  мм<sup>-4</sup>,  $A_3=-7,53758 \times 10^{-7}$  мм<sup>-6</sup>,  
 $A_4=2,95736 \times 10^{-9}$  мм<sup>-8</sup>,  $A_5=-9,04286 \times 10^{-12}$  мм<sup>-10</sup>,  
 $A_6=1,47517 \times 10^{-14}$  мм<sup>-12</sup>,  $A_7=-9,26221 \times 10^{-18}$  мм<sup>-14</sup>.

\*\*\* Апертурная диафрагма.

\*\*\*\* Плоскость изображения.

\* Object plane.

\*\* Aperture diaphragm.

\*\*\* Binary2 type surface:  $m=1$ ,  $A_1=-0.120730$  mm<sup>-2</sup>,  
 $A_2=2.35222 \times 10^{-4}$  mm<sup>-4</sup>,  $A_3=-7.53758 \times 10^{-7}$  mm<sup>-6</sup>,  
 $A_4=2.95736 \times 10^{-9}$  mm<sup>-8</sup>,  $A_5=-9.04286 \times 10^{-12}$  mm<sup>-10</sup>,  
 $A_6=1.47517 \times 10^{-14}$  mm<sup>-12</sup>,  $A_7=-9.26221 \times 10^{-18}$  mm<sup>-14</sup>.

\*\*\*\* Image plane.

**Таблица 4.** Данные о четных асферических поверхностях объектива двойного ИК-диапазона (коническая постоянная  $k=0$ )

**Table 4.** Data on even aspherical surfaces of the dual IR range lens (conical constant  $k=0$ )

№	$\alpha_2$ , мм <sup>-3</sup> $\alpha_2$ , mm <sup>-3</sup>	$\alpha_3$ , мм <sup>-5</sup> $\alpha_3$ , mm <sup>-5</sup>	$\alpha_4$ , мм <sup>-7</sup> $\alpha_4$ , mm <sup>-7</sup>	$\alpha_5$ , мм <sup>-9</sup> $\alpha_5$ , mm <sup>-9</sup>
2	$-6,33829 \times 10^{-7}$	$5,35875 \times 10^{-9}$	$-7,88732 \times 10^{-12}$	$4,31504 \times 10^{-15}$
3	$-4,89559 \times 10^{-6}$	$8,70405 \times 10^{-10}$	$1,52122 \times 10^{-12}$	$-1,43474 \times 10^{-14}$
5	$-3,12592 \times 10^{-5}$	$-1,21270 \times 10^{-7}$	$3,26480 \times 10^{-10}$	$-2,35539 \times 10^{-12}$
6	$1,83209 \times 10^{-6}$	$-4,66089 \times 10^{-9}$	$1,76607 \times 10^{-11}$	$-4,23797 \times 10^{-14}$
7	$3,28870 \times 10^{-6}$	$1,10840 \times 10^{-8}$	$-9,24665 \times 10^{-11}$	$2,98402 \times 10^{-13}$

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 одно-рельфная микроструктура (см. рис. 3), скомпонованная из  $Al_2O_3$  и ZnS ( $n_1=1,660731$ ,  $n_2=2,250382$ ) при оптимальной глубине рельефа ( $h=6,72$  мкм), углах падения излучения  $-15^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$  и в спектральном диапазоне  $3 \leq \lambda \leq 5$  мкм обеспечивает ДЭ  $\leq 0,87$  при  $P/h \leq 5$  и ДЭ  $\geq 0,90$  при  $P/h \geq 30$ .

Здесь сразу же заметим, что современные технологии позволяют, используя плоскую поверхность рефракционной линзы как подложку, нанести на нее слой другого ИК-прозрачного материала с толщиной, достаточной для выполнения в нем пилообразного рельефа, а его в свою очередь покрыть еще одним слоем, который и завершит формирование двухслойной однорельфной пилообразной микроструктуры. Анализ показал, что лучшей парой материалов для такой микроструктуры в спектральном диапазоне  $3 \leq \lambda \leq 5$  мкм могут служить  $Al_2O_3$  и AgCl ( $n_2=1,99996$ ). При оптимальной глубине рельефа ( $h=12,22$  мкм) и углах падения излучения  $-15^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$  эта микроструктура обеспечивает ДЭ  $\leq 0,9$  при  $P/h \leq 5$  и ДЭ  $\geq 0,92$  при  $P/h \geq 30$ .

