

ТЕРМООПТИЧЕСКИЕ АБЕРРАЦИИ РАДИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

И.А. Левин

ОАО «Ростовский оптико-механический завод», Ростов Великий, Россия

Аннотация

Получены аналитические выражения температурного изменения аберрационных коэффициентов радиально-симметричного дифракционного оптического элемента в приближении третьего порядка малости, а также условие устранения терморасфокусировки дифракционно-рефракционного синглета. Проанализированы возможности коррекции аберраций в широком температурном диапазоне как одиночного дифракционного оптического элемента, так и дифракционно-рефракционного синглета.

Ключевые слова: аберрации, дифракционная оптика, температурные эффекты.

Цитирование: Левин, И.А. Термооптические аберрации радиально-симметричных дифракционных оптических элементов / И.А. Левин // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 1. – С. 51-56. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-1-51-56.

Введение

Совершенствование технологий создания рельефно-фазовых микроструктур открыло возможность их нанесения на подложки произвольной формы, в том числе на асферические поверхности рефракционных линз (РЛ) [1], что позволило осуществить практическую реализацию схемных решений, включающих дифракционные оптические элементы (ДОЭ) [2]. Использование ДОЭ в «традиционных» рефракционно-линзовых системах обусловлено в первую очередь их уникальными дисперсионными свойствами [3]. Разработанные методы подавления остаточного спектра, основанные на сочетании коррекционных возможностей рефракционных и дифракционных оптических элементов, позволяют достичь требуемой степени исправления хроматизма даже в условиях ограниченного выбора оптических материалов [4–6]. В то же время проблема как спектральной, так и угловой селективности дифракционной эффективности с успехом решается при переходе на двух- и трёхслойные рельефно-фазовые структуры ДОЭ [7–9].

Однако при разработке оптических схем гибридных систем, функционирующих в широком температурном диапазоне [10], наряду с минимизацией влияния термооптических аберраций РЛ, следует учитывать и вклад, вносимый дифракционным элементом. Это особенно важно для схемных решений, в которых микроструктура ДОЭ нанесена на подложки из материалов с высоким значением температурного коэффициента линейного расширения, как, например, оптические пластмассы в видимом спектральном диапазоне [11] или халькогенидные стёкла в длинноволновом инфракрасном (ИК-) диапазоне [12].

Исходя из вышеизложенного, для оценки потенциальных возможностей аберрационной коррекции оптических схем дифракционно-рефракционных систем видится целесообразным получение аналитических выражений температурного изменения коэффициентов волновой аберрации ДОЭ в приближении третьего порядка, а также исследование коррекционных возможностей как одиночного ДОЭ, так и дифракционно-рефракционного синглета.

1. Аналитические выражения температурного изменения коэффициентов волновой аберрации ДОЭ в приближении третьего порядка

При описании ДОЭ будем придерживаться модели бесконечно тонкого фазового транспаранта, вносящего фазовую задержку в падающий на него волновой фронт [13]. В качестве фазовой функции примем степенной ряд вида:

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

где m – порядок дифракции; B_j – коэффициенты в разложении фазовой задержки, определяющие вклад ДОЭ в сферическую аберрацию различных порядков малости; $\rho_n = \rho/\rho_A$ – нормированная координата точки падения луча на поверхность дифракционной микроструктуры; ρ – радиальная координата точки падения луча на поверхность; ρ_A – радиальная апертурная координата точки на поверхности ДОЭ.

Выбор вида фазовой функции обусловлен принятой мировыми производителями современного шлифовального и полировального оборудования формой уравнения криволинейной поверхности вращения [14]:

$$z(\rho) = \frac{c\rho^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2\rho^2}} + \sum_{i=1}^I \alpha_i \rho^{2i}, \quad (2)$$

где c – кривизна поверхности при вершине; k – коническая постоянная; α_i – коэффициенты асферической деформации.

Известно, что выражение для волновой аберрации в приближении третьего порядка малости можно представить как [13]:

$$\Psi^{(4)} = \frac{S_3}{8} \rho^4 + \frac{C_3}{2} \rho^2 v^2 + \frac{A_3}{2} v^4 + \frac{F_3}{4} \rho^2 \chi^2 + \frac{D_3}{2} v^2 \chi^2, \quad (3)$$

где S_3 , C_3 , A_3 , F_3 , D_3 – аберрационные коэффициенты; χ – радиальная координата точки в предметной плоскости; $v^2 = \rho \cdot \chi$.

