

МОДУЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВОГО ОБЪЕКТИВА

© 2012 г. С. В. Куцевич; Л. Н. Андреев, доктор техн. наук

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: kutzevichsveta@gmail.com

Рассмотрена методика расчета светосильного зеркально-линзового объектива, включающего три оптических модуля. Приведены оптические схемы и результаты абберационного расчета.

Ключевые слова: объектив, абберации, компенсатор.

Коды OCIS: 180.0180, 110.0180.

Поступила в редакцию 05.12.2011.

Введение

Сущность модульного принципа проектирования заключается в том, что объектив синтезируется из оптических модулей (компонентов) с известными абберационными свойствами. При расчете светосильного зеркально-линзового объектива принята оптическая схема, включающая три модуля: двухзеркального концентрического объектива, компенсатора кривизны поверхности изображения и компенсатора хроматических aberrаций. Зеркальные и зеркально-линзовые объективы по сравнению с линзовыми имеют увеличен-

ный задний фокальный отрезок и широкую область ахроматизации. К недостаткам таких систем можно отнести значительные технологические трудности изготовления отражающих поверхностей и наличие центрального экранирования [1–5].

Методика расчета

При расчете зеркально-линзового объектива с $f' = 100$ мм, $D/f' \approx 1:2-1:2,5$, $2\omega_1 = 6^\circ-10^\circ$ в качестве базовой схемы принимается двухзеркальная концентрическая система (рис. 1а). У такой системы в случае расположения вход-

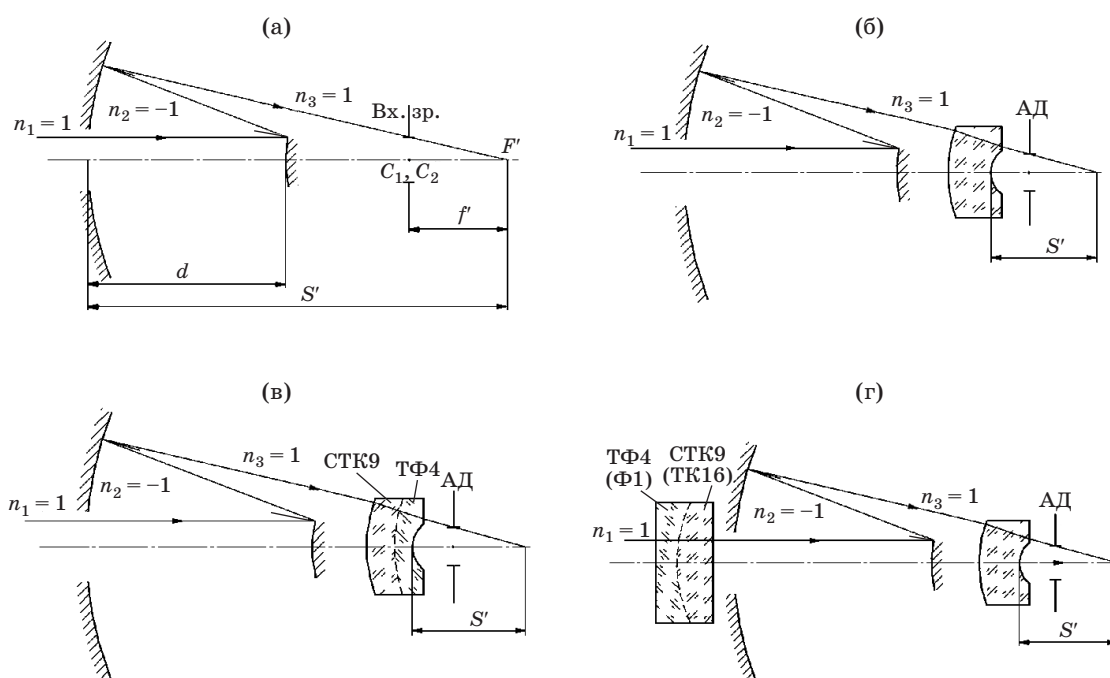


Рис. 1. а – двухзеркальный концентрический объектив, б – планмонохромат, в, г – планахромат.

