

---

---

# ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

---

---

УДК 681.7.01;535.317.2  
DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-3-256-262

## РАСЧЕТ ТЕРМОСТАБИЛИЗИРОВАННЫХ АХРОМАТИЧЕСКИХ ИК-ОБЪЕКТИВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКОГО МЕТОДА ВЫБОРА ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

С. Е. ИВАНОВ<sup>1</sup>, Г. Э. РОМАНОВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский филиал НПК „Системы прецизионного приборостроения“,  
199034, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: Stepan.Ivanov.82@gmail.com

<sup>2</sup>Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

Представлена методика оптимального выбора материалов для пассивной оптической термостабилизации. Предложен графоаналитический метод разработки двухкомпонентного ахроматического термостабилизированного объектива, один из компонентов которого синтезирован из двух субкомпонентов с целью создания недостающих дисперсионных и температурных характеристик материалов для устранения хроматической аберрации положения объектива и терморасфокусировки изображения.

**Ключевые слова:** атермализация, ахроматизация, графоаналитический метод

Разработка ИК-объективов связана со сложной задачей создания оптической системы, сохраняющей высокое качество изображения при различных температурных режимах. При изменении температуры объектива без учета градиента изменяются геометрия оправ линз, оказывающая влияние на воздушные промежутки, а также толщина линз, радиусы их поверхностей и показатели преломления оптических материалов. Эти изменения приводят к изменению фокусного расстояния объектива, расфокусировке изображения, а иногда и к аберрационной разбалансировке объектива.

Так как показатели преломления оптических материалов в ИК-области спектра имеют большие значения, их зависимость от температуры оказывает сильное влияние на качество изображения, что делает необходимым применение методов термокомпенсации. В этом случае наиболее целесообразным является пассивный метод оптической термостабилизации.

В настоящей статье представлена методика оптимального выбора материалов для пассивной оптической термостабилизации.

В работах [1—7] рассмотрены требования, которым должны удовлетворять оптические материалы двухкомпонентной системы без воздушного промежутка, обеспечивающие достижение ахроматической коррекции при сохранении оптической силы объектива в заданном диапазоне рабочих температур с учетом материала корпуса. Согласно этим требованиям соотношение характеристик оптических материалов двух компонентов должно быть следующим:

$$v_1(\gamma + V_1) = v_2(\gamma + V_2) \text{ или } \Theta_1 = \Theta_2 - \gamma(v_1 - v_2), \quad \Theta = vV, \quad (1)$$

где  $\nu$  — коэффициент дисперсии оптического материала,  $V$  — термооптический параметр,  $\gamma$  — коэффициент расширения материала корпуса объектива.

Для системы из двух компонентов ахроматизация и одновременная термостабилизация будут достигнуты при условии, что оптические силы  $\phi_1$  и  $\phi_2$  компонентов определяются как

$$\left. \begin{aligned} \phi_1 &= \phi_0 \frac{\nu_1}{\nu_1 - \nu_2} = -\phi_0 \frac{V_2 + \gamma}{V_1 - V_2}; \\ \phi_2 &= -\phi_0 \frac{\nu_2}{\nu_1 - \nu_2} = \phi_0 \frac{V_1 + \gamma}{V_1 - V_2}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $\phi_0$  — суммарная оптическая сила объектива.

На диаграмме  $\Theta(\nu)$  оптических материалов для ИК-области спектра 8—12 мкм (рис. 1) соотношения (1) можно представить прямой линией 3 под углом  $\alpha = -\arctg \gamma$  к оси абсцисс. Эта линия или любая другая, параллельная ей, проходит через точки, координаты которых соответствуют характеристикам оптических материалов, удовлетворяющих соотношениям (1). Линию 3 можно назвать ахроматической-атермализованной, так как исправление хроматических aberrаций автоматически сопровождается исправлением термооптических.

