

## ПАССИВНАЯ АТЕРМАЛИЗАЦИЯ РЕФРАКЦИОННО-ДИФРАКЦИОННЫХ ПЛАСТМАССОВО-ЛИНЗОВЫХ ОБЪЕКТИВОВ

И.А. Левин<sup>1</sup>, С.А. Степанов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ЗАО НПП «МедИнж», Пенза, Россия,

<sup>2</sup> ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», Пенза, Россия

### Аннотация

Исследованы возможности пассивной атермализации пластмассово-линзовых систем. В частности, представлены схемные решения двух рефракционно-дифракционных объективов, терморасфокусировка которых устранена оптическим и механическим способами соответственно. Оценена достижимая ширина рабочего спектрального диапазона представленных рефракционно-дифракционных объективов.

**Ключевые слова:** атермализация, терморасфокусировка, ахроматизация, дифракционный оптический элемент, рефракционно-дифракционный объектив.

**Цитирование:** Левин, И.А. Пассивная атермализация рефракционно-дифракционных пластмассово-линзовых объективов / И.А. Левин, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 5. – С. 694-700. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-5-694-700.

### Введение

Всё более значимую роль в современном мире играют охранные системы наружного видеонаблюдения. Круг задач, решаемых с их помощью, обширен: от видеофиксации правонарушений на транспортных магистралях до контроля пассажиропотока при обеспечении безопасности на железнодорожных, авто- и аэровокзалах. Условия эксплуатации такого рода систем обуславливают ряд требований, предъявляемых к оптическому тракту – и прежде всего это обеспечение стабильно высокого качества изображения в широком температурном диапазоне и широком спектральном интервале, включающем не только видимый, но и ближний ИК-диапазон.

Немаловажным фактором является и стоимость производства. Стремление к миниатюризации приводит к удорожанию процессов шлифовки и полировки оптических деталей. С другой стороны, применение в качестве материалов оптических полимеров удешевляет изготовление больших серий объективов за счёт технологии прецизионной штамповки [1], а также позволяет воспроизводить сложные асферические формы поверхностей рефракционных линз (РЛ) и при необходимости наносить на них дифракционный микрорельеф. Представленные в ряде работ [2–4] схемные решения пластмассово-линзовых объективов, включающих дифракционные оптические элементы (ДОЭ), обладают значительными преимуществами над аналогами из оптического стекла в части светосилы и ширины рабочего спектрального диапазона.

К основным недостаткам данных гибридных пластмассово-линзовых объективов следует отнести высокие значения коэффициента линейного расширения ( $5 \times 10^{-5} \text{ C}^{-1} < \alpha_{\text{RL}} < 10 \times 10^{-5} \text{ C}^{-1}$ ) и температурного коэффициента показателя преломления ( $-15 \times 10^{-5} \text{ C}^{-1} < \beta_{\text{r,l}} < -8 \times 10^{-5} \text{ C}^{-1}$ ) используемых оптических материалов [5]. Другие проблемы, связанные с ДОЭ, такие как достижение высокой дифракционной эффективности, минимизация спектральной и угловой селективностей, решаются при переходе к двух- и трёхслойным рельефно-фазовым микроструктурам [6–8].

Значительные изменения конструктивных параметров и показателей преломления с изменением температуры не позволяют рассматривать схемные решения гибридных пластмассово-линзовых объективов в качестве оптических трактов камер наружного видеонаблюдения без мер по их атермализации, т.е. решения задачи сохранения основных характеристик объектива (фокусного расстояния, заднего фокального отрезка, сферической и полевых aberrаций и т.д.) при колебаниях температуры [1]. Здесь сразу же заметим, что поскольку с изменением температуры качество изображения ухудшается преимущественно из-за смещения плоскости фокусировки, то под атермализацией, как правило, подразумевают устранение терморасфокусировки (т.е. сохранение заднего фокального отрезка) объектива в заданном температурном диапазоне.

### 1. Оптическая атермализация рефракционно-дифракционного объектива-монокромата

Применение известных способов оптической атермализации, предполагающих подбор материалов линз системы с целью устранения терморасфокусировки [9], в случае пластмассово-линзовых объективов существенно затруднён ввиду ограниченного выбора оптических полимерных материалов. С другой стороны, в работах [10, 11] показана возможность атермализации оптических систем с применением в схеме ДОЭ на примере рефракционно-дифракционного синглета-фокусатора, выполненного из акрила. Данный способ атермализации предполагает в качестве силового компонента принять ДОЭ, а в качестве коррекционного – РЛ, что, как показано в [12], вносит существенные сложности в исправление хроматических aberrаций.

