



УДК 535.317

## РАСЧЕТ ТЕРМОНЕРАССТРАИВАЕМЫХ ИНФРАКРАСНЫХ ОБЪЕКТИВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИФРАКЦИОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

А.С. Гаршин<sup>a</sup>, К.А. Андреев<sup>b</sup><sup>a</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация<sup>b</sup> АО «ГИРООПТИКА», Санкт-Петербург, 194044, Российская Федерация

Адрес для переписки: alitmo@yandex.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию 07.09.18, принята к печати 04.10.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-961-967

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Гаршин А.С., Андреев К.А. Расчет термонерасстраиваемых инфракрасных объективов с использованием дифракционных поверхностей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 6. С. 961–967. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-961-967

### Аннотация

Рассмотрена задача расчета инфракрасных термонерасстраиваемых объективов в условиях ограниченной номенклатуры материалов. Представлены результаты анализа термооптических свойств материалов, работающих в дальнем инфракрасном диапазоне. Проанализированы термооптические свойства дифракционных оптических элементов. Установлено, что возможным решением проблемы атермализации инфракрасного объектива в условиях ограниченной номенклатуры материалов может послужить применение дифракционных элементов. Составлена система уравнений для габаритного расчета инфракрасных объективов с пассивной атермализацией с применением дифракционных оптических элементов. Исследовано влияние вторичного спектра на функцию передачи модуляции оптической системы в комбинациях оптических материалов с дифракционными элементами. Показан пример расчета термонерасстраиваемого инфракрасного объектива с дифракционным элементом.

### Ключевые слова

дифракционные поверхности, инфракрасные объективы, вторичный спектр, термооптические аберрации, атермализация

## DESIGN OF ATHERMALIZED INFRARED LENSES INVOLVING DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS

A.S. Garshin<sup>a</sup>, K.A. Andreev<sup>b</sup><sup>a</sup>ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation<sup>b</sup>JSC GYROOPTICS, Saint Petersburg, 194044, Russian Federation

Corresponding author: alitmo@yandex.ru

### Article info

Received 07.09.18, accepted 04.10.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-961-967

Article in Russian

**For citation:** Garshin A.S., Andreev K.A. Design of athermalized infrared lenses involving diffractive optical elements. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 961–967 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-961-967

### Abstract

The paper considers the problem of infrared athermalized lenses design involving a restricted list of materials. We analyzed thermo-optical properties of the materials, working in long-wave infrared range, and analysis results are presented. Thermo-optical properties of diffractive optical elements (DOE) are analyzed. It is established that the usage of diffractive elements can become a possible solution for the problem of infrared lens athermalization under conditions of restricted list of materials. The set of equations is developed for dimensional calculation of infrared lenses with passive athermalization by DOE application. We studied the effect of a secondary spectrum on modulation transfer function of an optical system in combinations of optical materials with DOE. Research results are given. The example of infrared athermalized lens calculation with DOE is shown.

### Keywords

DOE, infrared lenses, secondary spectrum, thermo-optical aberrations, athermalization

**Введение**

Инфракрасная (ИК) техника широко применяется в медицине, военной и автомобильной промышленности, а также в спасательных и пожарных операциях. Список решаемых задач довольно широк: наблюдение, поиск, анализ, слежение и т.д.

Оптические приборы, работающие в ИК-области спектра, преимущественно эксплуатируются в сложных условиях окружающей среды, что может приводить к ухудшению качества изображения оптической системы (ОС). Прежде всего это относится к колебаниям температуры окружающей среды, которая может изменяться в диапазоне от  $-50$  до  $+60$  °С. Вследствие этого атермализация (сохранение оптических характеристик ОС при температурных колебаниях) ИК-объективов имеет большое значение для практической и научной деятельности [1–3].