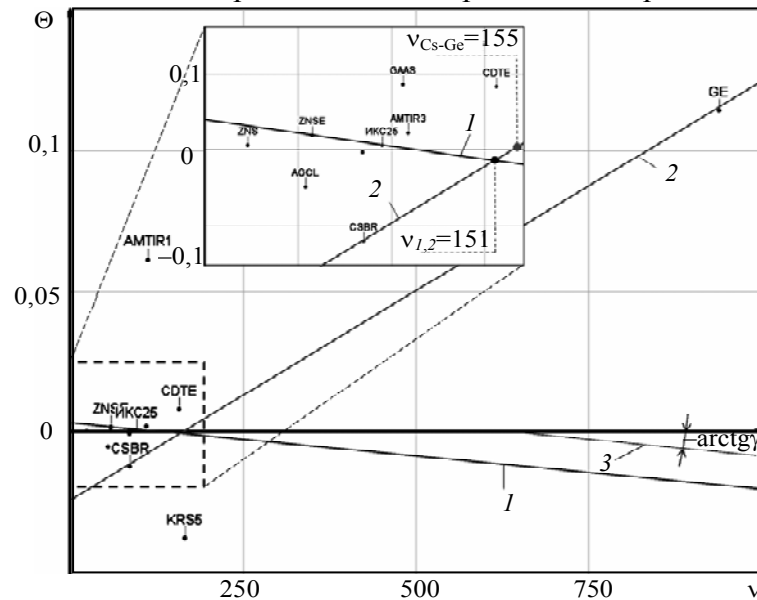


Рис. 1

Таким образом, два компонента, выполненные из указанных материалов и имеющие значения оптических сил, вычисленные по соотношениям (2), могут быть приняты в качестве начальной схемы для расчета.

Рассмотрим ИК-объектив 1 (рис. 2), созданный по данной методике на базе приемника оптического излучения UL02152 компании ULIS; характеристики приемника:

Чувствительная площадка, пкс .....	160×120
Размер пиксела, мкм .....	25×25
Рабочий спектральный диапазон ( $\Delta\lambda$ ), мкм .....	8,0—12,0

Первый компонент объектива выполнен в виде линзы из ИКС25, второй — в виде двух линз из ZnSe. Параметры ИК-объектива 1:

Угловое поле $\pm\omega$ , ...° .....	$\pm 1,43$
Фокусное расстояние, мм .....	100
Относительное отверстие (для обеспечения необходимого разрешения) .....	1:1,5
Частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) на частоте 40 лин/мм .....	Не менее 0,15

При выполнении корпуса объектива из алюминия линия  $I$ , соответствующая оптическим материалам ИКС25 и ZnSe, практически параллельна ахроматической-атермализованной линии 3 (см. рис. 1). Объектив сохраняет свои характеристики в диапазоне температур  $T=-40\dots 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; данные о качестве изображения представлены графиками ЧКХ на рис. 3.

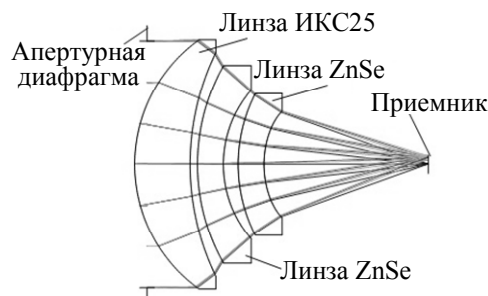


Рис. 2

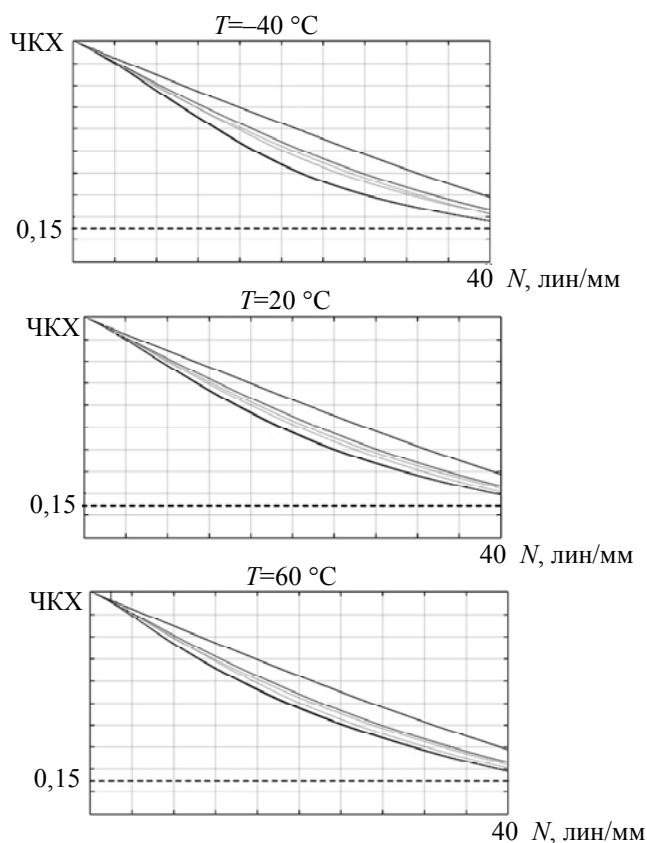


Рис. 3

На сегодняшний день производство ИКС25 остановлено, поэтому наличие данного материала в составе ИК-объектива  $I$  делает его непригодным для производства. Следовательно, для создания подобного рода ИК-объективов необходимо подбирать иные материалы. Однако материала в пару к ZnSe на линии  $I$  нет. В данном случае предлагается рассмотреть возможность создания такого материала из двух субкомпонентов.

