

ОРТОСКОПИЧЕСКИЕ АНАСТИГМАТИЧЕСКИЕ ОКУЛЯРЫ СВЕТОВЫХ МИКРОСКОПОВ

© 2011 г. Л. Н. Андреев, доктор техн. наук; В. В. Ежова

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: foist@mail.ru

Рассматривается методика расчета широкоугольных, ортоскопических, анастигматических окуляров микроскопа с асферической поверхностью второго порядка. Приводится необходимый математический аппарат для расчета на основе теории aberrаций третьего порядка. Для иллюстрации приводятся принципиальная оптическая схема окуляров и таблицы остаточных aberrаций рассчитанных систем.

Ключевые слова: окуляр, асферика, aberrации, астигматизм, дисторсия.

Коды OCIS: 180.0180, 200.0200; 220.1250

Поступила в редакцию 27.04.2010

Асферические поверхности, несмотря на определенные трудности их изготовления, по сравнению со сферическими поверхностями, находят применение при проектировании оптических систем, в том числе и элементной оптической базы микроскопов: коллекторов, конденсоров, окуляров [1, 2]. Это объясняется тем, что их использование позволяет: улучшить качество изображения (коррекция aberrаций), повысить оптические характеристики (числовую апертуру или угловое поле), упростить оптическую схему путем сокращения числа линз (компонентов).

Основы теории aberrаций третьего порядка оптических систем, содержащие асферические поверхности второго порядка, рассмотрены в [3, 4].

Уравнение асферической поверхности второго порядка имеет вид:

$$y^2 = 2r_0z - (1 - e^2)z^2, \quad (1)$$

где r_0 – радиус в вершине поверхности, e – эксцентриситет поверхности.

При $e^2 = 0$ поверхность сферическая, при $0 < e^2 < 1$ – эллиптическая, при $e^2 = 1$ – параболическая и при $e^2 > 1$ – гиперболическая.

Связь между суммами Зейделя ($S_1, S_2 \dots S_5$), определяющими монохроматические aberrации третьего порядка, и основными параметрами тонких компонентов имеет вид [3]:

$$S_1 = P + \Delta P = P_A;$$

$$S_2 = H(P + \Delta P) + W = HP_A + W;$$

$$\begin{aligned} S_3 &= H^2(P + \Delta P) + 2HW + 1 = \\ &= H^2P_A + 2HW + 1; \end{aligned} \quad (2)$$

$$S_4 = \pi \approx \frac{1}{n} \approx 0,65;$$

$$\begin{aligned} S_5 &= H^3(P + \Delta P) + 3H^2W + 3,7H = \\ &= H^3P_A + 3H^2W + 3,7H, \end{aligned}$$

где P и W – основные параметры компонента со сферическими поверхностями; P_A – основной параметр компонента с асферической поверхностью; H – величина высоты пересечения второго параксиального луча с компонентом

$$\Delta P = \frac{(\alpha'n' - \alpha n)^3}{(n' - n)^2} b,$$

где $b = -e^2$.

При расчете оптических систем с асферическими поверхностями второго порядка следует учитывать их свойства [5]:

1. величина, определяющая кому (W), при деформации сферической поверхности не изменяется;

2. между величиной, определяющей сферическую aberrацию P_A , и e^2 существует линейная зависимость.

Сущность предлагаемой методики расчета заключается в следующем. Вначале определяют числовые значения основных параметров W и P из (2) в зависимости от того, какие aberrации подлежат коррекции.

При расчете окуляров микроскопа исправлению подлежат, прежде всего, полевые aberrации: астигматизм, дисторсия, хроматизм увеличения. Aberrации для точки на оси у окуляров микроскопа малы из-за небольшого относительного отверстия.

Из совместного решения уравнений для S_3 и S_5 (2), определяющих астигматизм и дисторсию, при $\alpha_1 = 0$, $\alpha'_1 = 1$, $h_1 = f'_1 = 1$, $\beta_1 = 1$, $H = -1$ находим:

$$\begin{aligned} S_3 &= P - 2W + 1 = 0, \\ S_5 &= -P + 3W - 3,7 = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

$W = 2,7$ и $P = 4,4$.

В табл. 1 приведены величины основных параметров W и P плоско-выпуклой линзы для различных значений показателя преломления n и квадрата эксцентриситета e^2 [5]. Из этой таблицы следует, что удовлетворить условиям (3) возможно, если в качестве исходной системы принять плоско-выпуклую линзу из оптического материала с $n = 1,6 \div 1,7$ и $e^2 = 1 \div 1,5$.