Термооптические аберрации, приводящие к терморасфокусировке, возникают из-за изменений конструктивных параметров ОС при колебаниях температуры окружающей среды. Атермализация ОС в условиях ограниченной номенклатуры оптических материалов и без применения сложных электромеханических устройств представляет собой важную и актуальную задачу. Известно большое количество посвященных теме пассивной атермализации ОС [4–6] методик, имеющих ряд недостатков и не всегда позволяющих осуществить полученные решения. В связи с этим создание альтернативного решения задачи атермализации ОС с учетом всех условий позволит проектировать новые оптические системы ИК-объективов.

**Анализ свойств оптических материалов ИК-диапазона**

В настоящее время номенклатура оптических материалов, прозрачных в инфракрасном спектральном диапазоне, невелика. Для коррекции термооптических аберраций, как правило, применяют различные халькогенидные стекла, например, IRG, Amtir, Irtan, Gasir и т.д. [7–9]. В России существуют аналоги зарубежных оптических материалов, прозрачных в ИК-области спектра (бескислородные стекла серии ИКС), однако производство их приостановлено. Такие материалы, как KPC5, GaAs, на данный момент не освоены производством (в качестве материалов для линз).

При выборе комбинаций материалов оптических компонентов уделяется особое внимание температурному коэффициенту линейного расширения  $\alpha$ , температурному коэффициенту изменения показателя преломления  $\beta_{отн}$  и термооптической постоянной  $V$ . Использование оптических материалов с высокими значениями указанных параметров приводит к существенному влиянию термооптических аберраций на качество изображения ОС при температурных колебаниях.

Материал	$n$	$\nu$	$\beta_{отн} \cdot 10^{-6}$	$\alpha \cdot 10^{-6}$	$V \cdot 10^{-5}$
Ge	4,0043	790,61	411	5,7	13,11
ZnSe	2,4064	57,64	52,5	7,1	3,02
ZnS	2,2002	22,99	46,5	6,6	3,21

Таблица 1. Термооптические характеристики материалов

Как было замечено ранее, номенклатура оптических материалов, прозрачных в спектральном диапазоне 8–12 мкм, применяемых и хорошо освоенных производством, ограничена (табл. 1) германием (Ge), селенидом цинка (ZnSe) и сульфидом цинка (ZnS). Для оценки величины термооптической аберрации положения были рассчитаны объективы из доступных материалов с  $f=45$  мм и рабочим диапазоном температур  $\pm 60$  °С. Полученные значения термоабберации положения при выполнении условия ахроматизации для всех комбинаций (табл. 2) превышают дифракционную глубину резкости объектива [10] при малых значениях диафрагменных чисел ( $K$ ). Поэтому одновременная атермализация и ахроматизация ОС с данными материалами невозможна.

Комбинация материалов	Термоабберация положения, мм	Дифракционная глубина резкости, мм		
		$K=1$	$K=1,5$	$K=2$
ZnSe-Ge	0,362	$\pm 0,024$	$\pm 0,054$	$\pm 0,096$
ZnS-Ge	0,375			
ZnSe-ZnS	0,078			

Таблица 2. Термооптическая аберрация положения

Преодолеть эту проблему позволит применение дифракционных оптических элементов (ДОЭ). Основным отличительным свойством дифракционного оптического элемента от рефракционного является то, что дисперсия ДОЭ противоположна по знаку дисперсии рефракционного. Данная особенность

обусловлена тем, что коэффициент средней дисперсии дифракционного элемента зависит только от спектрального диапазона работы ИК-объектива [11]. Поэтому ДОО вводится в оптическую систему для ее ахроматизации. Кроме того, термооптическая постоянная ДОО зависит только от свойств материала подложки. Вследствие этого, комбинируя дифракционный элемент с рефракционным (гибридные элементы), возможно рассчитывать ахроматизированные и атермализованные ОС в условиях ограниченной номенклатуры материалов [12].

Дифракционные оптические элементы значительно улучшают качество оптической системы, не увеличивая (и даже иногда снижая) ее стоимость. Применение ДОО в оптических системах инфракрасных объективов позволяет добиться коррекции хроматизма, уменьшения веса системы и числа оптических элементов [13–15].