При синтезе оптической схемы значения основных параметров рассчитываемого объектива примем равными представленным в [4]: заднее фокусное расстояние  $f_d' = 3,71$  мм на длине волны  $\lambda_d = 0,58756$  мкм (жёлтая d-линия гелия); диафрагменное число 2,4; угловое поле зрения  $2\omega = 60^\circ$ . Такой выбор позволит в

дальнейшем провести корректные сравнения оптических характеристик двух систем.

В качестве базовой воспользуемся схемой атермализованного рефракционно-дифракционного синглета, выполненного из акрила [10], сферическая аберрация в котором устранена за счёт асферизации одной из поверхностей РЛ. Для коррекции полевых аберраций введём в схему асферическую положительную РЛ из поликарбоната, расстояние между компонентами выберем из условия телецентричности хода главных лучей в пространстве изображений, что позволит минимизировать неоднородность освещённости в плоскости многоэлементного фотоприёмника [13].

Условие атермализации такой двухкомпонентной системы (см. рис. 1) можно представить в следующем виде:

$$\frac{s_{F'}^{(t_2)}}{s_{F'}^{(t_1)}} = 1 + \alpha_{mount} \Delta t, \quad (1)$$

где

$$s_{F'}^{(t_2)} = \frac{1 - d^{(t_2)} \Phi_{hyb}^{(t_2)}}{\Phi^{(t_2)}} \quad (2)$$

– задний фокальный отрезок (здесь и далее верхний индекс в скобках соответствует температуре окружающей среды, при которой определяется та или иная величина);  $\alpha_{mount}$  – коэффициент линейного расширения материала корпусных деталей;  $\Delta t = (t_2 - t_1)$  – диапазон рабочих температур;

$$d^{(t_2)} = d^{(t_1)} (1 + \alpha_{mount} \Delta t) \quad (3)$$

– зависимость расстояния между главными плоскостями двухкомпонентной схемы (см. рис. 1) от диапазона рабочих температур  $\Delta t$ ;

$$\Phi_{hyb}^{(t_2)} = \Phi_{DOE}^{(t_2)} + \Phi_{RL1}^{(t_2)} \quad (4)$$

– оптическая сила бесконечно тонкого рефракционно-дифракционного компонента;

$$\Phi^{(t_2)} = \Phi_{hyb}^{(t_2)} + \Phi_{RL2}^{(t_2)} - d^{(t_2)} \Phi_{hyb}^{(t_2)} \Phi_{RL2}^{(t_2)} \quad (5)$$

– оптическая сила объектива в целом;

$$\Phi_{RL}^{(t_2)} = \Phi_{RL}^{(t_1)} (1 + v_{i,\lambda} \Delta t) \quad (6)$$

– зависимость оптической силы РЛ от диапазона рабочих температур  $\Delta t$  [14];

$$v_{i,\lambda} = \frac{\beta_{i,\lambda}}{n_{RL}^{(t_1)} - 1} - \alpha_{RL} \quad (7)$$

– термооптическая постоянная;  $n_{RL}^{(t_1)}$  – показатель преломления материала РЛ;  $\alpha_{RL}$  и  $\beta_{i,\lambda}$  – коэффициент линейного расширения и температурный коэффициент показателя преломления материала РЛ соответственно;

$$\Phi_{DOE}^{(t_2)} = \frac{\Phi_{DOE}^{(t_1)}}{(1 + \alpha_{RL1} \Delta t)^2} \quad (8)$$

– зависимость оптической силы ДОЭ от диапазона рабочих температур  $\Delta t$  [12].

