УДК 535.317

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОБЪЕКТИВА С КОНИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНКОЙ

© 2016 г. **В. А. Зверев**, доктор техн. наук; **Г. В. Карпова**, канд. техн. наук; **И. Н. Тимощук**, канд. техн. наук

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: post_vaz@rambler.ru, tim_ir@rambler.ru

Показано, что при остаточной сферической аберрации, превосходящей допустимую величину, при экранировании центральной зоны световых пучков лучей изображение точки в плоскости, смещённой относительно номинального положения, имеет вид кольца. Дополнение системы пластинкой с конической поверхностью позволяет преобразовать кольцо в круг диаметром, равным ширине кольца. Рассмотрен метод параметрического синтеза такой системы.

Ключевые слова: *оптическая система, сферическая аберрация, плоскость наилучшей установки, коническая поверхность, концентрическая система поверхностей.*

Коды OCIS: 080.0080, 110.0110.

Поступила в редакцию 17.12.2015.

В зеркальных и зеркально-линзовых оптических системах центральная зона входного зрачка, как правило, экранируется, т.е. экранируемая часть осевого пучка лучей в образовании изображения не участвует, а, следовательно, и не вносит аберраций в образованное изображение. Поэтому, если считать, что волновая аберрация для крайних лучей на входном зрачке оптической системы и для лучей на границе экранируемой части пучка равна нулю, то величина остаточной волновой аберрации, учитываемая при оценке качества изображения точки, заметно уменьшится [1]. В оптической системе объектива Шмидта несферическую поверхность коррекционной пластинки Бауэрс А. заменил конической поверхностью [2]. Радиус кривизны в вершине конуса равен нулю. Следовательно, коническая поверхность не имеет параксиальной области и для анализа её аберрационных свойств теория первичных аберраций (теория аберраций третьего порядка) не применима.

Рассмотрим действие конической поверхности в оптической системе Бауэрса А. на примере оптической системы, состоящей из отражающей поверхности сферической формы и плоскопараллельной пластинки, на второй поверхности которой по ходу лучей в осевой точке расположен центр кривизны сферической поверхности, совмещённый с центром входного зрачка, как показано на рис. 1. Чтобы избежать проблем со знаками величин, формально удобно дополнить рассматриваемую систему плоской отражающей поверхностью, которая, как известно, не вносит аберраций в изображение. Поперечная сферическая аберрация изображения, образованного рассматриваемой системой, определяется формулой [3]

$$\delta g' = f_0'\left(1-\sqrt{\frac{2}{1+\cos\sigma'}}\right)\mathrm{tg}\sigma', \qquad (1)$$

где σ' – задний апертурный угол. Преобразуем это выражение к виду:

$$\delta g' = f_0'\left(\mathrm{tg}\sigma' - \sqrt{2}\sqrt{1+\mathrm{tg}^2\sigma' - \sqrt{1+\mathrm{tg}^2\sigma'}}\right). \qquad (2)$$

Используя правила разложения функций в степенной ряд, при $|\mathrm{tg}\sigma'| \le 1$ в масштабе фокусного расстояния (при $f'_0 = 1$) получаем

$$\delta g' = -\frac{1}{8}\mathrm{tg}^3\sigma' + \frac{9}{128}\mathrm{tg}^5\sigma' - \frac{49}{1024}\mathrm{tg}^7\sigma' + \ldots \qquad (3)$$

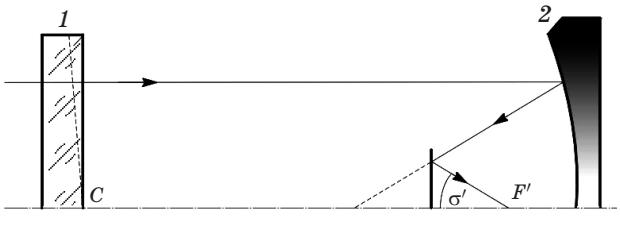

Рис. 1. Оптическая схема зеркальной системы с плоскопараллельной пластинкой: *1* – плоско-параллельная пластинка, *2* – сферическое зеркало.

На рис. 2 представлена кривая зависимости $\delta g' = \delta g'(\mathrm{tg}\sigma')$, определяемой формулой (3). Из формулы (3) следует, что для крайнего луча осевого пучка при $\mathrm{tg}\sigma'_{\mathrm{last}} = 1$ поперечная сферическая аберрация $\delta g'_{\mathrm{last}} = -0{,}1025$.