### Габаритный расчет оптической системы из трех элементов

Для габаритного расчета ОС атермализованного инфракрасного объектива выбрана оптическая система, состоящая из двух линз и киноформа, нанесенного на одну из поверхностей линз. Для этого была составлена система уравнений, включающая

– условие масштаба:

$$\Phi = h_1\Phi_1 + h_2\Phi_2 + h_3\Phi_3 = 1 \quad (1)$$

где  $h_1 = h_2 = h_3 = 1$ ,  $h_1, h_2, h_3$  – значения высоты первого параксиального луча;  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$  – оптические силы компонентов;  $\Phi$  – оптическая сила всей системы;

– условие исправления хроматизма положения

$$\frac{h_1^2\Phi_1}{\nu_1} + \frac{h_2^2\Phi_2}{\nu_2} + \frac{h_3^2\Phi_3}{\nu_3} = 0, \quad (2)$$

– условие атермализации

$$T_1 = \Phi_1 h_1^2 V_1 + \Phi_2 h_2^2 V_2 + \Phi_3 h_3^2 \cdot 2 \cdot \alpha = 0, \quad (3)$$

$\alpha$  – коэффициент линейного расширения материала подложки/линзы.

В результате проведенного габаритного расчета оптической системы атермализованного ИК-объектива были получены относительные значения оптической силы компонентов (табл. 3).

№	Комбинация материалов	$\Phi_1$	$\Phi_2$	$\Phi_3$
1	ZnSe-Ge-ДОО	1,1583	-0,6528	0,0482
2	ZnS-Ge-ДОО	1,0972	-0,6608	0,1172
3	ZnSe-ZnS-ДОО	43,8792	-40,3906	-2,4886

Таблица 3. Комбинации атермализованных ИК-объективов

### Исследование и анализ вторичного спектра

Комбинация ZnSe-ZnS-ДОО обладает крайне высокими значениями оптической силы компонентов и величиной вторичного спектра -0,09125. Коэффициент вторичного спектра комбинации ZnS-Ge-ДОО (0,003831) более чем в три раза превышает коэффициент вторичного спектра ZnSe-Ge-ДОО (0,001267), в связи с этим дальнейшие расчеты проводились с этой комбинацией.

При дальнейшем анализе вторичного спектра комбинации ZnSe-Ge-ДОО была составлена сводная табл. 4, содержащая значения дифракционной глубины резкости ОС при различных относительных отверстиях и вторичного спектра в зависимости от фокусного расстояния ИК-объектива. Как видно из таблицы, значения вторичного спектра в большинстве случаев превышают дифракционную глубину резкости оптической системы ИК-объектива при рассмотренных диафрагменных числах от 1 до 1,5.

Вследствие этого при расчетах объективов таких типов следует учитывать вторичный спектр, существенно влияющий на качество изображения оптических систем инфракрасных приборов.

K	Дифракционная глубина резкости, мкм	Вторичный спектр, мкм			
		$f'=30$ мм	$f'=45$ мм	$f'=70$ мм	$f'=100$ мм
1,0	24,0	38,1	57,1	88,7	126,7
1,1	29,1				
1,2	34,6				
1,3	40,6				
1,4	47,1				
1,5	54,1				

Таблица 4. Значения вторичного спектра ИК-объективов

На следующем этапе анализа исследовано влияние вторичного спектра на функцию передачи модуляции (ФПМ) оптической системы ИК-объектива.

Вторичный спектр положения является продольной аберрацией, численно равной разности задних отрезков системы для основной длины волны и двух крайних длин волн спектрального диапазона (рис. 1). При этом плоскость наилучшей установки (ПНУ) располагается между фокусами для главной ( $F'_2$ ) и двух крайних длин волн ( $F'_{1,3}$ ), поэтому можно приближенно оценить вторичный спектр положения  $\delta s'$  величиной условно эквивалентной ему дефокусировки  $\delta s'/2$ .