Для ДОЭ в воздухе, вносящего фазовую задержку в падающий волновой фронт в соответствии с уравнением (1), структура которого выполнена на поверхности, описываемой уравнением (2), а входной зрачок совпадает с вершиной этой поверхности, аналитиче-

ские выражения aberrационных коэффициентов в приближении третьего порядка имеют вид

$$S_3 = \Phi_{DOE} \left[\left(\Phi_{DOE} + \frac{2}{s} \right) \left(\Phi_{DOE} + \frac{1}{s} - 2c \right) + \frac{1}{s^2} + 4 \frac{B_2}{B_1} \right], \quad (4)$$

$$C_3 = \frac{1}{s} \Phi_{DOE} \left[c - \Phi_{DOE} - \frac{2}{s} \right], \quad (5)$$

$$A_3 = F_3 = \frac{1}{s^2} \Phi_{DOE}, \quad (6)$$

$$D_3 = 0, \quad (7)$$

где $\Phi_{DOE} = -m\bar{\lambda}B_1/\pi$ – оптическая сила ДОО; $\bar{\lambda}$ – расчётная длина волны падающего излучения в диапазоне от λ_1 до λ_2 ; s – передний отрезок ДОО.

Данные уравнения получены из соотношений, представленных в работе [15], и проверены моделированием в коммерческом программном продукте оптического проектирования ZEMAX [16].

Уравнения температурного изменения коэффициентов волновой aberrации в приближении третьего порядка получим, исходя из теплового расширения

$$\Delta S_3 = \Phi_{DOE} \left[\Phi_{DOE}^2 \left(\frac{1}{\tau^6} - 1 \right) - 2c\Phi_{DOE} \left(\frac{1}{\tau^5} - 1 \right) + \left(\frac{3}{s} \Phi_{DOE} + 4 \frac{B_2}{B_1} \right) \left(\frac{1}{\tau^4} - 1 \right) - \frac{4c}{s} \left(\frac{1}{\tau^3} - 1 \right) + \frac{3}{s^2} \left(\frac{1}{\tau^2} - 1 \right) \right], \quad (10)$$

$$\Delta C_3 = \frac{1}{s} \Phi_{DOE} \left[c \left(\frac{1}{\tau^3} - 1 \right) - \Phi_{DOE} \left(\frac{1}{\tau^4} - 1 \right) - \frac{2}{s} \left(\frac{1}{\tau^2} - 1 \right) \right], \quad (11)$$

$$\Delta A_3 = \Delta F_3 = \frac{1}{s^2} \Phi_{DOE} \left[\frac{1}{\tau^2} - 1 \right], \quad (12)$$

$$\Delta D_3 = 0. \quad (13)$$

Сравнительный анализ выражений (4) и (10) показал, что минимизация модуля максимального значения волновой сферической aberrации ДОО, работающего на бесконечность ($s = \infty$), в приближении третьего порядка в температурном диапазоне ΔT возможна при соблюдении следующих равенств

$$c = \frac{\Phi_{DOE}}{2} \cdot \frac{\left[(1 + \tau_2^6) - (1 - \tau_1^6) \frac{\tau_2^2 (1 + \tau_2^4)}{\tau_1^2 (1 - \tau_1^4)} \right]}{\left[\tau_2 (1 + \tau_2^5) - \tau_1 (1 - \tau_1^5) \frac{\tau_2^2 (1 + \tau_2^4)}{\tau_1^2 (1 - \tau_1^4)} \right]}, \quad (14)$$

$$B_2 = \frac{\Phi_{DOE}^3 (1 - \tau_1^6) - 2c\tau_1 \Phi_{DOE}^2 (1 - \tau_1^5)}{4 \frac{m\bar{\lambda}}{\pi} \tau_1^2 (1 - \tau_1^4)}, \quad (15)$$

где $\tau_1 = (1 + \alpha_t \Delta T)$; $\tau_2 = (1 + \alpha_t \Delta T/2)$.