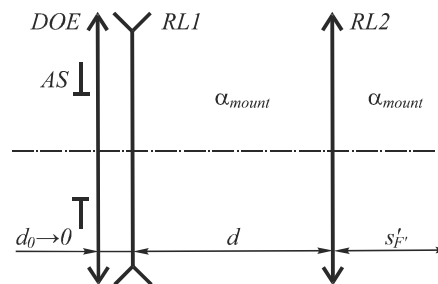


Рис. 1. Схематическое представление двухкомпонентной системы. AS – апертурная диафрагма; DOE – ДОЭ; RL1, RL2 – первая и вторая РЛ

Система из уравнений (1) и (5) определяет устранение терморасфокусировки для случая, представленного на рис. 1. Однако, обладая четырьмя неизвестными, она является неопределённой, поэтому для однозначного решения введём ещё два уравнения. Во-первых, это ранее озвученное условие телецентричности хода главных лучей в пространстве изображений, которое при совмещении входного зрачка с главной плоскостью первого компонента запишется в виде:

$$d^{(t_1)} = \frac{1}{\Phi_{RL2}^{(t_1)}}. \quad (9)$$

В качестве последнего уравнения примем условие устранения кривизны поля изображения системы из тонких линз [14]:

$$\frac{\Phi_{RL1}^{(t_1)}}{n_{RL1}^{(t_1)}} + \frac{\Phi_{RL2}^{(t_1)}}{n_{RL2}^{(t_1)}} = 0. \quad (10)$$

Следует отметить, что сумма Петцваля для ДОЭ равна нулю [15].

Задавая в качестве материалов РЛ полиметилметакрилат ( $\alpha_{RL} = 67,95 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  и  $\beta_{i,\lambda} = -117 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) и поликарбонат ( $\alpha_{RL} = 67 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  и  $\beta_{i,\lambda} = -108,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ), а материала корпусных деталей, например, алюминий ( $\alpha_{mount} = 23 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) и ограничивая диапазон атермализации значением  $t$  от минус 30 до 40  $^\circ\text{C}$ , из уравнений (1)–(10) можно определить оптические силы ДОЭ и РЛ системы.

На рис. 2 представлена оптическая схема полуженного атермализованного рефракционно-дифракционного объектива-монохромата, оптимизированного под значения основных параметров, обозначенных ранее. Объектив-монохромат состоит из двух РЛ, первая из которых представляет собой отрицательный мениск, обращённый выпуклой поверхностью к предмету, на которую нанесена микроструктура ДОЭ. Вторая РЛ является двояковыпуклой. Соотношения оптических сил отдельных компонентов и объектива-монохромата в целом следующие:  $\Phi_{DOE}/\Phi = 1,185$ ;  $\Phi_{RL1}/\Phi = -0,730$ ;  $\Phi_{RL2}/\Phi = 0,965$ .

Для сравнения на рис. 3 представлена оптическая схема объектива-апохромата из [4], а в табл. 1 – значения оптических характеристик для двух систем.

Как видно из рис. 3, объектив-апохромат содержит пять РЛ, первая из которых является двояковыпуклой линзой. Вторая рефракционная линза представляет собой отрицательный мениск, обращённый

выпуклой поверхностью к предмету, на которую нанесена микроструктура ДОЭ. Третья линза является двояковыпуклой, обращённой большей выпуклостью к предмету. Наконец, четвёртая и пятая рефракционные линзы представляют собой асферические положительные мениски, обращённые выпуклостями к предмету. Вторая рефракционная линза объектива-апохромата выполнена из поликарбоната, все остальные линзы – из полиметилметакрилата.

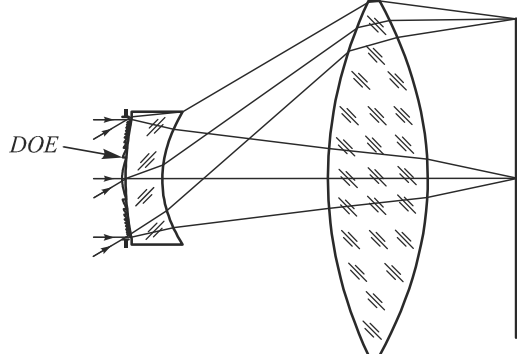


Рис. 2. Оптическая схема атермализованного рефракционно-дифракционного объектива-монохромата