Результаты проведенного исследования представлены в табл. 5. Рассматривались приемник излучения № 1 – разрешение  $640 \times 480$  пкс, размер пиксела 17 мкм, частота Найквиста 30 лин/мм, приемник № 2 – разрешение  $320 \times 256$  пкс, размер пиксела 30 мкм, частота Найквиста 17 лин/мм.

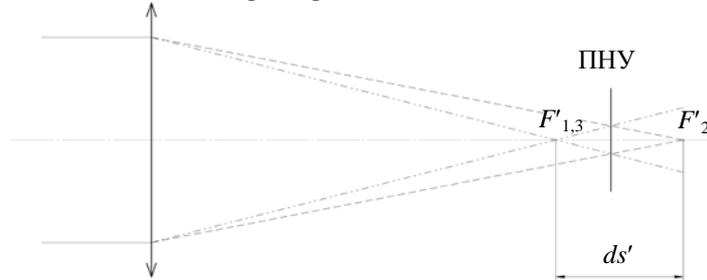


Рис. 1. Схема эквивалентной оценки влияния вторичного спектра

Приемник №1					Приемник №2				
$f'$ , мм	$K$	Контраст	Дефокусировка, мкм	Контраст с учетом дефокусировки	$f'$ , мм	$K$	Контраст	Дефокусировка, мкм	Контраст с учетом дефокусировки
30	1	0,57	19,05	0,51	30	1	0,76	19,05	0,71
	1,1	0,54		0,48		1,1	0,74		0,7
	1,2	0,51		0,46		1,2	0,72		0,69
	1,3	0,48		0,43		1,3	0,69		0,67
	1,4	0,44		0,41		1,4	0,67		0,66
	1,5	0,41		0,38		1,5	0,66		0,64
45	1	0,57	28,55	0,38	45	1	0,76	28,55	0,63
	1,1	0,54		0,39		1,1	0,74		0,64
	1,2	0,51		0,4		1,2	0,72		0,64
	1,3	0,48		0,4		1,3	0,69		0,63
	1,4	0,44		0,39		1,4	0,67		0,62
	1,5	0,41		0,38		1,5	0,66		0,61
70	1	0,57	44,35	0,15	70	1	0,76	44,35	0,44
	1,1	0,54		0,21		1,1	0,74		0,48
	1,2	0,51		0,25		1,2	0,72		0,51
	1,3	0,48		0,28		1,3	0,69		0,53
	1,4	0,44		0,29		1,4	0,67		0,54
	1,5	0,41		0,3		1,5	0,66		0,54
100	1	0,57	63,35	0	100	1	0,76	63,35	0,26
	1,1	0,54		0,06		1,1	0,74		0,33
	1,2	0,51		0,12		1,2	0,72		0,37
	1,3	0,48		0,17		1,3	0,69		0,41
	1,4	0,44		0,21		1,4	0,67		0,44
	1,5	0,41		0,22		1,5	0,66		0,46

Таблица 5. Исследование вторичного спектра

При помощи данных табл. 5 можно предварительно оценить потенциальное качество изображения ИК-объектива и исходя из требований к оптической системе сделать выводы о возможности применения выбранной комбинации оптических материалов.

### Габаритный расчет оптической системы из пяти элементов

По ряду причин (например, при получении слишком жестких допусков на изготовление ОС, либо недостаточного количества оптимизационных параметров и т.д.) может возникнуть необходимость расчета оптической системы ИК-объектива, состоящей из большого количества элементов. Поэтому в настоящей работе также рассмотрен пример габаритного расчета ОС, состоящей из четырех линз и ДОЭ (рис. 2). Для этого была составлена система уравнений, содержащая условие масштаба, условие исправления хроматизма положения и условие атермализации.

Для упрощения габаритного расчета оптической системы атермализованного ИК-объектива в качестве начальной точки была выбрана ОС, состоящая из двух разнесенных компонентов с равными оптическими силами. Вторым компонентом является классической ахромат Ge-ZnSe с некоторой термооптической аберрацией положения. Для ее компенсации был рассчитан первый ахроматический компонент ZnSe-Ge-ДОЭ, аберрация которого равна термоаберрации положения второго компонента и противоположна по знаку.

