

ЛИНЗОВЫЕ ГИПЕРХРОМАТИЧЕСКИЕ МОНОХРОМАТИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТИВЫ МИКРОСКОПА

© 2013 Л. Н. Андреев, доктор техн. наук; В. В. Ежова, аспирантка; Г. С. Дегтярева, аспирантка

НИУ ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: evv_foist@mail.com

Рассмотрена методика расчета монохроматических объективов для видимой и ближней инфракрасной областей спектра. Разработанные объективы позволяют проводить сканирование исследуемого объекта вдоль оптической оси без перефокусировки в пределах спектральной области. Для иллюстрации приводятся оптические схемы и остаточные аберрации рассчитанных объективов.

Ключевые слова: объектив, аберрации, монохромат, хроматизм, асферика, лазер.

Коды OCIS: 200.0200, 220.0220.

Поступила в редакцию 27.08.2013.

Введение

Для проведения ряда исследований в области спектральной оптической когерентной микроскопии возникает необходимость создания монохроматических объективов, применяемых с различными лазерами.

Основным требованием, предъявляемым к этим объективам, является обеспечение дифракционного качества изображения для дискретных длин волн лазеров в пределах спектральной области без фокусировки объектива (перемещения вдоль оптической оси).

Глубина сканирования среды вдоль оптической оси определяется хроматизмом положения объектива.

Методика расчета

При расчете данного типа объективов был использован модульный принцип проектирования [1, 2]. Сущность методики заключается в том, что оптическая система объектива синтезируется из элементов (оптических модулей) с известными коррекционными свойствами.

У объективов-планмонохроматов коррекции подлежат следующие аберрации: сферическая, кома, астигматизм, кривизна поверхности.

Для выполнения этих требований оптическая схема должна состоять не менее чем из двух компонентов, разделенных воздушным промежутком заданной величины. Это вытекает из рассмотрения выражений коэффициентов аберраций 3-го порядка S_1 , S_2 , S_3 , и S_4 , определяющих монохроматические аберрации в области Зейделя [1]:

$$\begin{aligned} S_1 &= h_1 P_1 + h_2 P_2, \\ S_2 &= h_1 P_1 + h_2 P_2 - J(W_1 + W_2), \end{aligned} \quad (1)$$

$$S_3 = \frac{H_1^2}{h_1} P_1 + \frac{H_2^2}{h_2} P_2 - 2J \left(\frac{H_1}{h_1} W_1 + \frac{H_2}{h_2} W_2 \right) + J^2(\Phi_1 + \Phi_2),$$

$$S_4 = (\Phi_1 + \Phi_2)\pi,$$

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

где h_1 , h_2 и H_1 и H_2 – высоты пересечения первого и второго параксиальных лучей с компонентами соответственно;

W_1, W_2, P_1, P_2, π – монохроматические параметры;

Φ_1, Φ_2 – оптические силы компонентов;

J – инвариант Лагранжа-Гельмгольца;

n – показатель преломления оптического материала.

Из (1) вытекает целесообразность синтезировать оптическую систему из апланатических модулей, у которых при $W_1 = W_2 \approx P_1 \approx P_2 \approx 0$ выполняется условие $\Phi_1 = -\Phi_2$.

Таким образом, принципиальная оптическая схема объектива состоит из двух компонентов: первого положительной оптической силы и второго в виде апланатического мениска отрицательной оптической силы с линейным увеличением $\beta = n^x$, где n – показатель преломления оптического материала мениска, у которого $P_2 = W_2 = 0$.

Фокусные расстояния компонентов из условия $\Phi_1 = -\Phi_2$ определяются как

$$\begin{aligned} f'_1 &= \frac{f'_0}{n_2}, \\ f'_2 &= -\frac{f'_0}{n_2}, \\ d &= \frac{f'_0}{n_2^2}, \\ s' &= \frac{n_2 - 1}{n_2} f'_0, \end{aligned} \quad (2)$$

где f'_0 – фокусное расстояние объектива,

f'_1 и f'_2 – фокусные расстояния первого и второго компонентов соответственно,

d – расстояние между компонентами,

s' – задний фокальный отрезок объектива,

n_2 – показатель преломления оптической среды материала апланатического мениска с $\beta = n_2^x$.