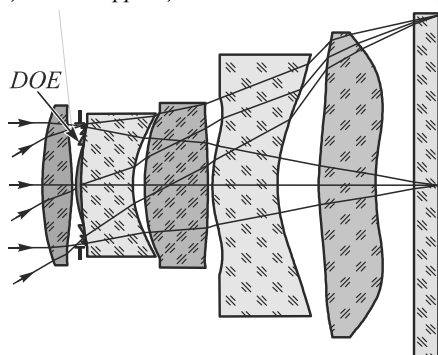


Рис. 3. Оптическая схема объектива-апохромата

Табл. 1. Оптические характеристики пластмассово-линзовых объективов

Характеристика	Объектив-апохромат [4]	Объектив-монохромат
Рабочий спектральный диапазон, мкм	0,4–0,9	–
Рабочий температурный диапазон, °С	–	от –30 до 40
Разрешение при контрасте не менее 0,5 в рабочем спектральном диапазоне для края поля зрения [ $t = 20\text{ °С}$ ], мм <sup>-1</sup>	120	–
Разрешение при контрасте не менее 0,5 в рабочем температурном диапазоне для края поля зрения [ $\lambda_d = 0,58756\text{ мкм}$ ], мм <sup>-1</sup>	–	180
Модуль дисторсии по полю зрения, %	$\leq 1$	$\leq 2$
Угол падения главных лучей на фотоприёмник, °	$\leq 21$	$\leq 4$

Объектив-апохромат хорошо скорректирован в широком спектральном диапазоне, что подтверждается соответствующим значением полихроматической частотно-контрастной характеристики (ЧКХ), однако температурный диапазон работы существенно ограничен (от 14 до 28 °С, критическим ухудшением качества изображения прием разрешения 90 мм<sup>-1</sup> для края поля зрения при контрасте 0,5). Рассчитанный же объектив-монохромат, напротив, обладает превосходной коррекцией термоаббераций, при этом из-за значительного хроматизма, вносимого силовым ДОЭ, рабочий спектральный диапазон не превышает  $\Delta\lambda \leq 4$  нм. Совокупный продольный хроматизм рефракционной части объектива, благодаря выбору в качестве материалов крон-флинтовой пары оптических пластмасс, незначителен ввиду взаимной компенсации хроматических сумм РЛ.

Известно, что при исправлении хроматических aberrаций рефракционно-дифракционных систем в роли силового компонента выступает РЛ, а коррекционного – ДОЭ [16], в случае же атермализации – наоборот. При этом в ряде работ (см. например, [17–19]) показана возможность ахроматизации фокусирующих оптических систем, сконструированных на основе силовых ДОЭ. Однако, в частности, в [17] приведены ограничения на рабочий спектральный диапазон таких систем в зависимости от диафрагменного числа. Так, для схемного решения дифракционного дублета-ахромата без промежуточного изображения (рис. 4) с диафрагменным числом 2,4 дифракционно-ограниченное качество фокусировки достигается в спектральном интервале не более  $\Delta\lambda = 0,022$  мкм при среднем значении длины волны  $\lambda = 0,58756$  мкм. Данный факт ограничивает возможности применения изложенных в [17–19] методик хроматической коррекции случаями оптических систем, работающих с узкоспектральным излучением.

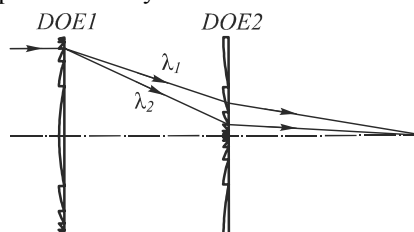


Рис. 4. Оптическая схема дифракционного дублета-ахромата. DOE1 – киноформ; DOE2 – аксикон

## 2. Механическая атермализация рефракционно-дифракционного объектива-апохромата

Второй способ пассивной атермализации – механический, предполагает подбор материалов корпусных деталей с целью устранения терморасфокусировки [9]. Специфика термокомпенсации пластмассово-линзовых систем обусловлена отрицательными значениями термооптических постоянных используемых полимерных материалов, существенно превышающими по модулю (практически на порядок) величины термооптических постоянных стёкол. При этом для большинства стеклян-но-линзовых оптических систем коррекция термо-

расфокусировки вообще не требуется ввиду незначительности изменения заднего фокального отрезка в довольно широком температурном диапазоне.