Два любых элемента (материала) на диаграмме  $\Theta(\nu)$ , не удовлетворяющие условиям (1), составляют систему, которая не свободна от хроматизма положения и не термостабилизирована. Следовательно, такую систему можно рассматривать как единый оптический (виртуальный) компонент, для которого выполняются следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_B &= \varphi_a + \varphi_b; \\ \frac{\varphi_B}{v_B} &= \frac{\varphi_a}{v_a} + \frac{\varphi_b}{v_b}; \\ \varphi_B v_B &= \varphi_a v_a + \varphi_b v_b, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $\varphi_B, \varphi_a, \varphi_b$  — оптические силы соответственно виртуального компонента и двух субкомпонентов (аналогичные индексы приняты и для параметров  $v$  и  $V$ ).

Оптические и температурные характеристики системы зависят от оптических сил субкомпонентов:

$$v_B = \varphi_B \frac{v_a v_b}{\varphi_a v_b + \varphi_b v_a}, \quad V_B = \frac{\varphi_a V_a + \varphi_b V_b}{\varphi_B}. \quad (4)$$

Для визуализации этих характеристик на диаграмме  $\Theta(v)$  выведем зависимость  $\Theta_B(v_B)$  из соотношений (3):

$$\Theta_B = \frac{v_a \Theta_b - v_b \Theta_a + v_B (\Theta_a - \Theta_b)}{v_a - v_b}. \quad (5)$$

Эта зависимость имеет линейный вид (см. рис. 1, линия 2). Исходя из уравнений (4) можно получить оптические и температурные характеристики, соответствующие любой точке на этой линии, в зависимости от значений оптических сил субкомпонентов. Для того чтобы исследовать эту зависимость, построим проекцию значений оптических сил субкомпонентов на ось  $v$ , используя соотношения (3):

$$\left. \begin{aligned} \varphi_a(v_B) &= \varphi_B \frac{v_a(v_B - v_b)}{v_B(v_a - v_b)}, \\ \varphi_b(v_B) &= -\varphi_B \frac{v_b(v_B - v_b)}{v_B(v_a - v_b)}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Как видно из графиков на рис. 4, оптические силы  $\varphi_a, \varphi_b$  субкомпонентов имеют минимальные значения, если искомые значения оптической силы  $\varphi_B$  виртуального компонента расположены внутри отрезка  $v_a, v_b$ . В этом случае значения  $\varphi_a, \varphi_b$  будут меньше  $\varphi_B$ . Наименьшие значения оптические силы принимают в точке

$$v_{cr} = 2 \frac{v_a v_b}{v_a + v_b}, \quad \varphi_{cr} = \varphi_B / 2. \quad (7)$$

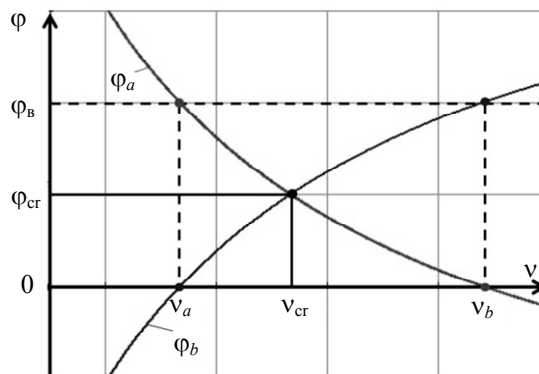


Рис. 4

Рассмотрим диаграмму  $\Theta(v)$  с целью выбора субкомпонентов для создания материала в пару к ZnSe. Линия 1 (см. рис. 1) должна пересекать линию субкомпонентов 2, согласно

рис. 4, наиболее близко к точке  $(\nu_{cr}, \varphi_{cr})$ , определенной выражениями (7). Более того, разность коэффициентов дисперсий материала ZnSe и виртуального компонента должна быть максимальной для уменьшения оптических сил  $\varphi_{ZnSe}$  и  $\varphi_B$ .