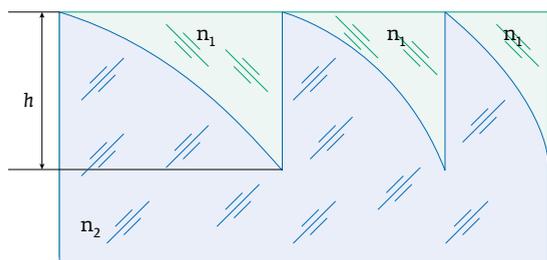
Трехслойная же микроструктура (см. рис. 4) при оптимальных глубинах двух рельефов ( $h_1=18,76$  мкм,  $h_2=10,96$  мкм), скомпонованная из  $Al_2O_3$ ,  $MgF_2$  и ZnS ( $n_1=1,660731$ ,  $n_2=1,348829$ ,  $n_3=2,250382$ ) в тех же угловом и спектральном диапазонах обеспечивает ДЭ  $\geq 0,92$  при  $P/(h_1+h_2) \leq 5$  и ДЭ  $\geq 0,95$  при  $P/(h_1+h_2) \geq 30$ .

Киноформная микроструктура представленного выше объектива двойного ИК диапазона состоит

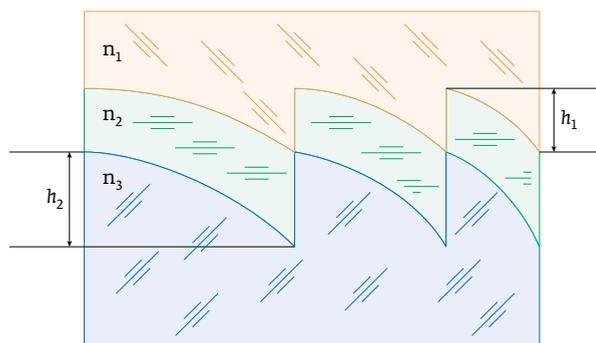
form)  $P > 400$  мкм, and the maximum angle of incidence of radiation on the microstructure from the air  $\theta \leq 13.5^\circ$ . The calculation showed that the DE of this kinoform at the optimal relief depth ( $h=3.2$  мкм), due to the significant ratio of the spatial period of the microstructure to the relief depth ( $P/h > 125$ ), turned out to be close to the limit predicted by the scalar diffraction theory, i. e. not lower than 0.8 in the entire working spectral range. At the same time, twenty percent of the energy incident on kinoforms attributable to secondary diffraction orders will inevitably lead to a decrease in contrast in the image formed by the lens and, in some cases, to an unacceptable decrease in the signal-to-noise ratio.

It is possible to raise the DE in the entire spectral range and for the entire range of angles of incidence of radiation to the level of 0.85 and even to 0.95 by switching to two- or three-layer kinoform microstructures. So, in particular, a two-layer single-relief microstructure (see Fig. 3) composed of  $Al_2O_3$  and ZnS ( $n_1=1.660731$ ,  $n_2=2.250382$ ) with an optimal relief depth ( $h=6.72$  мкм), angles of incidence of radiation  $-15^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$  and in the spectral range of  $3 \leq \lambda \leq 5$  мкм provides DE  $\leq 0.87$  at  $P/h \leq 5$  and DE  $\geq 0.90$  at  $\lambda/h \geq 30$ .