Кроме того, подбором коэффициентов B_j ($j > 2$) возможно обнулить сферическую aberrацию во всех порядках aberrационного разложения для двух температур заданного диапазона.

На рис. 1 представлена кривая зависимости волновой сферической aberrации ДОО в воздухе, работающего на бесконечность ($s = \infty$), в приближении третьего порядка малости, от диапазона изменения

материала подложки ДОО, линейные размеры которой меняются в соответствии с выражением:

$$\Delta L = L\alpha_T \Delta T, \quad (8)$$

где L и ΔL – линейный размер и его изменение в диапазоне температур ΔT ; α_T – температурный коэффициент линейного расширения материала.

Принимая во внимание (8) и полагая, что фазовая функция описывается уравнением (1), изменение оптической силы ДОО в диапазоне температур ΔT можно представить в виде

$$\Delta \Phi_{DOE} = \Phi_{DOE} \left[\frac{1}{\tau^2} - 1 \right], \quad (9)$$

где $\tau = \rho_A^{(T_2)} / \rho_A^{(T_1)} = (1 + \alpha_r \Delta T)$ – отношение радиальных апертурных координат точек на поверхности ДОО при температурах T_2 и T_1 соответственно.

Учитывая (9), для уравнений температурного изменения коэффициентов волновой aberrации в приближении третьего порядка получим следующие соотношения:

термодинамической температуры среды при выполнении соотношений (14) и (15).

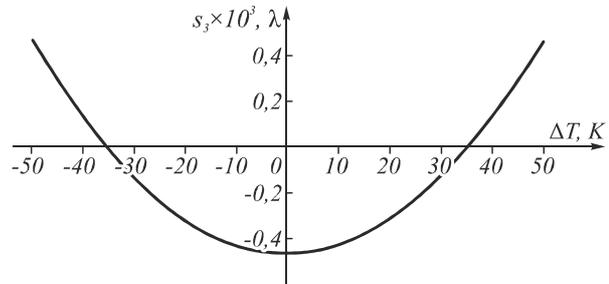


Рис. 1. Зависимость волновой сферической aberrации ДОО в воздухе в приближении третьего порядка от диапазона изменения термодинамической температуры среды при $\Phi_{DOE} = 10$ дптр, $c = 9,966368 \times 10^{-3} \text{ мм}^{-1}$, $s = \infty$ и $\rho_A = 25 \text{ мм}$; материал подложки полиметилметакрилат (ПММА) – $\alpha_T = 67,95 \text{ K}^{-1}$

Для сравнения на рис. 2 показана аналогичная кривая с учётом обнуления волновой сферической aberrации и комы третьего порядка малости при среднем значении температуры в диапазоне ΔT .

Из данных графиков следует, что максимальное значение волновой сферической aberrации в заданном диапазоне температур по модулю в 2 раза ниже при выполнении условий (14) и (15). При этом аналогичные кривые зависимости комы в приближении третьего порядка от изменения термодинамической температуры

среды практически линейны, а значения довольно слабо отличаются, что демонстрирует рис. 3.

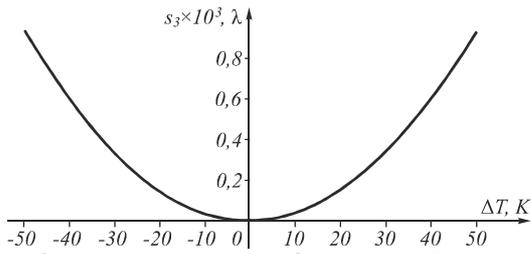


Рис. 2. Зависимость волновой сферической аберрации ДОО в воздухе в приближении третьего порядка от диапазона изменения термодинамической температуры среды при $\Phi_{DOE} = 10$ дптр, $c = 9,966140 \times 10^{-3} \text{ мм}^{-1}$, $s = \infty$ и $r_A = 25 \text{ мм}$; материал подложки ПММА – $\alpha_T = 67,95 \text{ К}^{-1}$