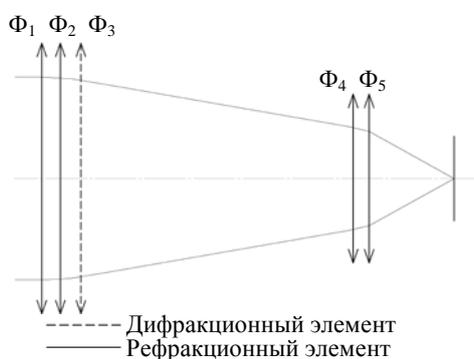


Рис. 2. Оптическая система инфракрасного объектива из пяти элементов

В ходе проведенного габаритного расчета ОС атермализованного инфракрасного объектива получены величины относительных оптических сил компонентов и расстояния ( $d$ ) между ними. Результаты расчетов представлены в табл. 6.

Комбинация материалов	$\Phi_1$	$\Phi_2$	$\Phi_3$	$\Phi_4$	$\Phi_5$	$d$ , мм
ZnSe-Ge-ДОЭ-Ge-ZnSe	1,158	-0,653	0,048	0,597	-0,044	0,350

Таблица 6. Комбинация атермализованного ИК-объектива

### Пример расчета ИК-объектива из пяти компонентов

Аберрационный расчет оптической системы атермализованного инфракрасного объектива с фокусным расстоянием 45 мм и относительным отверстием 1:1.3 проводился для приемника излучения с характеристиками, представленными в табл. 7.

Тип приемника	Микроболометр
Формат	640×480
Размер элемента	17 мкм
Диапазон температур	-40 до +60°C

Таблица 7. Характеристики приемника изображения

Конструктивные параметры оптической системы атермализованного ИК-объектива, полученные в ходе настоящего аберрационного расчета, приведены в табл. 8. Дифракционная оптическая поверхность нанесена на вторую поверхность второй линзы. Вторая поверхность третьей линзы является поверхностью вращения второго порядка с максимальным отступлением от сферы 18 мкм. Использование в объективе асферической поверхности позволяет скорректировать остаточные монохроматические аберрации. Дифракционный оптический элемент имеет 16 зон с минимальной шириной 0,52 мм между ними. Дифракционная эффективность ДОЭ [11] в заданном спектральном диапазоне составляет 94,3 %.

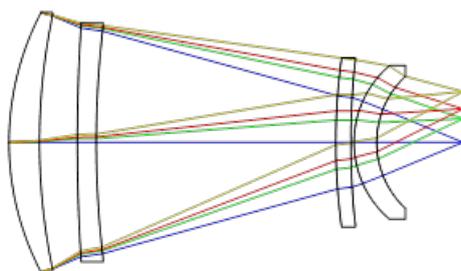


Рис. 3. Внешний вид атермализованного инфракрасного объектива

При колебаниях температуры от  $-40$  до  $+60$  °С ИК-объектив (рис. 3) сохраняет дифракционное качество изображения по всему полю, величина заднего отрезка ОС изменяется в пределах 18 мкм.

№	Радиус кривизны, мм	Расстояние, мм	Материал	Световой диаметр, мм
1	37,50	4,03	ZnSe	17,30
2	83,95	5,00		16,95
3	248,30	2,50	Ge	15,90
4*	133,35	31,65		15,56
5	83,56	2,00	Ge	11,25
6	115,35**	0,40		11,01
7	13,521	3,00	ZnSe	10,22
8	12,134	11,43		8,80

\* ДООЭ

\*\* Уравнение поверхности  $x^2+y^2=230,7 \cdot z+41,71624 \cdot z^2$

Таблица 8. Конструктивные параметры

ФПМ инфракрасного объектива оценивалась на частоте Найквиста (рис. 4). Полученное значение контраста совпадает с предварительными расчетами, приведенными в табл. 6.