Here, we immediately note that modern technologies make it possible, using the flat surface of a refractive lens as a substrate, to apply a layer of another IR-transparent material with a thickness sufficient to make a sawtooth relief in it, and in turn to cover it with another layer, which will complete the formation of a two-layer single-relief sawtooth microstructure. The analysis showed that  $Al_2O_3$  and AgCl ( $n_2=1.99996$ ) can serve as the best pair of materials for such a microstructure in the spectral range of  $3 \leq \lambda \leq 5$  мкм. With an optimal relief depth ( $h=12.22$  microns) and radiation angles of incidence of  $-15^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$ , this microstructure provides DE  $\leq 0.9$  at  $P/h \leq 5$  and DE  $\geq 0.92$  at  $P/h \geq 30$ .



**Рис. 3.** Двухслойная однорельфная микроструктура  
Fig. 3. Two-layer single-relief microstructure



**Рис. 4.** Трехслойная двухрельфная микроструктура  
Fig. 4. Three-layer two-relief microstructure

всего из 5 кольцевых зон и выполняется в плоской поверхности оптического материала GASIR1 (показатель преломления на длине волны  $\bar{\lambda}=7,35$  мкм  $n_{\text{GASIR1}}=2,501489$ , а коэффициент дисперсии при  $\lambda_{\text{min}}=3,7$  мкм и  $\lambda_{\text{max}}=11$  мкм  $v_{\text{GASIR1}}=74,84$ ). При этом ширина самой узкой зоны, т. е. минимальный период киноформа  $P>2,8$  мм, 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 ZnS\_broad, ДЭ  $\leq 0,52$ . И даже в случае нанесения на плоскую поверхность первой рефракционной линзы двух слоев из материалов CdTe и ZnS\_broad, разделенных одним пилообразным рельефом, поднять ДЭ выше 0,7 не удастся.

Ситуация становится принципиально иной при компоновке микроструктуры из тех же материалов GASIR1 и ZnS\_broad, 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 ( $P/h\approx 10$ ), ДЭ  $\geq 0,9$ .

## 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 определен-

ные ограничения. Трехслойная микроструктура (см. Fig. 4) при оптимальных глубинах двух рельефов ( $h_1=18,76$  мкм,  $h_2=10,96$  мкм), состоящая из  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgF}_2$  и ZnS ( $n_1=1,660731$ ,  $n_2=1,348829$ ,  $n_3=2,250382$ ) в том же угловом и спектральном диапазонах обеспечивает  $\text{DE}\leq 0,92$  для  $P/(h_1+h_2)\leq 5$  и  $\text{DE}\geq 0,95$  для  $P/(h_1+h_2)\geq 30$ .

Киноформная микроструктура двойной ИК-линзы, представленная выше, состоит из 5 кольцевых зон и выполняется на плоской поверхности оптического материала GASIR1 (показатель преломления на длине волны  $\bar{\lambda}=7,35$  мкм  $n_{\text{GASIR1}}=2,501489$ , а коэффициент дисперсии при  $\lambda_{\text{min}}=3,7$  мкм и  $\lambda_{\text{max}}=11$  мкм  $v_{\text{GASIR1}}=74,84$ ). Ширина самой узкой зоны, т. е. минимальный период киноформы  $P>2,8$  мм, 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 микроструктуры, состоящей из GASIR1 и ZnS\_broad, ДЭ  $\leq 0,52$ . И даже в случае нанесения на плоскую поверхность первой рефракционной линзы двух слоев из материалов CdTe и ZnS\_broad, разделенных одним пилообразным рельефом, поднять ДЭ выше 0,7 не удастся.



**For us, optical fiber is as pure as nature.**

**WE LOVE PURE RESULTS**  
Fishing but also the fiber draw process require concentration, time and reflection. The purity of nature as well as high quality telecom fiber technology are found here in Finland. Latest improvements result in 3000 m/min - speed and precision for your success.

rosendahlnextrom.com

KNILL GRUPP MADE IN EUROPE



ные ограничения на размещение микроструктуры в пределах оптической схемы объектива [9]. Однако, как показано в настоящей работе, компоновать оптическую схему объектива, обеспечивающую надлежащую коррекцию aberrаций при приемлемых минимальном пространственном периоде дифракционной микроструктуры и углах падения излучения на нее, удается даже в простейшем случае триплета.