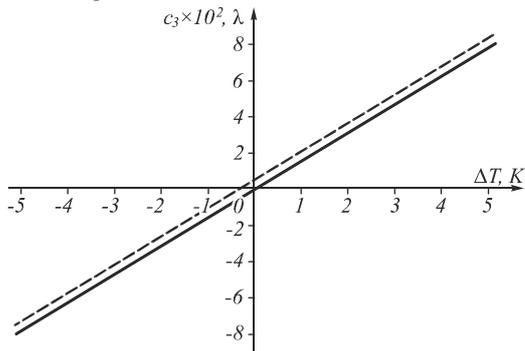


Рис. 3. Зависимость волновой аберрации комы ДОО в воздухе в приближении третьего порядка от диапазона изменения термодинамической температуры среды при $\Phi_{DOE} = 10$ дптр, $s = \infty$ и $r_A = 25 \text{ мм}$, сплошная линия: $c = 9,966140 \times 10^{-3} \text{ мм}^{-1}$, штриховая линия: $c = 9,966368 \times 10^{-3} \text{ мм}^{-1}$; материал подложки ПММА – $\alpha_T = 67,95 \text{ К}^{-1}$

Зависимость фокусирующих и аберрационных свойств ДОО от термодинамической температуры среды обусловлена искажением рельефа дифракционной микроструктуры. Последнее, в свою очередь, приводит к падению дифракционной эффективности на краях температурного диапазона, которое, как показано в работе [17], при изменении температуры на 30 К для ДОО на подложке из акрила с коэффициентом линейного расширения и температурным коэффициентом показателя преломления, равными $\alpha_T = 65,5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ и $\beta_{T,\lambda} = -125 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ соответственно, не превышает 0,1 %.

2. Условие атермализации дифракционно-рефракционного синглета

Перейдём от рассмотрения коррекционных возможностей одиночного ДОО к дифракционной микроструктуре на поверхности бесконечно тонкой РЛ (рис. 4). Благодаря наличию большего числа свободных параметров такая двухэлементная схема может быть свободна от терморасфокусировки и ряда других аберраций.

Условие атермализации представленной на рис. 4 оптической схемы можно записать в следующем виде

$$\begin{cases} \Phi_{RL} + \Phi_{DOE} = \Phi \\ \Delta\Phi_{RL} + \Delta\Phi_{DOE} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

где Φ – оптическая сила синглета в целом; $\Delta\Phi_{RL}$ – температурное изменение оптической силы тонкой РЛ, определяемое выражением [18]:

$$\Delta\Phi_{RL} = \Phi_{RL} \left(\frac{\beta_{T,\lambda}}{n_\lambda - 1} - \alpha_T \right) \Delta T, \quad (17)$$

где

$$\Phi_{RL} = (n_\lambda - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (18)$$

– оптическая сила тонкой РЛ; n_λ – показатель преломления материала РЛ на длине волны λ ; r_1 и r_2 – радиусы кривизны поверхностей РЛ.

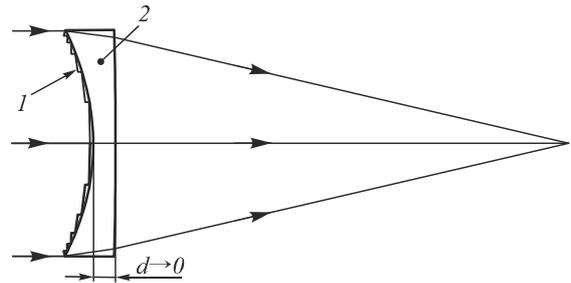


Рис. 4. Оптическая схема атермального дифракционно-рефракционного синглета. 1 – ДОО, 2 – РЛ

Подставляя (9) и (17) в (16) и решая систему линейных уравнений, для оптических сил дифракционной и рефракционной частей синглета окончательно получим

$$\Phi_{RL} = \frac{\Phi}{1 - \frac{\tau^2}{1 - \tau^2} \left(\frac{\beta_{T,\lambda}}{n_\lambda - 1} - \alpha_T \right) \Delta T}, \quad (19)$$

$$\Phi_{DOE} = -\Phi_{RL} \frac{\tau^2}{1 - \tau^2} \left(\frac{\beta_{T,\lambda}}{n_\lambda - 1} - \alpha_T \right) \Delta T. \quad (20)$$

Выполнение соотношений (19) и (20) позволяет устранить терморасфокусировку дифракционно-рефракционного синглета, а при соответствующем подборе коэффициентов B_j , как и в случае одиночного ДОО, возможно скорректировать сферическую аберрацию во всех порядках разложения для двух значений температур в выбранном диапазоне. Однако для синглета, работающего на бесконечность ($s = \infty$), полученные при этом величины радиусов кривизны поверхностей РЛ приводят к значительной коме третьего порядка по всему температурному диапазону (модули аберрационных коэффициентов C_3 для ДОО и РЛ соотносятся, как 2 к 1). Что касается дисторсии, то для бесконечно тонкой оптической системы в воздухе, совмещённой со входным зрачком, она равна нулю. Исключить астигматизм и кривизну поля изображения по понятным причинам не представляется возможным.