Первый компонент положительной оптической силы включает плосковыпуклую линзу из материала с показателем преломления $n = 1,6-1,65$, у которой выпуклая поверхность заменяется асферической второго порядка и описывается уравнением

$$y^2 = 2r_0 z - (1 - e^2)z^2,$$

где r_0 – радиус кривизны в осевой точке поверхности,

e – эксцентриситет в уравнении асферической поверхности второго порядка.

В такой линзе путем интерполяции величин n и e^2 возможна коррекция сферической аберрации и комы ($P = W = 0$) [2, 3].

С целью повышения числовой апертуры объектива и улучшения коррекции аберраций в первый компонент вводится апланатический мениск (один или несколько) с линейным увеличением $\beta = 1/n^x$, где n – показатель преломления оптического материала менисков [3].

В случае присоединения одного мениска фокусное расстояние плосковыпуклой линзы определяется уравнением

$$f'_{\text{Л}} = f'_1 n; \quad (3)$$

в случае присоединения двух менисков –

$$f'_{\text{Л}} = f'_1 n^2. \quad (4)$$

Радиусы кривизны поверхностей плосковыпуклой линзы и апланатических менисков определяются следующими уравнениями [1]:

$$\begin{aligned} r_1 &= (n - 1)f'_{\text{Л}}, \\ r_2 &= \infty, \end{aligned} \quad (5)$$

$$s = r \left(1 + \frac{n'}{n} \right), \quad (6)$$

$$s' = r \left(1 + \frac{n}{n'} \right),$$

где s – передний фокальный отрезок объектива.

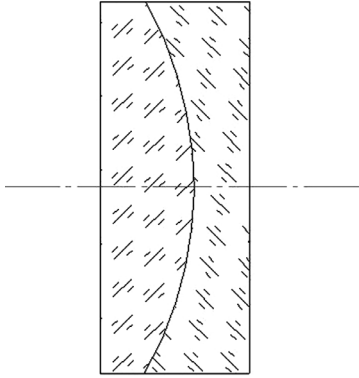
Толщины линз определяются из конструктивных соображений.

Для обеспечения хроматической аберрации положения, не превышающей допустимого значения, перед объективом располагается афокальная гиперхроматическая линза (“хроматизатор”), склеенная из линз показатели преломления материалов которых (n) для средней длины волны близки, а средние дисперсии (dn) различны [2, 4]. На рис. 1 приведены оптические схемы гиперхроматических линз (“хроматизаторов”), содержащие разное число “хроматических” поверхностей.

Так как гиперхроматическая линза (“хроматизатор”) расположена в параллельном ходе лучей, она не вносит монохроматических аберраций. Путем интерполяции радиуса “хроматической” поверхности добиваемся нужного значения хроматической аберрации положения.

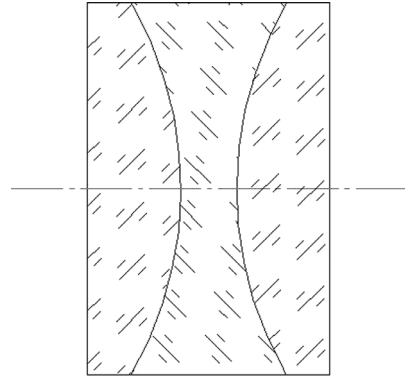
Хроматизм положения, внесенного гиперхроматической линзой, в фокальной плоскости объектива определяется уравнением