## ВКЛАД ЧЛЕНОВ АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА В РАБОТУ

Все авторы декларируют равный вклад каждого в подготовку, обсуждение и написание статьи.

Работа выполнена в рамках гранта РФ-проект 20-19-00081.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang Hu, Bai Yu, Luo Jianjun. Hybrid refractive / diffractive optical system design for light and compact uncooled longwave infrared imager. *Proc. of SPIE*. Vol. 8416; 84162N-1.
2. Патент РФ 2621366. Компактный объектив среднего ИК-диапазона / Бездидько С. Н., Тарасишин А. В. Patent RF 2621366. Kompaktnyj ob'ektiv srednego IK-diapazona / Bezdid'ko S.N., Tarasishin A.V.
3. ZEMAX: software for optical system design. <http://www.radiantzemax.com>.
4. Xie Hongbo, Ren D., Wang Ch., Mao Ch., Yang Lei. Design of high-efficiency

surface of the first refractive lens, it will not be possible to raise the DE above 0.7.

The situation becomes fundamentally different when composing a microstructure from the same materials GASIR1 and ZnS\_broad, but with two reliefs of different depths ( $h_1=132 \mu\text{m}$ ,  $h_2=155.8 \mu\text{m}$ ). Despite such a significant total depth of the relief and due to the large ratio of the spatial period of the microstructure to the total depth ( $P/h \approx 10$ )  $DE \geq 0.9$ .

## CONCLUSION

The research results presented in this paper clearly demonstrate the effectiveness of using diffraction elements in the lenses of the middle and double IR ranges. It is shown that the placement of a diffractive microstructure on the flat surface of one of the refractive lenses of a high aperture triplet can simultaneously satisfy the correction conditions of both chromatic and monochromatic aberrations and achieve sufficiently high optical characteristics. At the same time, a significant width of the working spectral range forces us to switch to two-layer single- or two-relief microstructures to ensure an acceptable DE sawtooth relief microstructure. At the same time, the depths of reliefs increase many times, which significantly limits the permissible minimum spatial period of the microstructure and the angles of incidence of radia-

РОССИЙСКИЙ СЕМИНАР

IX

ПО ВОЛОКОННЫМ ЛАЗЕРАМ

20–24 августа 2020 года

Новосибирск, Академгородок

### Тематика семинара:

1. Новые среды, схемы и режимы генерации волоконных лазеров
2. Импульсные волоконные и гибридные лазеры, мощные и сверхкороткие импульсы
3. Нелинейное преобразование частоты излучения волоконных лазеров: ВКР, ВРМБ, параметрическая генерация, генерация гармоник, генерация терагерцового излучения
4. Применения волоконных лазеров, информационно-оптические технологии
5. Лазерная оптика и компоненты: световоды, волоконные и гибридные элементы резонатора, интерферометры, дифракционная и интегральная оптика
6. Нанопотоника и метаматериалы и другие вопросы физики, техники и применений волоконных лазеров, систем и компонент

Совместно с семинаром будут проведены:

1. Международная школа по нелинейной фотонике.
2. Молодежная конкурс-конференция «Оптические и информационные технологии 2020».

Планируемый срок подачи тезисов докладов – 10 июня 2020

Контактная информация:  
E-mail: [rfl2o@iae.nsk.su](mailto:rfl2o@iae.nsk.su)

тел. +7 (383) 330 69 39 (Трубицина Елена)  
факс +7 (383) 330 88 78

[www.rfl2o.iae.nsk.su](http://www.rfl2o.iae.nsk.su)



diffraction optical elements towards ultrafast mid-infrared timestretched imaging and spectroscopy. *Journal of Modern Optics*. 2018; 65(3): 255–261.