Условие пассивной механической атермализации можно представить в следующем виде:

$$s'_{F'}(t_2) - s'_{F'}(t_1) = (L_2^{(t_1)} + L_4^{(t_1)})(1 + \alpha_{mount2}\Delta t) - (L_1^{(t_1)} + L_3^{(t_1)})(1 + \alpha_{mount1}\Delta t), \tag{11}$$

где  $L_1, L_2, L_3, L_4$ , – линейные размеры корпусных деталей (см. рис. 5).

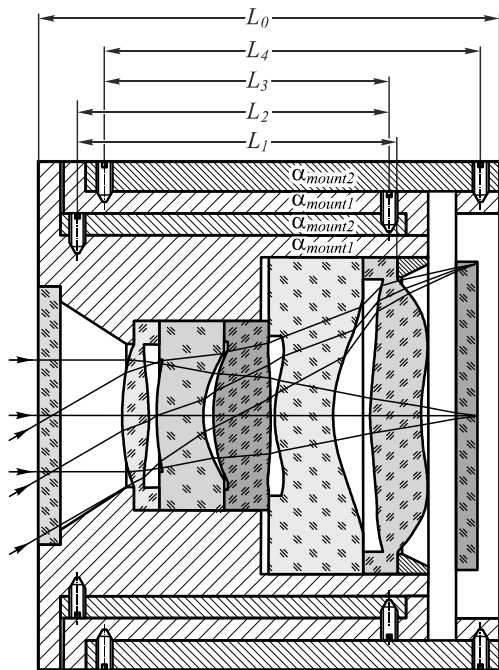


Рис. 5. Схематическое представление конструкции термокомпенсатора

Моделирование, проведенное в программе оптического проектирования ZEMAX [20], для объектива-апохромата, представленного в [4], показало изменение заднего фокального отрезка на величину +0,063 мм в температурном диапазоне  $\Delta t$  от минус 30 до 40°C. Выбирая в качестве материалов термокомпенсатора поликарбонат ( $\alpha_{mount1} = 67 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) и CR-39 [9] ( $\alpha_{mount2} = 138 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ), удаётся устранить терморасфокусировку и сохранить компактность продольного габарита системы  $L_0 \approx 6,4$  мм, если использовать многослойную конструкцию, например, показанную на рис. 5. При этом для компенсации разницы изменений диаметральных размеров промежуточных оправ необходимо изготовить их с продольными пазами (параллельно оптической оси), как показано, например, в [21], что позволит избежать дополнительных механических напряжений.

Если же значения габаритов системы не критичны, то представляется возможным упростить конструкцию термокомпенсатора, исключив промежуточные слои  $L_2$  и  $L_3$ . В этом случае величина продольного габарита возрастает до  $L_0 \approx 12,8$  мм.

В табл. 2 представлены оптические характеристики атермализованного пластмассово-линзового объ-

ектива-апохромата, оптимизированного с целью минимизации термооптических аберраций системы.

Как видно из табл. 2, расширение рабочего температурного диапазона практически не повлияло на значение полихроматической ЧКХ объектива-апохромата.

Табл. 2. Оптические характеристики атермализованного пластмассово-линзового объектива-апохромата

Характеристика	Объектив-апохромат
Рабочий спектральный диапазон, мкм	0,4–0,9
Рабочий температурный диапазон, °C	от минус 30 до 40
Разрешение при контрасте не менее 0,5 в рабочем спектральном диапазоне для края поля зрения [ $t = 20^\circ\text{C}$ ], мм <sup>-1</sup>	120
Разрешение при контрасте не менее 0,5 в рабочем температурном диапазоне для края поля зрения [ $\lambda_d = 0,58756 \text{ } ^\circ\text{мкм}$ ], мм <sup>-1</sup>	118
Модуль дисторсии по полю зрения, %	≤1
Угол падения главных лучей на фотоприёмник, °	≤21

**Заключение**

Рассмотренный способ пассивной оптической атермализации показал, что устранение терморасфокусировки объектива, все рефракционные линзы которого выполнены из оптических полимерных материалов, возможно лишь благодаря включению в схему объектива ДОО. При этом требуется, чтобы оптическая сила ДОО существенно превышала оптическую силу рефракционной части объектива. Это, в свою очередь, приводит к значительному хроматизму, снижение которого до приемлемого уровня может быть осуществлено только в весьма ограниченном спектральном диапазоне.