Таблица 1. Аберрации двухзеркальной концентрической системы. Точка на оси. Рис. 1а.

h , мм	$\text{tg}\sigma'$	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %	$S'_{F'} - S'_{C'}$, мм	$\bar{S}_4 = 1$
25	0,258	0,009	0,002	0	0	
$25\sqrt{3/4}$	0,221	0,005	0,001	0	0	
$25\sqrt{1/2}$	0,179	0,002	0,000	0	0	
$25\sqrt{1/4}$	0,125	0,000	0,000	0	0	
0	0	0	0	0	0	

ного зрачка в центре кривизны, а плоскости предмета на бесконечности, исправлены все аберрации, кроме кривизны поверхности изображения.

Конструктивные элементы системы определяются соотношениями [7, 8]

$$\begin{aligned} r_1 &= 2(1-k)f', & r_2 &= 2f'(1-k)/k, \\ d &= r_1 - r_2 = -2f'(1-k)^2/k, \\ S' &= (2-k)f'/k, & k &= r_1/r_2, \\ \vartheta_{\emptyset} &= 1/(3-2k), \end{aligned} \quad (1)$$

где f' – фокусное расстояние объектива, S' – задний фокальный отрезок (рабочее расстояние), r_1 и r_2 – радиусы отражающих поверхностей; d – расстояние между зеркалами, ϑ_{\emptyset} – центральное экранирование по диаметру.

С целью коррекции сферической аберрации 3-го порядка величина $k \approx 0,382$ [8]. В табл. 1 и 2 приведены аберрации двухзеркальной концентрической системы, из которых следует,

что все аберрации, кроме кривизны поверхности, исправлены. Величина \bar{S}_4 для концентрических систем равна единице [8].

Для коррекции кривизны поверхности в оптическую схему вводим компенсатор кривизны в виде апланатического мениска с увеличением 1^\times , у которого обе поверхности апланатические третьего рода. Такой мениск не вносит монохроматические аберрации и может иметь величину \bar{S}_4 противоположного знака, чем у зеркальной части. Конструктивные элементы мениска определяются соотношениями [6]

$$\begin{aligned} r_1 &= S_1/(1+n), \\ r_2 &= (n/(n+1))(S_1/n-d), \\ d &= S_1/n + 1/n[(S_{4M}n/(n^2-1)) - 1/S_1], \end{aligned} \quad (2)$$

где r_1 и r_2 – радиусы кривизны поверхностей, d – толщина мениска, n – показатель преломления, S_{4M} – сумма Зейделя мениска, которая определяет кривизну поверхности.

Для исправления кривизны необходимо выполнить условие:

$$S_{4M} = -1/f'_{\text{об}}.$$

На рис. 1б приведена оптическая схема объектива с исправленной кривизной поверхности, в табл. 3 и 4 – его аберрации. Из анализа таблиц следует, что все монохроматические аберрации исправлены удовлетворительно, за исключением хроматических аберраций, которые вносит апланатический мениск.

Для коррекции хроматических аберраций возможно введение “хроматической” поверхности в апланатическом мениске (рис. 1в)

Таблица 2. Аберрации двухзеркальной концентрической системы. Точка вне оси. Рис. 1а.

