

## АФОКАЛЬНЫЕ КОМПЕНСАТОРЫ АБЕРРАЦИЙ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Л. Н. АНДРЕЕВ, В. В. ЕЖОВА

Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: evv\_foist@mail.ru

Представлены оптические схемы новых афокальных компенсаторов aberrаций, в том числе сферической, кривизны поверхности, астигматизма и хроматических aberrаций. Предложена методика расчета таких компенсаторов в области Зейделя.

**Ключевые слова:** компенсатор, aberrации, сферическая aberrация, кривизна поверхности, хроматизм

При расчете оптических систем в ряде случаев для коррекции aberrаций применяются афокальные компенсаторы [1—3]. Преимущество афокальных компенсаторов, расположенных перед оптической системой в параллельных пучках лучей, заключается в том, что они не влияют на оптическую силу системы (фокусное расстояние) и не сокращают задний фокальный отрезок.

Особый интерес представляют афокальные компенсаторы, корректирующие только одну aberrацию и не влияющие на коррекцию других aberrаций.

Рассмотрим афокальные компенсаторы сферической aberrации.

На рис. 1 представлены оптические схемы трехлинзового афокального симметричного несклеенного компенсатора, все линзы которого выполнены из одного материала [4—7].

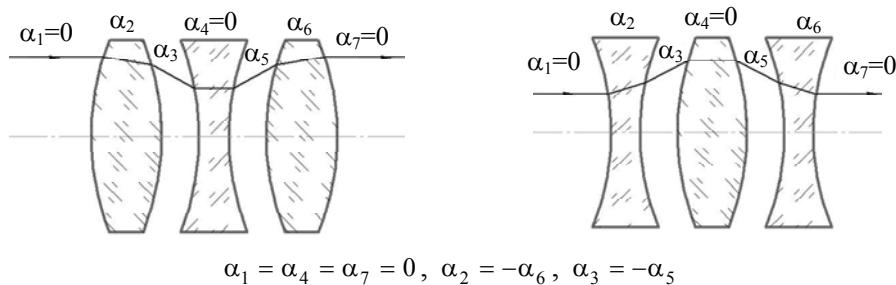


Рис. 1

Как известно, сферическая aberrация третьего порядка определяется величиной [1, 2]

$$P = \sum_1^k \Delta\alpha_\mu \frac{\Delta\alpha}{\Delta\mu},$$

где  $\alpha$  — углы пересечения параксиального луча с оптической осью;  $\mu = 1/n$ , где  $n$  — показатель преломления.

Из условия симметрии следует, что  $\alpha_2 = -\alpha_6$ ,  $\alpha_3 = -\alpha_5$ , а  $\alpha_1 = \alpha_4 = \alpha_7 = 0$ .

Раскрывая выражения для  $P$ , получаем

$$P = \frac{2n^2}{(n-1)^2} \left[ \frac{\alpha_2^3}{n} - \alpha_3^3 + (\alpha_3 - \alpha_2)^2 \left( \alpha_3 - \frac{\alpha_2}{n} \right) \right],$$

при этом величины  $W = \sum_1^k \Delta\alpha_\mu \frac{\Delta\alpha}{\Delta n} = 0$  и  $C = \sum_1^k \Delta \frac{dn}{n} \frac{\Delta\alpha}{\Delta\mu} = 0$  определяют кому и хроматизм

положения.

Если принять условие  $\alpha_2 = \alpha_3 = -\alpha_5 = -\alpha_6$ , то

$$P = -\frac{2n}{n-1} \alpha_{2,3}^3.$$

На рис. 2 приведены оптические схемы трехлинзового склеенного афокального компенсатора, выполненного из оптических материалов, у которых  $n_{1,3} \neq n_2$ , а  $v_{1,2} \approx v_2$ , где  $v$  — коэффициент средней дисперсии [6, 7].

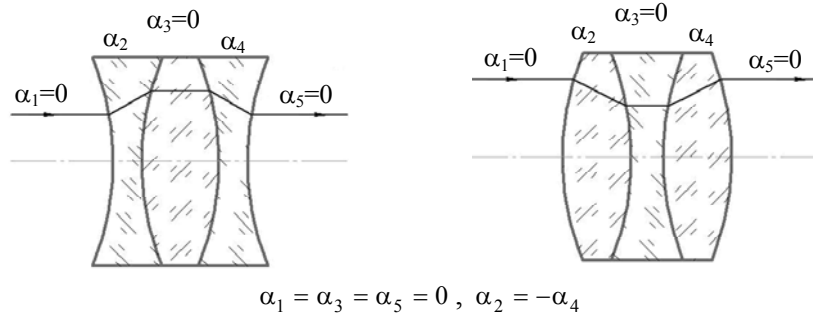


Рис. 2

В случае симметрии компенсатора  $\alpha_2 = -\alpha_4$ ,  $\alpha_1 = \alpha_3 = \alpha_5 = 0$ . При этих условиях такой компенсатор влияет только на сферическую aberrацию и не вносит хроматизма и других aberrаций. Основным параметром  $P$  для такого компенсатора определяется как

$$P = 2n_1 \left[ \frac{1}{(1-n_1)^2} - \frac{n_2^2}{(n_1-n_2)^2} \right] \alpha_2^3,$$

при этом  $W = 0$  и  $C = 0$ .

Далее, используя известную рекуррентную формулу  $\alpha'n' - \alpha n = h \frac{n' - n}{r}$ , можно определить радиусы поверхностей. Толщины линз определяются исходя из конструктивных соображений.