В работе [19] аналогичного устранения сферической аберрации добиваются за счёт асферизации одной из поверхностей РЛ, а свободные от коррекционной нагрузки радиусы кривизны позволяют варьировать величиной комы.

Отдельно следует сказать о возможностях коррекции хроматических аберраций атермализованного дифракционно-рефракционного синглета. Условие ахроматизации такой двухэлементной схемы можно представить в следующем виде

$$\begin{cases} \Phi_{RL} + \Phi_{DOE} = \Phi \\ \frac{\Phi_{RL}}{v_{RL}} + \frac{\Phi_{DOE}}{v_{DOE}} = 0 \\ \Phi_{DOE} = -\Phi_{RL} \frac{\tau^2}{1-\tau^2} \left(\frac{\beta_{T,\lambda}}{n_\lambda - 1} - \alpha_T \right) \Delta T \end{cases}, \quad (21)$$

где

$$v_{RL} = \frac{n_\lambda - 1}{n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}} \quad (22)$$

и

$$v_{DOE} = \frac{\bar{\lambda}}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad (23)$$

– коэффициенты дисперсии РЛ и ДОЭ соответственно.

Система линейных уравнений (21) является переопределённой и имеет решение при выполнении следующего равенства

$$\delta = \frac{v_{DOE}}{v_{RL}} - \frac{\tau^2}{1-\tau^2} \left(\frac{\beta_{T,\lambda}}{n_\lambda - 1} - \alpha_T \right) \Delta T = 0. \quad (24)$$

В табл. представлен ряд оптических и термооптических постоянных некоторых материалов, прозрачных в видимом и ИК-диапазонах спектра [20]. В последнем столбце табл. приводятся значения величины δ при $\Delta T = 30$ К, характеризующей степень совместного выполнения условий ахроматизации и атермализации дифракционно-рефракционного синглета, описываемых вторым и третьим уравнениями системы (21).

Из данных табл. следует, что в видимом диапазоне спектра ни один из представленных оптических пластиков не даёт хотя бы приближённого равенства соотношения (24). В ИК-области спектра дифракционно-рефракционный синглет, РЛ которого выполнена из халькогенидного стекла IG6, обладает минимальной терморасфокусировкой ($\Delta\Phi = 10^{-3}$ дптр при $\Phi = 10$ дптр; $\Delta T = 30$ К) с учётом выполнения условия ахроматизации.

Табл. Оптические и термооптические постоянные ряда оптических пластмасс и халькогенидных стёкол

Материал	v_{RL}	$\alpha_T \times 10^6 \cdot K^{-1}$	$\beta_{T,\lambda} \times 10^6 \cdot K^{-1}$	$v_{T,\lambda} \times 10^6 \cdot K^{-1}*$	δ
Видимый спектральный диапазон: $\Delta\lambda = 0,486-0,656$ мкм; $v_{DOE} = -3,45$					
Акрил	54,95	65,50	-125,00	-319,74	-2,51
Циклоолефин сополимер	55,91	60,00	-100,43	-248,16	-2,14
ПММА	57,03	67,95	-117,01	-305,90	-2,32
Поликарбонат	29,74	67,00	-108,51	-252,33	-2,00
Полистирол	30,64	90,00	-141,52	-329,67	-1,95
Стиролакрилонитрил	34,61	64,00	-111,49	-260,48	-2,14
Инфракрасный спектральный диапазон: $\Delta\lambda = 8-12$ мкм; $v_{DOE} = -4,62$					
AMTIR1	113,59	12,00	73,84	37,38	1,52
AMTIR3	108,92	13,50	52,28	19,18	0,67
GASIR1	119,65	17,00	55,00	19,85	0,55
TI_1173	107,70	15,70	76,48	32,06	0,98
IG2	109,66	12,10	67,21	32,87	1,32
IG3	164,55	13,40	102,75	44,15	1,62
IG4	177,61	20,40	19,90	-8,02	-0,22
IG5	108,83	14,00	60,40	23,73	0,81
IG6	158,50	20,70	32,20	-2,57	-0,09