Возможны несколько вариантов решений, наиболее приемлемые из них представлены в таблице.

Оптический материал	$\varphi_a$	$\varphi_b$	$\varphi_B$	$\varphi_{ZnSe}$
KRS5-Ge-ZnSe	0,46	0,74	1,21	-0,21
CsBr-Ge-ZnSe	0,73	0,81	1,54	-0,54
KRS5-CdTe-ZnSe	0,31	1,26	1,57	-0,57
KRS5-Amtir1-ZnSe	1,17	0,48	1,66	-0,66
CsBr-CdTe-ZnSe	0,47	1,34	1,81	-0,81
KRS5-GaAs-ZnSe	0,48	1,49	1,98	-0,98
CsBr-GaAs-ZnSe	0,76	1,64	2,40	-1,40
CsBr-Amtir1-ZnSe	2,16	0,62	2,78	-1,78

Примечание. С целью сравнения значения оптических сил приведены к значению оптической силы объектива  $\varphi_0 = 1$ .

Как следует из таблицы, наилучшим решением является комбинация материалов KRS5-Ge-ZnSe, однако KRS5 очень ядовит и практически исключен из производства. Таким образом, наилучшее решение — комбинация CsBr-Ge-ZnSe.

Лучшая точка пересечения, определяемая выражениями (7),  $\nu_{CsBr-Ge} = 155$ . Ахроматическая-атермализованная линия 1 пересекает линию 2 в точке  $\nu_{1,2} = 151$  (см. рис. 1). При этом разность коэффициентов дисперсий виртуального компонента и материала ZnSe составляет  $\Delta\nu = 93,7$ .

Используя прием, описанный в работе [9], заменим линзу из ИКС25 на две линзы из CsBr и Ge, оптические силы которых рассчитаны по выражениям (6), где  $\varphi_B = \varphi_{ИКС25} = 0,023$ ,  $\nu_B = \nu_{1,2} = 151$ :  $\varphi_{CsBr} = 0,012$ ,  $\varphi_{Ge} = 0,011$ .

Так как для абберационной коррекции достаточно трех линз, то для сохранения количества элементов уберем одну из линз из материала ZnSe, а второй линзе придадим значение оптической силы, равное первоначальному значению оптической силы дуплета линз из ZnSe:  $\varphi_{ZnSe} = -0,031$ .

Оптимизация полученной системы проводилась с помощью пакета прикладных программ ZEMAX; критерий оптимизации — частотно-контрастная характеристика; параметры оптимизации — радиусы и толщины линз и осевые промежутки.

В результате абберационной коррекции был создан ИК-объектив 2 (рис. 5), характеристики которого аналогичны характеристикам ИК-объектива 1 (рис. 6).