Эффективность оптической атермализации пластмассово-линзового объектива с помощью ДОО продемонстрирована на примере объектива-монохромата с задним фокусным расстоянием  $f_d' = 3,71$  мм, диафрагменным числом 2,4 и угловым полем зрения  $2\omega = 60^\circ$ . В спектральном диапазоне излучения, не превышающем 4 нм, он формирует изображение с разрешением до 90 мм<sup>-1</sup> при контрасте не менее 0,5 в интервале рабочих температур от минус 30 до 40°C.

В отсутствие оптически сильного ДОО в схеме пластмассово-линзового объектива с фиксированными межлинзовыми воздушными промежутками, с ростом температуры окружающей среды существенно увеличивается задний фокальный отрезок объектива. Минимизировать рост заднего фокального отрезка, а следовательно, и расширить рабочий температурный диапазон с сохранением компактности продольного габарита системы и дифракционно-ограниченного качества изображения в заданном спектральном диа-

пазоне позволяет пассивная механическая атермализация, достигаемая с помощью многослойного термокомпенсатора.

Предложенный в настоящей статье атермализованный пластмассово-линзовый объектив-апохромат с четырёхслойным термокомпенсатором при значениях заднего фокусного расстояния  $f_d' = 3,71$  мм, дифракционного числа 2,4, углового поля зрения  $2\omega = 60^\circ$ , в рабочем температурном диапазоне от минус 30 до 40 °С формирует изображение с разрешением 118 мм<sup>-1</sup> при контрасте не менее 0,5 в спектральном диапазоне 0,4–0,9 мкм.

### Литература

1. **Schaub, M.** Molded optics design and manufacture / M. Schaub, J. Schwiegerling, E.C. Fest, A. Symmons, R.H. Shepard. – Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011. – 260 p. – ISBN: 978-1-4398-3256-1.
2. **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, Issue 23. – P. 4379-4384. – DOI: 10.1364/AO.49.004379.
3. **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.
4. **Пат. RU 2464600 Российской Федерация G02B 9/60, G02B 13/14, G02B 5/32.** Пластмассово-линзовый объектив апохромат / Грейсух Г.И., Степанов С.А., Ежов Е.Г., Захаров О.А., Левин И.А.; заявитель и правообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Пензенский государственный университет архитектуры и строительства" (ПГУАС); № 2010148974/28, заявл. 30.11.2010, опубл. 20.10.2012. Бюл. № 29. – 8 с.: ил.
5. **Baumer, S.** Handbook of plastic optics / S. Baumer. – Weinheim: Wiley-VCH, 2005. – 189 p. – ISBN: 978-3-5274-0424-7.
6. **Грейсух, Г.И.** Эффективность рельефно-фазовых дифракционных элементов при малом числе зон Френеля / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, А.В. Калашников, И.А. Левин, С.А. Степанов // Оптика и спектроскопия. – 2012. – Т. 113, № 4. – С. 468-473.
7. **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. – DOI: 10.1016/j.optcom.2013.01.009.
8. **Грейсух, Г.И.** Спектральная и угловая зависимость эффективности дифракционных линз с двухрельефной и двухслойной микроструктурой / Г.И. Грейсух, В.А. Данилов, Е.Г. Ежов, С.А. Степанов, Б.А. Усиевич // Оптический журнал. – 2015. – Т. 82, № 5. – С. 56-61.
9. **Jamieson, T.H.** Athermalization of optical instruments from the optomechanical viewpoint / T.H. Jamieson // Proceedings of SPIE. – 1992. – Vol. 10265. – P. 131-159. – DOI: 10.1117/12.61105.
10. **Londono, C.** Athermalization of a single-component lens with diffractive optics / C. Londono, W.T. Plummer, P.P. Clark // Applied Optics. – 1993. – Vol. 32, Issue 13. – P. 2295-2302. – DOI: 10.1364/AO.32.002295
11. **Behrmann, G.P.** Influence of temperature on diffractive lens performance / G.P. Behrmann, J.P. Bowen // Applied Optics. – 1993. – Vol. 32, Issue 14. – P. 2483-2489. – DOI: 10.1364/AO.32.002483.
12. **Левин, И.А.** Термооптические aberrации радиально-симметричных дифракционных оптических элементов / И.А. Левин // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 1. – С. 51-56.
13. **Бронштейн, И.Г.** Выбор оптической схемы и расчёт малогабаритных объективов для мобильных телефонов / И.Г. Бронштейн, В.А. Зверев, И.Л. Лившиц, Y.-G. Kim, T.-Y. Kim, Ph.-H. Jung // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76, № 5. – С. 25-31.
14. Техническая оптика: учебное пособие для вузов / М.М. Русинов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1979. – 488 с.
15. **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. – ISBN: 978-0-8194-2451-8.
16. Оптика дифракционных элементов и систем / С.Т. Бобров, Г.И. Грейсух, Ю.Г. Туркевич. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1986. – 223 с.
17. **Farn, M.W.** Diffractive doublets corrected at two wavelengths / M.W. Farn, J.W. Goodman // Journal of the Optical Society of America A. – 1991. – Vol. 8, Issue 6. – P. 860-867. – DOI: 10.1364/JOSAA.8.000860.
18. **Грейсух, Г.И.** Анализ возможностей ахроматизации оптических систем, состоящих из дифракционных элементов / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.В. Казин, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 2. – С. 187-193.
19. **Карпеев, С.В.** Расчёт и анализ трёхволнового дифракционного фокусирующего дублета / С.В. Карпеев, А.В. Устинов, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 2. – С. 173-178. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-173-178.
20. Zemax [Электронный ресурс]. – URL: <http://zemax.com/> (дата обращения 17.07.2017).
21. **Медведев, А.В.** Атермализация объективов прицельно-наблюдательных комплексов как средство обеспечения жизнедеятельности объектов БТВТ / А.В. Медведев, А.В. Гринкевич, С.Н. Князева // Фотоника. – 2016. – № 2(56). – С. 94-109.