* - $v_{T,\lambda}$ – термооптическая постоянная [18]

Проведённый анализ номенклатуры бесцветного оптического стекла, производимого компанией Schott [21], показал, что в видимом диапазоне спектра среднее значение модуля δ в 4,2 раза меньше, чем для оптических пластмасс, а наиболее близким к выполнению соотношения (24) материалом РЛ дифракционно-рефракционного синглета является флинт марки SF56A, обеспечивающий совместно с ДОЭ терморасфокусировку $\Delta\Phi = 0,04 \times 10^{-3}$ дптр при $\Phi = 10$ дптр и $\Delta T = 30$ К с учётом выполнения условия ахроматизации.

Заключение

Представленные уравнения температурного изменения коэффициентов волновой аберрации ДОЭ в приближении третьего порядка позволяют провести оценку возможностей аберрационной коррекции оптических

схем гибридных систем, работающих в широком диапазоне температур. Показано, что при выполнении соотношений (14), (15) и соответствующем подборе коэффициентов B_j ($j > 2$) можно добиться минимизации модуля максимального значения сферической аберрации одиночного ДОЭ во всех порядках аберрационного разложения в заданном температурном диапазоне.

Получено условие атермализации бесконечно тонкого дифракционно-рефракционного синглета и исследованы его коррекционные возможности. В частности, отмечено, что в видимой области спектра применение в качестве материала рефракционной части синглета оптических пластмасс не позволяет добиться одновременного выполнения условий ахроматизации и атермализации такой системы. В ИК-области спектра наиболее подходящим для этого ма-

териалом РЛ является халькогенидное стекло IG6, которое совместно с ДОО обеспечивает минимальную терморасфокусировку, равную $\Delta\Phi = 10^{-3}$ дптр при $\Phi = 10$ дптр и $\Delta T = 30$ К с учётом выполнения условия ахроматизации.

Проведённый сравнительный анализ оптических пластмасс и номенклатуры бесцветного оптического стекла, производимого компанией Schott [21], подтвердил ожидаемые, существенно меньшие значения величины δ у последних, а следовательно, и лучшую хроматическую коррекцию бесконечно тонкого атермализованного дифракционно-рефракционного синглета.