$K = 1$



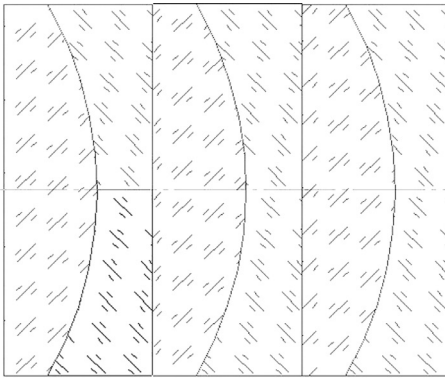
$$n_1 \approx n_2, dn_1 \neq dn_2$$

$K = 2$



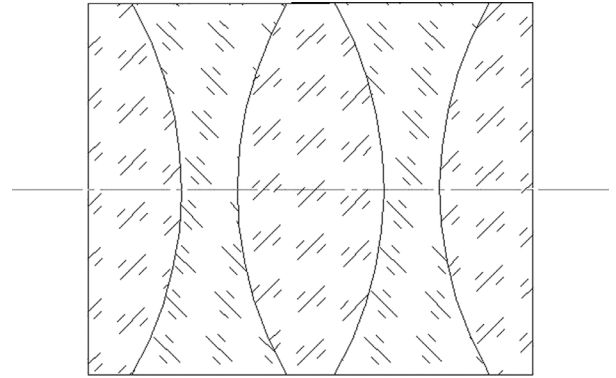
$$r_2 = -r_3$$

$K = 3$



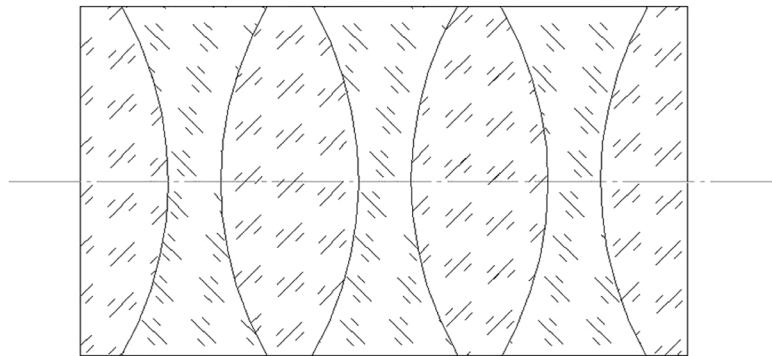
$$r_2 = r_4 = r_6$$

$K = 4$



$$r_2 = -r_3 = r_4 = -r_5$$

$K = 6$



$$r_2 = -r_3 = r_5 = -r_6 = r_8 = -r_9$$

Рис. 1. Оптические схемы “хроматизаторов” (гиперхроматических линз).

Монохромат: $f' = 40$ мм; $A = 0,20$; $2\omega = 2^\circ$

Таблица 1. Аберрации точки на оси

h	$\text{tg}\sigma'$	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %	$\Delta s'_{0,9} - \Delta s'_{0,98}$, мм	$W_{0,9}$	$W_{0,94}$	$W_{0,98}$	
7	0,18	0	0	0,04	-0,30	-0,03	0,04	0,09	
5	0,12	0,003	0,0003	0,02	-0,30	0,003	0,02	0,03	
0	0	0	0	0	-0,28	0	0	0	
$St_{0,9}$				$St_{0,94}$			$St_{0,98}$		
0,72				0,85			0,92		

Таблица 2. Аберрации главного луча

ω	y' , мм	z'_s	z'_m	$z'_s - z'_m$
-1°	0,7	-0,010	-0,020	0,010
$-40'$	0,5	-0,004	-0,010	0,006
0	0	0	0	0