### Сведения об авторах

**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 специалистом по сертификации в отделе системы менеджмента качества ЗАО НПП «МедИнж». 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](mailto:i.a.levin@mail.ru).

**Степанов Сергей Алексеевич**, 1951 года рождения. В 1974 году окончил Куйбышевский государственный университет (ныне Самарский университет) по специальности «Физика». Доктор физико-математических наук (1999 г.), профессор (2001 г.), работает профессором кафедры физики и химии Пензенского государственного

университета архитектуры и строительства. Является членом Европейского оптического общества (EOS) и Российского оптического общества им. Д.С. Рождественского. С.А. Степанов – специалист в области расчета оптических систем, дифракционной и градиентной оптики. В списке научных работ С.А. Степанова более 120 статей, 2 монографии, 5 авторских свидетельств. E-mail: [asut@pguas.ru](mailto:asut@pguas.ru).

ГРПТИ: 29.31.01.

Поступила в редакцию 25 июля 2017 г. Окончательный вариант – 17 сентября 2017 г.

## PASSIVE ATHERMALIZATION OF REFRACTIVE-DIFFRACTIVE PLASTIC LENSES

I.A. Levin<sup>1</sup>, S.A. Stepanov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC “MedIng”, Penza, Russia,

<sup>2</sup>Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia

### Abstract

Possibilities of passive athermalization of plastic-lens systems are investigated. In particular, circuit designs of two refractive-diffractive lenses are presented, the thermal defocusing of which is eliminated by optical and mechanical methods, respectively. An achievable width of the working spectral range of the refractive-diffractive lenses is estimated.

**Keywords:** athermalization, thermal defocusing, achromatization, diffractive optical element, refractive-diffractive lens.

**Citation:** Levin IA, Stepanov SA. Passive athermalization of refractive-diffractive plastic lenses. *Computer Optics* 2017; 41(5): 694-700. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-5-694-700.