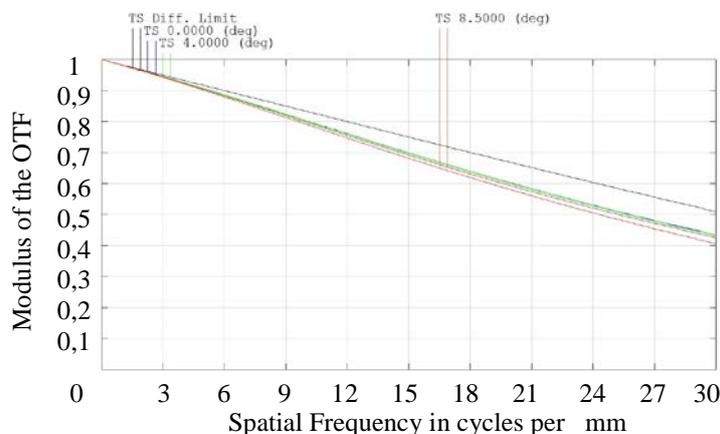


Рис. 4. Функция передачи модуляции объектива с  $f=45$  мм на частоте Найквиста

### Заключение

В работе проанализированы термооптические свойства материалов, наиболее часто применяемых в дальней инфракрасной области спектра, проанализированы различные комбинации дифракционных поверхностей. Проведено исследование вторичного спектра выбранных комбинаций, в результате которого получены расчетные значения контраста будущих объективов на частоте Найквиста двух приемников излучения. Данное исследование позволит уже на этапе габаритного расчета определить достижимое качество изображения разрабатываемого объектива. Рассчитан атермализованный инфракрасный объектив с использованием дифракционной поверхности с уровнем контраста, соответствующим теоретическому расчету.

## Литература

1. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. М.: Логос, 2004. 444 с.
2. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. М.: Логос, 2011. 568 с.
3. Ллойд Дж. Системы тепловидения. М.: Мир, 1978. 416 с.
4. Roberts M. Athermalisation of infrared optics: a review // *Proc. SPIE*. 1989. V. 1049. P. 72–81. doi: 10.1117/12.951409
5. Tamagawa Y., Wakabayashi S., Tajime T. New design method for athermalized optical systems // *Proc. SPIE*. 1992. V. 1752. P. 232–238. doi: 10.1117/12.130734
6. Leniewski M., Kryszczyński T. Athermalization of optical systems // *Proc. SPIE*. 1998. V. 3320. P. 297–306. doi: 10.1117/12.301355
7. Hilton A.R., McCord J., Whaley G. Production of infrared-transmitted chalcogenide glasses // *Proc. SPIE*. 1998. V. 3424. P. 47–59. doi: 10.1117/12.323763
8. Choi J.H., Jang W.J., Cha D.H., Kim J.H., Kim H.J. Chalcogenide glass with good thermal stability for the application of molded infrared lenses // *Proc. SPIE*. 2014. V. 9253. Art. 925310. doi: 10.1117/12.2068005
9. Gleason B., Siskin L., Smith C., Richardson K. Designing mid-wave infrared (MWIR) thermo-optic coefficient (dn/dT) in chalcogenide glasses // *Proc. SPIE*. 2016. V. 9822. Art. 982207. doi: 10.1117/12.2229056
10. Запрыгаева Л.А., Свешникова И.С. Расчет и проектирование оптических систем. М.: Логос, 2000. 584 с.
11. Wang J., Vue C. Athermalization and thermal characteristics of multilayer diffractive optical elements // *Applied Optics*. 2015. V. 54. N 33. P. 9665–9670. doi: 10.1364/AO.54.009665
12. Wood A.P., Lewell L., Manning P.A., Donohou P.P. Passively athermalised hybrid objective for a far infrared uncooled thermal imager // *Proc. SPIE*. 1996. V. 2744. P. 500–509. doi: 10.1117/12.243490
13. Mann A. *Infrared Optics and Zoom Lenses*. 2<sup>nd</sup> ed. Washington: SPIE, 2009. 164 p.
14. Ган М.А., Бармичева Г.В., Старков А.А. Анализ эффективности применения асферико-дифракционных элементов в оптических системах для ИК области // Сборник трудов 9 Международной конференции "Прикладная оптика-2010". СПб, 2010. С. 227–230.
15. Chen C.W. Athermalized and Achromatized Optical Systems Employing Diffractive Optical Element. Patent US5691847A, 1994.