5. **Грейсух Г. И., Данилов В. А., Ежов Е. Г., Антонов А. И., Усиевич Б. А.** Дифракционные элементы в оптических системах ИК-диапазона. Труды XVI международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям HOLOEXPO 2019. – М: МГТУ. 2019; 178–185.  
Grejsuh G. I., Danilov V. A., Ezhov E. G., Antonov A. I., Usievich B. A. Difrakcionnye elementy v opticheskikh sistemah IK-diapazona. Trudy XVI mezhdunarodnoj konferencii po golografii i prikladnym opticheskim tekhnologiyam HOLOEXPO 2019. – М: MGTU. 2019; 178–185.
6. *Edmund Optics: Germanium Infrared (IR) Hybrid Aspheric Lenses*. <https://www.edmundoptics.com/f/germanium-infrared-ir-hybrid-aspheric-lenses/14182/>.
7. **Moharam M. G., Gaylord T. K.** Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction. *J. Opt. Soc. Am.* 1981; 71(7): 811–818.
8. **Lyndin N. M.** *Modal and C Methods Grating Design and Analysis Software*. <http://www.mcgrating.com>.
9. **Грейсух, Г.И., Данилов В.А., Ежов Е.Г., Степанов С.А.** Учет дифракционной эффективности при проектировании рефракционно-дифракционных оптических систем. *Оптический журнал*. 2016; 83(3): 32–38.  
Grejsuh, G.I., Danilov V.A., Ezhov E.G., Stepanov S.A. Uchet difrakcionnoj effektivnosti pri proektirovanii refrakcionno-difrakcionnyh opticheskikh sistem. *Opticheskij zhurnal*. 2016; 83(3): 32–38.

### ОБ АВТОРАХ

Григорий Грейсух, д. т. н., [subscribing\\_2002@mail.ru](mailto:subscribing_2002@mail.ru)  
ORCID: 0000-0003-1905-1513

Евгений Ежов  
ORCID: 0000-0001-9281-5394

Артем Антонов  
ORCID: 0000-0003-1532-2750

Виктор Данилов  
ORCID: 0000-0002-1766-5223

Борис Усиевич  
ORCID: 0000-0001-5071-3058

tion on it. This in turn imposes certain restrictions on the placement of the microstructure within the optical circuit of the lens [9]. However, as shown in this work, it is possible to compose the optical scheme of the lens, which provides the proper correction of aberrations at an acceptable minimum spatial period of the diffraction microstructure and angles of incidence of radiation on it, even in the simplest case of a triplet.

### CONTRIBUTION OF TEAM MEMBERS TO THE WORK

All authors declare an equal contribution of each to the preparation, discussion and writing of the article.

The study is carried out with the support RSF project № 20-19-00081.

### ABOUT AUTHORS

Grigory Greisukh, Dr. of the Eng. Sc., [subscribing\\_2002@mail.ru](mailto:subscribing_2002@mail.ru)  
ORCID: 0000-0003-1905-1513

Ezhov Evgeny  
ORCID: 0000-0001-9281-5394

Artem Antonov  
ORCID: 0000-0003-1532-2750

Victor Danilov  
ORCID: 0000-0002-1766-5223

Boris Usievich  
ORCID: 0000-0001-5071-3058

ЭССЕНТОПТИКС  ESSENTOPTICS

## PHOTON RT

Спектрофотометр для Оптиков | Spectrophotometer for Coaters

185 – 5200 нм



МЫ **ДЕЙСТВИТЕЛЬНО** РЕШАЕМ СЛОЖНЫЕ  
ЗАДАЧИ НАШИХ КЛИЕНТОВ

—  
WE **TRULY** FULFILL THE MOST  
CHALLENGING CUSTOMER'S NEEDS

ООО «ЭссентОптикс»

23а-81, ул. 40 лет Победы, Боровляны, Минская обл., Минский р-н, 223053 Беларусь  
Тел.: +375-17-5112025 | Факс: +375-17-5112026 | [www.essentoptics.com](http://www.essentoptics.com)