ω_1 , °	y' , мм	s_p , мм	s'_p , мм	z'_C , мм	z'_M , мм	$z'_M - z'_C$, мм	$\Delta y'/y'$, %	$y'_{F'} - y'_{C'}$, мм
-5°	8,75	123,6	-100	-0,380	-0,380	0	0	0
-3°32'	6,19	123,6	-100	-0,190	-0,190	0	0	0
0	0	123,6	-100	0	0	0	0	0

Таблица 3. Аберрации объектива с исправленной кривизной изображения. Точка на оси. Рис. 1б.

h , мм	$\text{tg}\sigma'$	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %	$S'_{F'} - S'_{C'}$, мм	$\bar{S}_4 = 0$
25	0,258	0,009	0,002	-0,02	-1,94	
$25\sqrt{3/4}$	0,222	0,005	0,001	-0,01	-1,92	
$25\sqrt{1/2}$	0,180	0,002	0,000	-0,01	-1,90	
$25\sqrt{1/4}$	0,126	0,001	0,000	-0,00	-1,88	
0	0	0	0	0	-1,86	

Таблица 4. Аберрации объектива с исправленной кривизной изображения. Точка вне оси. Рис. 1б

$\omega_1, ^\circ$	$y', \text{ мм}$	$s_p, \text{ мм}$	$s'_p, \text{ мм}$	$z'_C, \text{ мм}$	$z'_M, \text{ мм}$	$z'_M - z'_C, \text{ мм}$	$\Delta y'/y', \%$	$y'_{F'} - y'_{C'}, \text{ мм}$
-5°	8,75	151,9	-53,67	-0,001	0,002	0,003	0,390	0,157
$-3^\circ 32'$	6,19	151,9	-53,67	0,000	0,001	0,001	0,195	0,110
0	0	151,9	-53,67	0	0	0	0	0

Таблица 5. Аберрации объектива, хроматизм которого исправлен введением хроматической поверхности. Точка на оси. Рис. 1в

$h, \text{ мм}$	$\text{tg}\sigma'$	$\Delta s', \text{ мм}$	$\Delta y', \text{ мм}$	$\eta, \%$	$S'_{F'} - S'_{C'}, \text{ мм}$
25	0,257	0,005	0,001	-0,02	0,05
$25\sqrt{3/4}$	0,220	0,000	0,000	-0,01	0,02
$25\sqrt{1/2}$	0,178	-0,003	-0,001	-0,01	0
$25\sqrt{1/4}$	0,125	-0,006	-0,001	-0,00	-0,02
0	0	-0,007	0	0	-0,04

$\bar{S}_4 = 0$

Таблица 6. Аберрации объектива, хроматизм которого исправлен введением хроматической поверхности. Точка вне оси. Рис. 1в

$\omega_1, ^\circ$	$\Delta y', \text{ мм}$	$s_p, \text{ мм}$	$s'_p, \text{ мм}$	$z'_C, \text{ мм}$	$z'_M, \text{ мм}$	$z'_M - z'_C, \text{ мм}$	$\Delta y'/y', \%$	$y'_{F'} - y'_{C'}, \text{ мм}$
-5°	8,82	151,8	-53,67	-0,007	-0,004	0,003	0,389	0,067
$-3^\circ 32'$	6,22	151,8	-53,67	-0,007	-0,006	0,001	0,195	0,047
0	0	151,8	-53,67	-0,007	-0,007	0	0	0

Таблица 7. Аберрации объектива, хроматизм которого исправлен путем введения “гиперхроматической линзы”. Точка вне оси. Рис. 1г

$h, \text{ мм}$	$\text{tg}\sigma'$	$\Delta s', \text{ мм}$	$\Delta y', \text{ мм}$	$\eta, \%$	$S'_{F'} - S'_{C'}, \text{ мм}$
25	0,258	0,004	0,001	-0,03	0,01
$25\sqrt{3/4}$	0,222	-0,001	-0,000	-0,02	0,00
$25\sqrt{1/2}$	0,180	-0,003	-0,001	-0,01	0,00
$25\sqrt{1/4}$	0,126	-0,006	-0,001	-0,01	0,00
0	0	-0,007	0	0	-0,01

$\bar{S}_4 = 0$

Таблица 8. Аберрации объектива, хроматизм которого исправлен путем введения “гиперхроматической линзы”. Точка на оси. Рис. 1г