Литература

1. Plastic Aspheric Lens – Hybrid Aspheres. Edmund Optics [Электронный ресурс]. – URL: <http://edmundoptics.com/optics/optical-lenses/aspheric-lenses/plastic-hybrid-aspheric-lenses/3200/> (дата обращения 27.11.2015).
2. Canon Camera Museum – Technology Hall – Technical Report December 2014 [Электронный ресурс]. – URL: <http://canon.com/camera-museum/tech/report/2014/12/> (дата обращения 27.11.2015).
3. **Грейсух, Г.И.** Сравнительный анализ хроматизма дифракционных и рефракционных линз / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. – 2005. – № 28. – С. 60-65. – ISSN 0134-2452
4. **Greisukh, G.I.** Design of achromatic and apochromatic plastic microobjectives / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, I.A. Levin, S.A. Stepanov // Applied Optics. – 2010. – Vol. 49(23). – P. 4379-4384.
5. **Грейсух, Г.И.** Расчёт пластмассово-линзовых микрообъективов суперахроматов / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, И.А. Левин, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 4. – С. 473-479.
6. **Greisukh, G.I.** Design of the double-telecentric high-aperture diffractive-refractive objectives / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, I.A. Levin, S.A. Stepanov // Applied Optics. – 2011. – Vol. 50(19). – P. 3254-3258.
7. **Грейсух, Г.И.** Подавление спектральной селективности двухслойных рельефно-фазовых дифракционных структур / Г.И. Грейсух, Е.А. Безус, Д.А. Быков, Е.Г. Ежов, С.А. Степанов // Оптика и спектроскопия. – 2009. – Т. 106, № 4. – С. 692-697.
8. **Zhao, Y.H.** The investigation of triple-layer diffraction optical element with wide field of view and high diffraction efficiency / Y.H. Zhao, C.J. Fan, C.F. Ying, S.H. Liu // Optics Communications. – 2013. – Vol. 295. – P. 104-107.
9. **Грейсух, Г.И.** Спектральная и угловая зависимости эффективности рельефно-фазовых дифракционных линз с двух- и трехслойной микроструктурами / Г.И. Грейсух, В.А. Данилов, Е.Г. Ежов, С.А. Степанов, Б.А. Усиевич // Оптика и спектроскопия. – 2015. – Т. 118, № 6. – С. 997-1004.
10. **Curatu, G.** Design and fabrication of low-cost thermal imaging optics using precision chalcogenide glass molding / G. Curatu [Электронный ресурс]. – 2008. – URL: http://lightpath.com/literature/technicalPapers/Precision_Chalcogenide_Glass_Molding.pdf (дата обращения 17.12.2015).
11. **Baumer, S.** Handbook of Plastic Optics / S. Baumer. – Weinheim: Wiley-VCH, 2005. – 189 p.
12. **Hilton, A.R.** Chalcogenide glasses for infrared optics / A.R. Hilton. – New York: The McGraw-Hill Education, 2009. – 304 p.
13. **Greisukh, G.I.** Optics of diffractive and gradient-index elements and systems / G.I. Greisukh, S.T. Bobrov, S.A. Stepanov. – Bellingham: SPIE Press, 1997. – 414 p.
14. The Innovative Complete Program for Optical Production. OptoTech [Электронный ресурс]. – 2015. – URL: http://optotech.de/files/downloads/company/optotech_image_bro_en_0.pdf (дата обращения 27.11.2015).
15. **Dutta, U.** Monochromatic primary aberrations of a diffractive lens on a finite substrate / U. Dutta, L. Harza // Applied Optics. – 2010. – Vol. 49(18). – P. 3613-3621.
16. Zemax [Электронный ресурс]. – URL: <http://zemax.com/> (дата обращения 27.11.2015).
17. **Behrmann, G.P.** Influence of temperature on diffractive lens performance / G.P. Behrmann, J.P. Bowen // Applied Optics. – 1993. – Vol. 32(14). – P. 2483-2489.
18. Техническая оптика: Учебное пособие для вузов / М.М. Русинов. – Л.: Машиностроение, 1979. – 488 с.
19. **Londono, C.** Athermalization of a single-component lens with diffractive optics / C. Londono, W.T. Plummer, P.P. Clark // Applied Optics. – 1993. – Vol. 32(13). – P. 2295-2302.
20. **Schaub, M.** Molded Optics Design and Manufacture / M. Schaub, J. Schwiegerling, E.C. Fest, A. Symmons, R.H. Shepard. – Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011. – 260 p.
21. Optical Glasses – Over 120 Glass Types: SCHOTT Advanced Optics [Электронный ресурс]. – 2014. – URL: http://schott.com/advanced_optics/english/download/schottzemax-20150722.zip (дата обращения 27.11.2015).

Сведения об авторе

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 инженером-оптиком в конструкторском отделе ОАО «Ростовский оптико-механический завод». И.А. Левин – специалист в области расчёта оптических систем. В списке научных работ И.А. Левина 22 публикации. E-mail: i.a.levin@mail.ru.

Поступила в редакцию 27 ноября 2015 г.
Окончательный вариант – 17 декабря 2015 г.

THERMO-OPTICAL ABERRATIONS OF RADIALLY SYMMETRIC DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS

I.A. Levin

JSC 'Rostov Optical-Mechanical Plant', Rostov-Veliky, Russia

Abstract

Analytical relations that define the temperature dependence of the third-order aberration coefficients for a radially symmetric diffractive optical element were derived. Also, a condition for elimi-

nating thermal defocusing in a diffractive-refractive singlet was obtained. Possibilities of correcting aberrations in a wide temperature range for a single diffractive optical element and diffractive-refractive singlet were analyzed.

Keywords: aberrations, diffractive optics, thermal effects.

Citation: Levin IA. Thermo-optical aberrations of radially symmetric diffractive optical elements. *Computer Optics* 2016; 40(1): 51-56. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-1-51-56.