Для коррекции хроматических aberrаций можно использовать гиперхроматическую линзу [8], которая представляет собой склеенную плоскопараллельную пластинку из оптических материалов, у которых  $n_1 = n_2$ , а средние дисперсии  $dn_1 \neq dn_2$  (рис. 3).



Рис. 3

Хроматизм положения, вносимый такой пластинкой, расположенной в параллельных пучках перед объективом в его фокальной плоскости, определяется как

$$ds' = f'^2 \frac{dn_1 - dn_2}{r_{xp}},$$

где  $f'$  — фокусное расстояние объектива,  $r_{xp}$  — радиус хроматической поверхности.

Для коррекции кривизны поверхности изображения, определяемой в области Зейделя суммой  $S_4 = \sum_1^k \frac{1}{r}$ , может быть использована телескопическая линза, расположенная перед апертурной диафрагмой (АД) (рис. 4), или афокальный компенсатор, включающий две телескопические линзы, симметрично расположенные относительно апертурной диафрагмы, установленной между ними (рис. 5) [9].

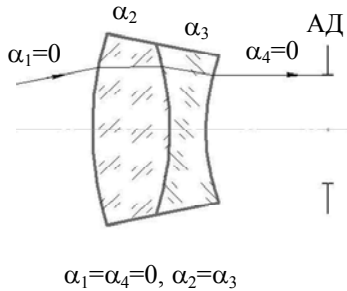


Рис. 4

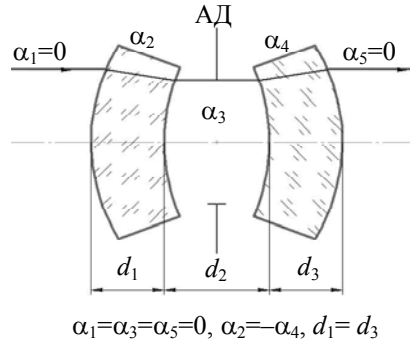


Рис. 5

В первом случае связь конструктивных элементов телескопических линз определяется выражением

$$r_1 - r_2 = d \frac{n-1}{n}.$$

Тогда

$$S_4 = \frac{n-1}{n} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Варьируя величины  $r_1$  и  $r_2$ , можно обеспечить необходимое значение  $S_4$ . Следует отметить, что увеличение телескопической линзы  $\Gamma_T = r_1/r_2$ .

Для афокального компенсатора  $S_4$  определяется по формуле

$$S_4 = 2 \frac{n-1}{n} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

У такого афокального компенсатора в силу симметрии отсутствуют кома, дисторсия и хроматизм увеличения. Для коррекции сферической aberrации выпуклая поверхность выполнена асферической второго порядка, ее уравнение:  $y^2 = 2r_0z + (1 - e^2)$ . Для ахроматизации компенсатора следует ввести хроматические поверхности.

Рассмотренные афокальные компенсаторы, корректирующие только одну aberrацию и не влияющие на коррекцию других aberrаций, можно использовать при расчете светосильных объективов с различными оптическими характеристиками оптических схем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слюсарев Г. Г. Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989.
2. Русинов М. М. Композиция оптических систем. М.: Кн. дом „ЛИБРОКОМ“, 2011.
3. Панов В. А., Андреев Л. Н. Оптика микроскопов. Л.: Машиностроение, 1976.
4. Андреев Л. Н., Дегтярева Г. С., Ежова В. В. Симметричные компенсаторы сферической aberrации // Оптич. журн. 2015. Т. 82, вып. 1. С. 28—31.
5. Андреев Л. Н., Дегтярева Г. С. Афокальный компенсатор aberrаций // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 8. С. 621—624.

6. Пат. 133947 РФ, G02B 9/12. Афокальный компенсатор сферической aberrации / Л. Н. Андреев, В. В. Ежова, Г. С. Дегтярева. 2013.
7. Пат. 147777 РФ, G02B 9/12. Афокальный компенсатор сферической aberrации / Л. Н. Андреев, Г. С. Дегтярева. 2014.
8. Андреев Л. Н., Ежова В. В. Прикладная теория aberrаций. СПб: НИУ ИТМО, 2011. Ч. 2. 52 с.
9. Пат. 148389 РФ, G02B 9/00. Афокальный компенсатор кривизны поверхности изображения / Л. Н. Андреев, Г. С. Дегтярева. 2014.

**Сведения об авторах****Лев Николаевич Андреев**

— д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, кафедра прикладной и компьютерной оптики

**Василиса Викторовна Ежова**

— канд. техн. наук; Университет ИТМО, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: evv\_foist@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
прикладной и компьютерной оптикиПоступила в редакцию  
21.03.17 г.**Ссылка для цитирования:** Андреев Л. Н., Ежова В. В. Афокальные компенсаторы aberrаций оптических систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 7. С. 660—663.**AFOCAL COMPENSATORS OF OPTICAL SYSTEMS ABERRATIONS****L. N. Andreev, V. V. Ezhova***ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia  
E-mail: evv\_foist@mail.ru*

Schematics of new afocal compensators of optical system aberrations, including spherical and chromatic aberrations, astigmatism, and field curvature are presented. A method for calculating the compensators schematics in Seidel region is described.

**Keywords:** compensator, aberration, spherical aberration, surface curvature, chromatic aberration**Data on authors****Lev N. Andreev**

— Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Applied and Computer Optics

**Vasilisa V. Ezhova**— PhD; ITMO University, Department of Applied and Computer Optics;  
E-mail: evv\_foist@mail.ru**For citation:** Andreev L. N., Ezhova V. V. Afocal compensators of optical systems aberrations. *Journal of Instrument Engineering*. 2017. Vol. 60, N 7. P. 660—663 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-7-660-663