$\omega_1, ^\circ$	$y', \text{ мм}$	$s_p, \text{ мм}$	$s'_p, \text{ мм}$	$z'_C, \text{ мм}$	$z'_M, \text{ мм}$	$z'_M - z'_C, \text{ мм}$	$\Delta y'/y', \%$	$y'_{F'} - y'_{C'}, \text{ мм}$
-5°	8,76	385,6	-54,31	-0,003	0,009	0,012	0,374	-0,560
$-3^\circ 32'$	6,18	385,6	-54,31	-0,005	-0,001	0,004	0,188	-0,361
0	0	385,6	-54,31	-0,007	-0,007	0	0	0

или введение в оптическую схему объектива “гиперхроматической” линзы, расположенной в параллельном ходе лучей перед объективом (рис. 1г). Путем интерполяции величины радиуса “хроматической” поверхности добиваемся необходимой коррекции хроматической аберрации, которая определяется по формуле

$$dS' = f'^2 (dn_1 - dn_2) / r_{xp},$$

где dn_1 и dn_2 – средняя дисперсия стекол.

В качестве “хроматической” пары стекол наибольшее распространение получили: ТК16–Ф1 или СТК9–ТФ4. В табл. 5, 6 и 7, 8 приведены аберрации объектива для первого и второго случая соответственно.

Заклучение

В рассчитанном зеркально-линзовом объективе достигнута высокая коррекция монохроматических aberrаций: сферической aberrации, комы, астигматизма, дисторсии и кривизны поверхности изображения. С целью лучшей коррекции сферохроматической aberrации следует дополнительно ввести “хроматические” поверхности либо в компенсатор кривизны поверхности (рис. 1в), либо в компенсатор хроматической aberrации (гиперхроматическую линзу) (рис. 1г).

Для коррекции вторичного спектра в указанных элементах следует использовать “хроматическо-апохроматические” пары стекол, у которых показатели преломления, а также относительные частные дисперсии близки, а

коэффициенты средней дисперсии различны, например ОФ1-ОК1; ЛК1-ОК4 и др.

На рис. 2 приведена оптическая схема объектива с использованием “хроматическо-апохроматической” пары стекол ТК14-ОФ3 и его частотно-контрастная характеристика, а в табл. 9 и 10 – его aberrации.

В табл. 1, 3, 5, 7, 9 приведены aberrации точки на оси, в табл. 2, 4, 6, 8, 10 – aberrации вне оси. В табл. 1–10 использованы обозначения: h – координата на входном зрачке; σ' – угол апертурного луча с оптической осью; $\Delta s'$ и $\Delta y'$ – продольная и поперечная сферические aberrации соответственно; η – отступление от изопланазии; $S'_{F'}-S'_{C'}$ – хроматизм положения абсолютный; $2\omega_1$ – угловое поле в пространстве предметов; y' – величина изображения; s_p и s'_p – положение входного и вы-