Хроматические aberrации корректируются за счет выполнения плоско-вогнутой и двояковогнутой линз из "хроматической" пары стекол, например СТК9–ТФ4 или ТК14–Ф1.

Из условия ахроматизации системы для такого компонента радиус склейки "хроматической" поверхности определяется как

$$r_{xp} = -\left(n_{1,2} - 1\right) \frac{(v_1 - v_2)}{v_2} f'_0, \quad (4)$$

где v_1 и v_2 – коэффициенты средней дисперсии; $n_{1,2}$ – показатель преломления для средней

Таблица 1. Основные параметры плоско-выпуклой линзы

$n \backslash e^2$	0		0,50		1,00		1,50	
	W	P	W	P	W	P	W	P
1,60	2,67	7,11	2,67	5,72	2,67	4,33	2,67	2,94
1,65	2,54	6,44	2,54	5,26	2,54	4,08	2,54	2,89
1,70	2,43	5,90	2,43	4,88	2,43	3,86	2,43	2,84
1,75	2,33	5,44	2,33	4,56	2,33	3,67	2,33	2,78

длины волны стекол; f'_0 – фокусное расстояние окуляра.

Окончательная коррекция aberrаций производится путем интерполяции e^2 и r_{xp} .

В табл. 2 приведены оптические характеристики нового комплекса ортоскопических, анастигматических окуляров для микроскопов. Асферическая поверхность второго порядка (эллипсоидальная) наносится на выпуклую (третью) поверхность окуляра. Отступление асферической поверхности от ближней сферы изменяется в диапазоне $0,3 \div 1$ мм.

На рисунке приведена принципиальная оптическая схема рассчитанных окуляров. В табл. 3–10 приведены остаточные aberrации, вычисленные в обратном ходе лучей.

В заключение отметим, что разработанный комплект широкоугольных ортоскопических и

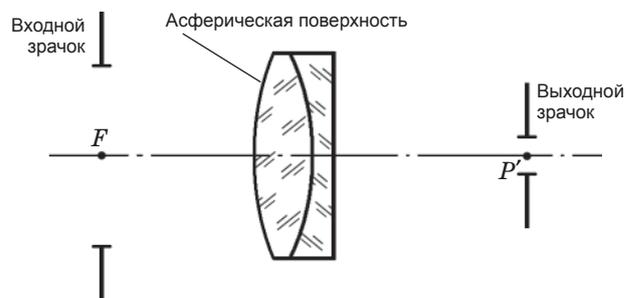
Таблица 2. Оптические характеристики окуляров

№	$\bar{\Gamma}$, крат	f' , мм	$2y'$, мм	D' , мм	$S'_{p'}$, мм
1	6,3	39,6	22	1,0	48,91
2	10	25	18	1,0	25,33
3	16	15,6	12	1,0	12,82
4	25	10	7	1,0	6,79

$\bar{\Gamma}$ – видимое увеличение окуляра; f' – фокусное расстояние; $2y'$ – линейное поле; D' – диаметр выходного зрачка; $S'_{p'}$ – удаление выходного зрачка от последней поверхности окуляра.

Таблица 3. Aberrации для точки на оси

m	$\text{tg}\sigma'$	$\Delta S'$, мм	$\Delta y'$, мм	$S'_{p'} - S'_{c'}$, мм	η , %
0,50	5,01	-0,04	-0,002	-0,55	-0,17
0,35	3,55	-0,02	-0,001	-0,55	-0,09
0	0	0	0	-0,55	0



Широкоугольный ортоскопический анастигматический окуляр микроскопа

Таблица 4. Аберрации для точки вне оси

ω	S_p	$S'_{p'}$	y'	z'_m	z'_s	$z'_s - z'_m$	$\frac{\Delta y'}{y'}$, %	$\frac{y'_{F'} - y'_{C'}}{y'}$, %
-16°	-48,91	170	11,78	-1,13	-1,13	0	2,69	0,32
-11°31'	-46,25	170	8,22	-0,53	-0,52	0,01	1,32	-0,41
0°	-43,73	170	0	0	0	0	0	-0,81

Остаточные аберрации окуляра $\bar{\Gamma} = 10^\times$, $e^2 = 1,22$.