References

- [1] Plastic Aspheric Lens – Hybrid Aspheres. Edmund Optics. Source: <http://edmundoptics.com/optics/optical-lenses/aspheric-lenses/plastic-hybrid-aspheric-lenses/3200/>.
- [2] Canon Camera Museum – Technology Hall – Technical Report December 2014. Source: <http://canon.com/camera-museum/tech/report/2014/12/>.
- [3] Greisukh GI, Ezhov EG, Stepanov SA. Comparative analysis of chromatism diffractive and refractive lens [in Russian]. *Computer Optics* 2005; 28: 60-65.
- [4] Greisukh GI, Ezhov EG, Levin IA, Stepanov SA. Design of achromatic and apochromatic plastic microobjectives. *Applied Optics* 2010; 49(23): 4379-4384.
- [5] Greisukh GI, Ezhov EG, Levin IA, Stepanov SA. Design of plastic-lens micro-objectives superachromats [in Russian]. *Computer Optics* 2011; 35(4): 473-479.
- [6] Greisukh GI, Ezhov EG, Levin IA, Stepanov SA. Design of the double-telecentric high-aperture diffractive-refractive objectives. *Applied Optics* 2011; 50(19): 3254-3258.
- [7] Greisukh GI, Bezus EA, Bykov DA, Ezhov EG, Stepanov SA. Suppression of the spectral selectivity of two-layer phase-relief diffraction structures. *Optics and Spectroscopy* 2009; 106(4): 621-626.
- [8] Zhao YH, Fan CJ, Ying CF, Liu SH. The investigation of triple-layer diffraction optical element with wide field of view and high diffraction efficiency. *Optics Communications* 2013; 295: 104-107.
- [9] Greisukh GI, Danilov VA, Ezhov EG, Stepanov SA, Usievich BA. Spectral and angular dependences of the efficiency of relief-phase diffractive lenses with two- and three-layer microstructures. *Optics and Spectroscopy* 2015; 118(6): 964-970.
- [10] Curatu G. Design and fabrication of low-cost thermal imaging optics using precision chalcogenide glass molding. Source: http://lightpath.com/literature/technicalPapers/Precision_Chalcogenide_Glass_Molding.pdf.
- [11] Baumer S. *Handbook of Plastic Optics*. Weinheim: Wiley-VCH; 2005.
- [12] Hilton AR. *Chalcogenide glasses for infrared optics*. NY: The McGraw-Hill Education; 2009.
- [13] Greisukh GI, Bobrov ST, Stepanov SA. *Optics of diffractive and gradient-index elements and systems*. Bellingham: SPIE Press; 1997.
- [14] The Innovative Complete Program for Optical Production. OptoTech. Source: http://optotech.de/files/downloads/company/optotech_image_bro_en_0.pdf.
- [15] Dutta U, Harza L. Monochromatic primary aberrations of a diffractive lens on a finite substrate. *Applied Optics* 2010; 49(18): 3613-3621.
- [16] Zemax. Source: <http://zemax.com/>.
- [17] Behrmann GP, Bowen JP. Influence of temperature on diffractive lens performance. *Applied Optics* 1993; 32(14): 2483-2489.
- [18] Rusinov MM. *Technical optics: Study guide for university* [in Russian]. Leningrad: "Mashinostroenie" Publisher; 1979.
- [19] Londono C, Plummer WT, Clark PP. Athermalization of a single-component lens with diffractive optics. *Applied Optics* 1993; 32(13): 2295-2302.
- [20] Schaub M, Schwiegerling J, Fest EC, Symmons A, Shepard RH. *Molded Optics Design and Manufacture*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group; 2011.
- [21] *Optical Glasses – Over 120 Glass Types: SCHOTT Advanced Optics*. Source: http://schott.com/advanced_optics/english/download/schottzemax-20150722.zip.

Author's information

И'ya Anatolievich Levin (b. 1987) graduated (2009) from Penza State University, majoring in Physics. He is Ph.D optical design engineer at Rostov Optical-Mechanical Plant. His current research interests include design of optical systems. He is co-author of 22 scientific publications. E-mail: i.a.levin@mail.ru.

Received November 27, 2015. The final version – December 17, 2015.