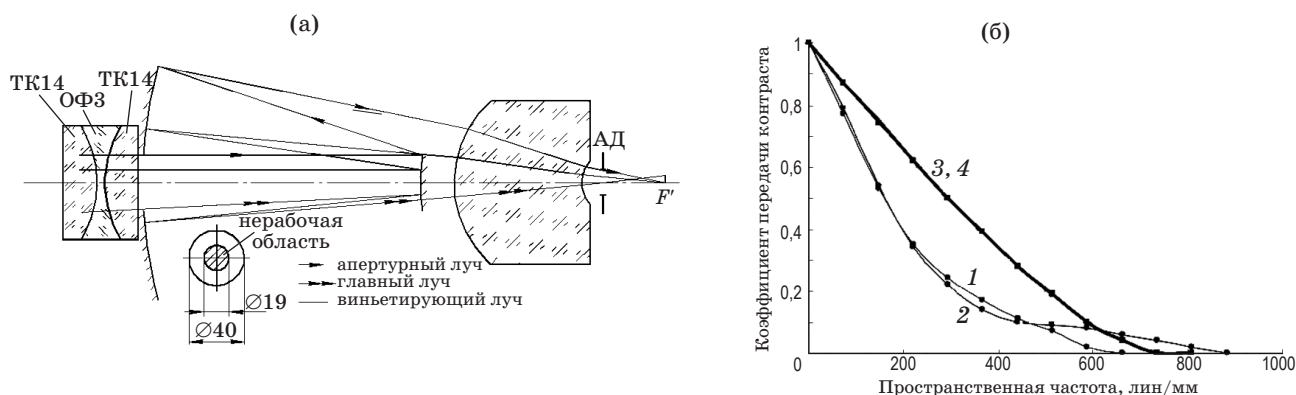


Рис. 2. Ход лучей в объективе (а) и его частотно-контрастные характеристики (б) для точки на оси при 0,546 мкм (1), 0,480 мкм (2), 0,644 мкм (3), безабберационная зависимость (4).

Таблица 9. Aberrации объектива, в котором использована “хроматическо-апохроматическая” пара стекол. Точка на оси. Рис. 2а

h , мм	$\text{tg}\sigma'$	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %	$S'_{F'}-S'_{C'}$, мм	W , дл. волн		
						λ_e	$\lambda_{F'}$	$\lambda_{C'}$
20	0,205	0,004	0,001	-0,02	-0,002	-0,01	0,38	0,38
$20\sqrt{3}/4$	0,176	0,001	0	-0,01	-0,001	-0,03	0,27	0,26
$20\sqrt{1/2}$	0,143	0	0	-0,01	0	-0,04	0,18	0,15
$20\sqrt{1/4}$	0,101	-0,002	0	-0,01	0,001	-0,02	0,09	0,07
0	0	-0,003	0	0	0,002	0	0	0

Таблица 10. Aberrации объектива, в котором использована “хроматическо-апохроматическая” пара стекол. Точка вне оси. Рис. 2а

ω_1 , °	y' , мм	s_p , мм	s'_p , мм	$z'_{C'}$, мм	$z'_{M'}$, мм	$z'_{M'}-z'_{C'}$, мм	$\Delta y'/y'$, %	$y'_{F'}-y'_{C'}$, мм	$\bar{S}_4=0$
-3°	5,24	416,8	-44,64	-0,001	0,005	0,006	0,22	-0,15	
-2°07'	3,69	416,8	-44,64	-0,002	0,001	0,003	0,11	-0,10	
0	0	416,8	-44,64	-0,001	-0,003	0	0	0	

ходного зрачка соответственно; z'_c и z'_m – положение фокусов бесконечно тонких пучков лучей в сагиттальной и меридиональной плоскостях от плоскости Гаусса соответствен-

но; $\Delta y'/y'$ – дисторсия; $y'_{F'}-y'_{C'}$ – хроматизм увеличения абсолютный; \bar{S}_4 – 4-я сумма Зейделя, определяющая кривизну поверхности.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Слюсарев Г.Г.* Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989. 379 с.
2. *Чуриловский В.Н.* Теория оптических приборов. М.–Л.: Машиностроение, 1966. 565 с.
3. *Русинов М.М.* Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989. 255 с.
4. *Панов В.А., Андреев Л.Н.* Оптика микроскопа. Л.: Машиностроение, 1976. 432 с.
5. *Турыгин И.А.* Прикладная оптика. Кн.1 и 2. М.: Машиностроение, 1965–1966. Кн. 1. 357 с., кн. 2. 428 с.
6. *Андреев Л.Н.* Прикладная теория аберраций. СПб.: ИТМО, 2002. 218 с.
7. *Андреев Л.Н., Голодкова Н.О.* Зеркально-линзовый светосильный объектив с плоским полем // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50. № 3. С. 59–61.
8. *Андреев Л.Н., Комарова Ю.А.* Коррекция сферической аберрации в двухзеркальной концентрической оптической системе // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51. № 1. С. 71–74.