Таблица 5. Аберрации для точки на оси

m	$\text{tg}\sigma'$	$\Delta S'$, мм	$\Delta y'$, мм	$S'_{F'} - S'_{C'}$, мм	η , %
0,50	3,02	-0,03	-0,001	-0,03	-0,07
0,35	2,64	-0,01	0	-0,02	-0,04
0	0	0	0	-0,02	0

Таблица 6. Аберрации для точки вне оси

ω	S_p	$S'_{p'}$	y'	z'_m	z'_s	$z'_s - z'_m$	$\frac{\Delta y'}{y'}$, %	$\frac{y'_{F'} - y'_{C'}}{y'}$, %
-20°	-25,33	170	9,19	-1,22	-1,13	0,09	1,06	0,06
-14°14'	-23,89	170	6,47	-0,58	-0,53	0,05	0,54	-0,63
0°	-22,44	170	0	0	0	0	0	-0,96

Остаточные аберрации окуляра $\bar{\Gamma} = 16^\times$, $e^2 = 1,15$.

Таблица 7. Аберрации для точки на оси

m	$\text{tg}\sigma'$	$\Delta S'$, мм	$\Delta y'$, мм	$S'_{F'} - z'_{C'}$, мм	η , %
0,50	2,00	-0,02	0	-0,14	-0,03
0,35	1,41	-0,01	0	-0,14	-0,02
0	0	0	0	-0,14	0

Таблица 8. Аберрации для точки вне оси

ω	S_p	$S'_{p'}$	y'	z'_m	z'_s	$z'_s - z'_m$	$\frac{\Delta y'}{y'}$, %	$\frac{y'_{F'} - y'_{C'}}{y'}$, %
-20°	-12,82	170	5,69	-0,57	-0,62	-0,05	0,11	0,50
-14°14'	-12,15	170	4,02	-0,28	-0,30	-0,02	0,06	-0,30
0°	-11,46	170	0	0	0	0	0	-0,72

Остаточные аберрации окуляра $\bar{\Gamma} = 25^\times$, $e^2 = 1,10$.

Таблица 9. Аберрации для точки на оси

m	$\text{tg}\sigma'$	$\Delta S'$, мм	$\Delta y'$, мм	$S'_{F'} - S'_{C'}$, мм	η , %
0,50	1,30	-0,031	0	-0,16	-0,01
0,35	0,90	-0,01	0	-0,16	-0,01
0	0	0	0	-0,16	0

Таблица 10. Аберрации для точки вне оси

ω	S_p	$S'_{p'}$	y'	z'_m	z'_s	$z'_s - z'_m$	$\frac{\Delta y'}{y'}$, %	$\frac{y'_{F'} - y'_{C'}}{y'}$, %
-20°	-6,79	170	3,62	-0,35	-0,39	-0,04	-0,52	0,91
-14°14'	-6,42	170	2,57	-0,17	-0,19	-0,02	-0,24	-0,29
0°	-6,04	170	0	0	0	0	0	-0,6

анастигматических окуляров, по сравнению с известными [1, 2, 6, 7] обладает рядом преимуществ:

– существенно улучшена коррекция аберраций, в особенности астигматизма, дисторсии и хроматизма увеличения;

– расширено линейное поле: коэффициент видимого поля $K = 2y'\bar{\Gamma} > 175$;

– оптические схемы окуляров в виде двухлинзового склеенного компонента просты и обеспечивают для наблюдения комфортное удаленное выходного зрачка.

С целью расширения технологических возможностей эллипсоидальные поверхности окуляра могут быть заменены параболоидальными ($e^2 = 1$) при некоторой коррекции аберраций.

Внедрение данного комплекта окуляров повысит технический уровень современных световых микроскопов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скворцов Г.Е., Панов В.А., Поляков Н.И., Федин Л.А. Микроскопы. Л.: Машиностроение, 1969. С. 229–259.
2. Панов В.А., Андреев Л.Н. Оптика микроскопов. Л.: Машиностроение, 1976. С. 279–366.
3. Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969. 670 с.
4. Русинов М.М. Несферические поверхности в оптике. М.: Недра, 1965. 195 с.
5. Андреев Л.Н. Прикладная теория аберраций. Учебное пособие. СПб.: ГИТМО (ТУ), 2008. 98 с.
6. Андреев Л.Н., Ларина Р.М., Окишев С.Г. Новые окуляры для микроскопов // Оптический журнал. 1991. Т. 58. № 6. С. 40–45.
7. Андреев Л.Н. Синтез элементной оптической базы для микроскопов // Оптический журнал. 2000. Т. 67. № 4. С. 79–82.