Монохромат: $f' = 40$ мм; $A = 0,20$; $2\omega = 2^\circ$

Таблица 3. Аберрации точки на оси

h	$\text{tg}\sigma'$	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %	$\Delta s'_{0,9} - \Delta s'_{0,98}$, мм	$W_{0,9}$	$W_{0,94}$	$W_{0,98}$	
7	0,18	-0,002	-0,0004	0,15	-0,56	-0,20	0,06	0,28	
5	0,12	0,007	0,001	0,06	-0,54	-0,02	0,04	0,09	
0	0	0	0	0	-0,50	0	0	0	
$St_{0,9}$				$St_{0,94}$			$St_{0,98}$		
0,62				0,82			0,89		

Таблица 4. Аберрации главного луча

ω	y' , мм	z'_s	z'_m	$z'_s - z'_m$
-1°	0,7	-0,010	-0,020	0,010
$-40'$	0,5	-0,004	-0,010	0,006
0	0	0	0	0

Монохромат: $f' = 40$ мм; $A = 0,18$; $2\omega = 2^\circ$

Таблица 5. Аберрации точки на оси

h	$\text{tg}\sigma'$	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %	$\Delta s'_{0,9} - \Delta s'_{0,98}$, мм	$W_{0,9}$	$W_{0,94}$	$W_{0,98}$	
7	0,18	-0,003	0,0005	0,02	-0,36	0,06	-0,02	0,12	
5	0,12	0,006	0,0007	0,002	-0,35	0,03	0,02	0,05	
0	0	0	0	0	-0,34	0	0	0	
$St_{0,9}$				$St_{0,94}$			$St_{0,98}$		
0,68				0,77			0,59		

Таблица 6. Аберрации главного луча

ω	y' , мм	z'_s	z'_m	$z'_s - z'_m$
-1°	0,69	0,0009	-0,0032	0,0041
$-40'$	0,49	0,0005	-0,0016	0,0021
0	0	0	0	0

$$ds' = f_0'^2 \frac{\Delta dn}{r_{xp}} K, \quad (7)$$

где $\Delta dn = dn_1 - dn_2$ – разность средних дисперсий стекол, r_{xp} – радиус “хроматической” поверхности, K – число “хроматических” поверхностей.

При расчете объективов с небольшим полем ($2\omega \approx 1-2^\circ$) рассмотрим оптическую схему, которая содержит один компонент, включающий плосковыпуклую линзу с асферической поверхностью второго порядка и гиперхроматическую линзу (“хроматизатор”) (рис. 2).

В табл. 1–6 приведены остаточные aberrации некоторых рассчитанных монохроматических объективов с увеличенным хроматизмом положения.

Все aberrации, в том числе число Штреля, вычислены в параксиальной плоскости изображения для соответствующих длин волн.

Обозначения величин в табл. 1–6:

h – относительная координата на входном зрачке,

σ' – апертурный угол,

$\Delta s'$ и $\Delta y'$ – продольная и поперечная составляющие сферической aberrации,

η – отступление от условия неизопланатизма, определяющее кому;

$S'_{0,9} - S'_{0,98}$ – хроматизм положения,
 W – волновая aberrация, вычисленная в долях своей длины волны в параксиальной плоскости изображения;

St – число Штреля,

ω – угол пересечения главного луча с оптической осью,

y' – линейный размер изображения,

z'_m и z'_s – меридиональная и сагиттальная составляющие астигматизма,

$z'_s - z'_m$ – астигматизм.

Заключение

Показана эффективность применения модульного проектирования объективов-планмохроматов с увеличенным хроматизмом положения.

В пределах указанной спектральной области объективы имеют практически дифракционное качество изображения.

Предложенные методика расчета и оптические схемы могут быть использованы и при расчете объективов микроскопа с плоским полем и ахроматической и апохроматической коррекцией aberrаций. Рассчитанные объективы имеют оригинальные оптические схемы и защищены патентом Российской Федерации [5].