## Авторы

**Гаршин Алексей Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 56888628500, ORCID ID: 0000-0001-8916-7154, alitmo@yandex.ru

**Андреев Кирилл Алексеевич** – ведущий инженер, АО «ГИРООПТИКА», Санкт-Петербург, 194044, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0001-9738-9144, krim\_yo@mail.ru

## References

1. Tarasov V.V., Yakushenkov Yu.G. *Infrared Tracking Systems*. Moscow, Logos Publ., 2004, 444 p. (in Russian)
2. Yakushenkov Yu.G. *Theory and Calculation of Optoelectronic Devices*. Moscow, Logos Publ., 2011, 568 p. (in Russian)
3. Lloyd J.M. *Thermal Imaging Systems*. Springer, 1975, 456 p. doi: 10.1007/978-1-4899-1182-7
4. Roberts M. Athermalisation of infrared optics: a review. *Proc. SPIE*, 1989, vol. 1049, pp. 72–81. doi: 10.1117/12.951409
5. Tamagawa Y., Wakabayashi S., Tajime T. New design method for athermalized optical systems. *Proc. SPIE*, 1992, vol. 1752, pp. 232–238. doi: 10.1117/12.130734
6. Leniewski M., Kryszczyński T. Athermalization of optical systems. *Proc. SPIE*, 1998, vol. 3320, pp. 297–306. doi: 10.1117/12.301355
7. Hilton A.R., McCord J., Whaley G. Production of infrared-transmitted chalcogenide glasses. *Proc. SPIE*, 1998, vol. 3424, pp. 47–59. doi: 10.1117/12.323763
8. Choi J.H., Jang W.J., Cha D.H., Kim J.H., Kim H.J. Chalcogenide glass with good thermal stability for the application of molded infrared lenses. *Proc. SPIE*, 2014, vol. 9253, art. 925310. doi: 10.1117/12.2068005
9. Gleason B., Siskin L., Smith C., Richardson K. Designing mid-wave infrared (MWIR) thermo-optic coefficient (dn/dT) in chalcogenide glasses. *Proc. SPIE*, 2016, vol. 9822, art. 982207. doi: 10.1117/12.2229056
10. Zapryagaeva L.A., Sveshnikova I.S. *Calculation and Design of Optical Systems*. Moscow, Logos Publ., 2000, 584 p. (in Russian)
11. Wang J., Vue C. Athermalization and thermal characteristics of multilayer diffractive optical elements. *Applied Optics*, 2015, vol. 54, no. 33, pp. 9665–9670. doi: 10.1364/AO.54.009665
12. Wood A.P., Lewell L., Manning P.A., Donohou P.P. Passively athermalised hybrid objective for a far infrared uncooled thermal imager. *Proc. SPIE*, 1996, vol. 2744, pp. 500–509. doi: 10.1117/12.243490
13. Mann A. *Infrared Optics and Zoom Lenses*. 2<sup>nd</sup> ed. Washington, SPIE, 2009, 164 p.
14. Barmicheva G.V., Gan M.A., Starkov A.A. Performance analysis of aspheric-diffractive elements in optical systems for the IR. *Proc. 9<sup>th</sup> Int. Conf. Applied Optics 2010*. St. Petersburg, 2010, pp. 227–230. (in Russian)
15. Chen C.W. *Athermalized and Achromatized Optical Systems Employing Diffractive Optical Element*. Patent US5691847A, 1994.

## Authors

**Alexey S. Garshin** – PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 56888628500, ORCID ID: 0000-0001-8916-7154, alitmo@yandex.ru

**Kirill A. Andreev** – Leading engineer, JSC GYROOPTICS, Saint Petersburg, 194044, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-9738-9144, krim\_yo@mail.ru