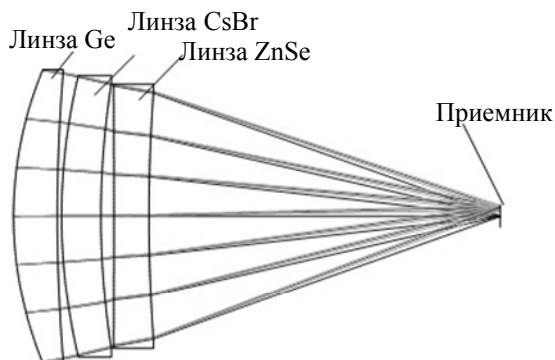


Рис. 5

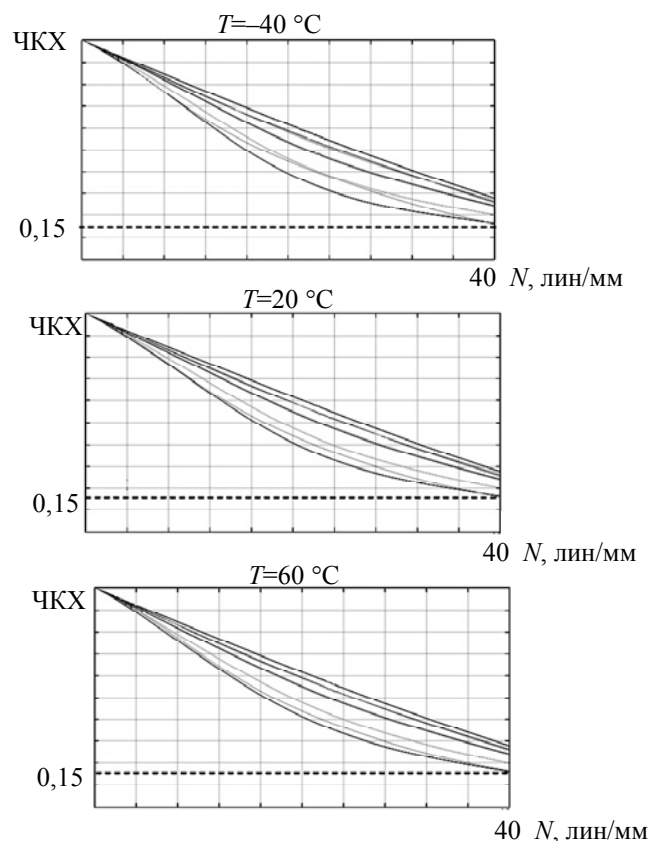


Рис. 6

Таким образом, полученные результаты, несмотря на то что оптические компоненты не являются тонкими, демонстрируют эффективность предложенной методики синтеза двухлинзовых компонентов с целью создания материалов для устранения хроматической aberrации положения и терморасфокусировки в разрабатываемых объективах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jamison T. H. Athermalization of optical instruments from the optomechanical viewpoint // Optical Design. 1992. Vol. CR43. P. 131—159.
2. Jamison T. H. Thermal effect in optical system // Optical Engineering. 1981. Vol. 20, N 2. P. 156—160.
3. Rayces J., Lebach L. Thermal compensation of infrared achromatic objectives with three optical materials // Proc. of SPIE. 1990. Vol. 1354.
4. Schwartz K., Dillon D., Sparrold S. W. Advantages of using engineered chalcogenide glass for color corrected, passively athermalized LWIR imaging systems // Proc. of SPIE. 2015. Vol. 835326.
5. Schwartz K., Dillon D., Sparrold S. W. Graphically selecting optical components and housing material for color correction and passive athermalization // Proc. of SPIE. 2012. Vol. 8486.
6. Tamagawa Y. Multilens system design with an athermal chart // Applied Optics. 1994. Vol. 33. P. 8009—8013.
7. Волосов Д. С. Фотографическая оптика. М.: Искусство, 1978.
8. Слюсарев Г. Г. Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969. Т. 2.
9. Kim Y.-J., Kim Y.-S., Park S.-C. Simple graphical selection of optical materials for an athermal and achromatic design using equivalent abbe number and thermal glass constant // Journal of the Optical Society of Korea. 2015. Vol. 19-2. P. 182—187.

## Сведения об авторах

**Степан Евгеньевич Иванов**

— НПК „Системы прецизионного приборостроения“, Санкт-Петербургский филиал; ведущий инженер; E-mail: Stepan.Ivanov.82@gmail.com

**Галина Эдуардовна Романова** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: romanova\_g\_e@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
прикладной и компьютерной оптики  
Ун-та ИТМО

Поступила в редакцию  
04.10.16 г.

**Ссылка для цитирования:** Иванов С. Е., Романова Г. Э. Расчет термостабилизированных ахроматических ИК-объективов с использованием графоаналитического метода выбора оптических материалов // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 3. С. 256—262.

#### CALCULATION OF HEAT-STABILIZED ACHROMATIC IR-LENSES USING A GRAPHIC METHOD FOR CHOICE OF OPTICAL MATERIALS

S. E. Ivanov<sup>1</sup>, G. E. Romanova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*St. Petersburg Branch of Research and Production Corporation  
“Systems of Precision Instrument Making”, 199034, St. Petersburg, Russia  
E-mail: Stepan.Ivanov.82@gmail.com*

<sup>2</sup>*ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia*

A method of optimal choice of materials for passive optical thermostabilizing is presented. A graphic method is proposed for design of two-component achromatic thermostabilized lens with one of the components being synthesized from two sub-components to create the missing dispersion and the temperature characteristics of the materials to correct chromatic aberration of the lens position and thermos-responsive image defocusing.

**Keywords:** athermalization, achromatization, graphic method

#### **Data on authors**

- Stepan E. Ivanov** — Research and Production Corporation “Systems of Precision Instrument Making”, St. Petersburg Branch; Leading Engineer;  
E-mail: Stepan.Ivanov.82@gmail.com
- Galina E. Romanova** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Applied and Computer Optics; E-mail: romanova\_g\_e@mail.ru

**For citation:** Ivanov S. E., Romanova G. E. Calculation of heat-stabilized achromatic IR-lenses using a graphic method for choice of optical materials // Journal of Instrument Engineering. 2017. Vol. 60, N 3. P. 256—262 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-3-256-262