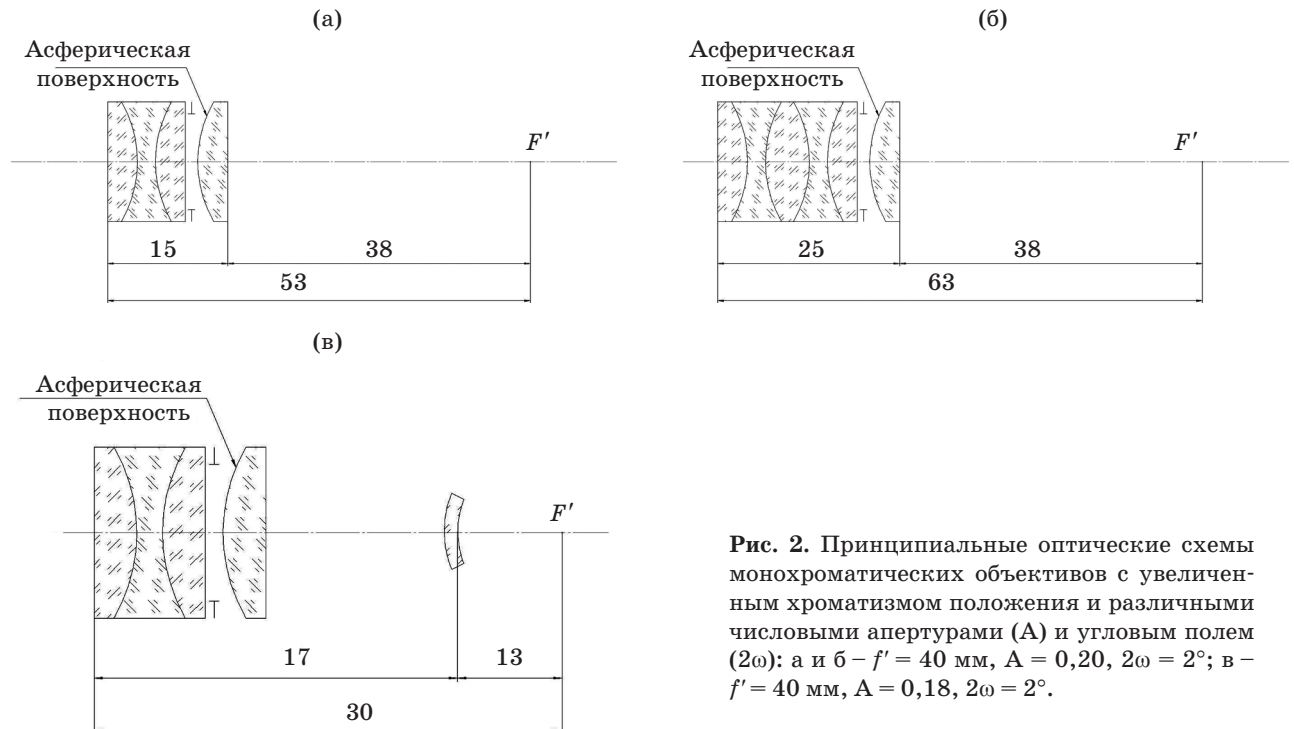


Рис. 2. Принципиальные оптические схемы монохроматических объективов с увеличенным хроматизмом положения и различными числовыми апертурами (A) и угловым полем (2ω): а и б – $f' = 40$ мм, $A = 0,20$, $2\omega = 2^\circ$; в – $f' = 40$ мм, $A = 0,18$, $2\omega = 2^\circ$.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Слюсарев Г.Г.* Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989. 379 с.
 2. *Андреев Л.Н.* Прикладная теория аберраций. Учебное пособие. СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2002. 100 с.
 3. *Андреев Л.Н., Ежова В.В.* Прикладная теория аберраций. Часть вторая. Учебное пособие. СПб: СПбНИУ ИТМО, 2011. 52 с.
 4. *Панов В.А., Андреев Л.Н.* Оптика микроскопов. Л.: Машиностроение, 1976. 432 с.
 5. *Андреев Л.Н., Куцевич С.В.* Объектив. Патент РФ на полезную модель №121089 от 10.05.2012.
-