### References

- [1] Schaub M, Schwiegerling J, Fest EC, Symmons A, Shepard RH. *Molded Optics Design and Manufacture*. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group; 2011. ISBN: 978-1-4398-3256-1.
- [2] Greisukh GI, Ezhov EG, Levin IA, Stepanov SA. Design of achromatic and apochromatic plastic micro-objectives. *Appl Opt* 2010; 49(23): 4379-4384. DOI: 10.1364/AO.49.004379.
- [3] Greisukh GI, Ezhov EG, Levin IA, Stepanov SA. Design of plastic-lens micro-objectives superachromats [In Russian]. *Computer Optics* 2011; 35(4): 473-479.
- [4] Greisukh GI, Stepanov SA, Ezhov EG, Zakharov OA, Levin IA. Plastic apochromatic lens [In Russian]. *Pat RF of Invent N2464600 of October 20, 2012, Russian Bull of Inventions N29, 2012*.
- [5] Baumer S. *Handbook of plastic optics*. Weinheim: Wiley-VCH; 2005. ISBN: 978-3-5274-0424-7.
- [6] Greisukh GI, Ezhov EG, Kalashnikov AV, Levin IA, Stepanov SA. The efficiency of relief-phase diffractive elements at a small number of Fresnel zones. *Optics and Spectroscopy* 2012; 113(4): 425-430. DOI: 10.1134/S0030400X12100037.
- [7] 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. *Opt Commun* 2013; 295: 104-107. DOI: 10.1016/j.optcom.2013.01.009.
- [8] 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. DOI: 10.1134/S0030400X15060090.
- [9] Jamieson TH. Athermalization of optical instruments from the optomechanical viewpoint. *Proc SPIE* 1992; 10265: 131-159. DOI: 10.1117/12.61105.
- [10] Londono C, Plummer WT, Clark PP. Athermalization of a single-component lens with diffractive optics. *Appl Opt* 1993; 32(13): 2295-2302. DOI: 10.1364/AO.32.002295.
- [11] Behrmann GP, Bowen JP. Influence of temperature on diffractive lens performance. *Appl Opt* 1993; 32(14): 2483-2489. DOI: 10.1364/AO.32.002483.
- [12] Levin IA. Thermo-optical aberrations of radially symmetric diffractive optical elements [In Russian]. *Computer Optics* 2016; 40(1): 51-56. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-1-51-56.
- [13] Bronshtën IG, Zverev VA, Livshits IL, Kim Y-G, Kim T-Y, Jung Ph-H. Choosing an optical setup and designing compact objectives for mobile telephones. *J Opt Technol* 2009; 76(5): 268-273. DOI: 10.1364/JOT.76.000268.
- [14] Rusinov MM. *Technical optics: Study guide for university* [In Russian]. Leningrad: “Mashinostroenie” Publisher; 1979.
- [15] Greisukh GI, Bobrov ST, Stepanov SA. *Optics of diffractive and gradient-index elements and systems*. Bellingham: SPIE Press; 1997. ISBN: 978-0-8194-2451-8.
- [16] Bobrov ST, Greisukh GI, Turkevich YuG. *Optics of diffractive elements and systems* [In Russian]. Leningrad: “Mashinostroenie” Publisher; 1986.
- [17] Farn MW, Goodman JW. Diffractive doublets corrected at two wavelengths. *J Opt Soc Am A* 1991; 8(6): 860-867. DOI: 10.1364/JOSAA.8.000860.
- [18] Greisukh GI, Ezhov EG, Kazin SV, Stepanov SA. Optical systems with diffractive elements: ways of the chromatism correction [In Russian]. *Computer Optics* 2010; 34(2): 187-193.
- [19] Karpeev SV, Ustinov AV, Khonina SN. Design and analysis of a three-wave diffraction focusing doublet [In Russian]. *Computer Optics* 2016; 40(2): 173-178. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-173-178.
- [20] Zemax. Source: (<http://zemax.com/>).
- [21] Medvedev AV, Grinkevich AV, Knyazeva SN. Objective athermalization of sighting and observation systems as an instrument to ensure functioning of armor and tank weapons [In Russian]. *Photonics* 2016; 2(56): 94-109.

*Authors' information*

**Il'ya Anatolievich Levin** (b. 1987) graduated (2009) from the Penza State University, majoring in Physics. He is Ph.D certification specialist at JSC "MedEng". His current research interests include design of optical systems. He is co-author of 22 scientific publications.

**Sergei Alekseevich Stepanov** (b. 1951) graduated (1974) from Kuibyshev State University (presently, Samara National Research University), majoring in Physics. He received his Doctor in Physics & Maths (1999) degrees from Samara National Research University, professor (2001). He is professor in the Physics and Chemistry department of Penza State University of Architecture and Construction. He is a 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 more 120 scientific papers, 2 monographs, and 5 inventions.

---

*Received July 25, 2017. The final version – September 17, 2017.*

---