В общем случае плоскость наилучшего изображения, как правило, смещена относительно плоскости параксиального изображения на некоторое расстояние Δ'. Величина остаточной аберрации в плоскости наилучшего изображения определяется очевидным выражением

$$\delta g'_{\Delta'} = \delta g' - \Delta' \mathrm{tg}\sigma'. \qquad (4)$$

При этом для крайнего луча аберрация $\delta g'_{\Delta'\mathrm{last}} = \delta g'_{\mathrm{last}} - \Delta' \mathrm{tg}\sigma'_{\mathrm{last}} = -0{,}1025 - \Delta'$. Вполне очевидно, что смещение Δ' определяется тангенсом угла $\psi_{\Delta'}$ между линией, проходящей через начало координат, и осью $\mathrm{tg}\sigma'$, как показано на рис. 2. Обозначим σ'_{extr} – задний апертурный угол, при котором поперечная аберрация принимает экстремальное значение $\delta g'_{\Delta'\mathrm{extr}}$. Применив формулы (3) и (4), путём непосредственных вычислений находим, что при $\mathrm{tg}\sigma'_{\mathrm{extr}} = 0{,}5$ и смещении $\Delta' = -0{,}077$ соблюдается условие $\delta g'_{\Delta'\mathrm{last}} + \delta g'_{\Delta'\mathrm{extr}} = 0$, при этом $\delta g'_{\Delta'\mathrm{last}} = -\delta g'_{\Delta'\mathrm{extr}} \approx -0{,}025$. В результате получили, что в плоскости наилучшего изображения аберрационное пятно рассеяния примерно в четыре раза меньше, чем в плоскости параксиального изображения.

При центральном экранировании входного зрачка центральная часть осевого пучка лучей не участвует в образовании изображения. Вполне очевидно, что в этом случае сечение осевого пучка лучей плоскостью, параллельной плоскости параксиального изображения и смещённой относительно неё в направлении продольной аберрации, примет вид светлого кольца. Для определения ширины кольца обратимся к рис. 2,

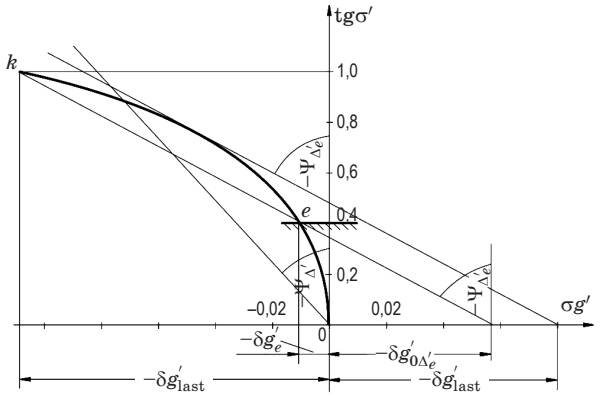

Рис. 2. Кривая зависимости $\delta g' = \delta g'(\mathrm{tg}\sigma')$.

на котором из крайней точки кривой через граничную точку e экранируемой части пучка проведена прямая, пересекающая ось абсцисс в точке, расположенной на расстоянии $\delta g'_{\Delta' e}$ от начала координат.

Пусть Δ'_e – величина смещения сечения пучка лучей плоскостью, перпендикулярной оптической оси, относительно плоскости параксиального изображения. Тогда в соответствии с рис. 2 $\delta g'_{\mathrm{last}} - \delta g'_e = \Delta'_e\,(\mathrm{tg}\sigma'_{\mathrm{last}} - \mathrm{tg}\sigma'_e)$. Отсюда следует, что

$$\Delta'_e = \mathrm{tg}\psi_{\Delta' e} = \frac{\delta g'_{\mathrm{last}} - \delta g'_e}{\mathrm{tg}\sigma'_{\mathrm{last}} - \mathrm{tg}\sigma'_e}, \qquad (5)$$

где $\psi_{\Delta' e}$ – угол между осью ординат и линией, пересекающей ось абсцисс в точке $\delta g'_{\Delta' e} = \delta g'_{\Delta' e}(\delta g'_{0\Delta' e}, 0)$. В соответствии с рисунком расстояние $\delta g'_{0\Delta' e} = \delta g'_{\mathrm{last}} - \Delta'_e \mathrm{tg}\sigma'_{\mathrm{last}}$. Учитывая выражение (5), получаем

$$\delta g'_{0\Delta' e} = \frac{\delta g'_e \mathrm{tg}\sigma'_{\mathrm{last}} - \delta g'_{\mathrm{last}} \mathrm{tg}\sigma'_e}{\mathrm{tg}\sigma'_{\mathrm{last}} - \mathrm{tg}\sigma'_e}. \qquad (6)$$

При $\mathrm{tg}\sigma'_{\mathrm{last}} = 1$, $\mathrm{tg}\sigma'_e = 0{,}4$: $\delta g'_{\mathrm{last}} = -0{,}1025$, $\delta g'_e = -0{,}0080$; $\Delta'_e = -0{,}1575$, $\delta g'_{0\Delta' e} = 0{,}055$.

Линию, пересекающую ось абсцисс в точке $(\delta g'_{0\Delta' e}, 0)$, можно определить уравнением

$$\delta g'_{\Delta' e} = \delta g'_{0\Delta' e} + \Delta'_e \mathrm{tg}\sigma'. \qquad (7)$$

При этом отклонение аберрационной кривой от этой линии определится выражением

$$\delta g'_e = \delta g' - \delta g'_{\Delta' e}. \qquad (8)$$

Экстремальное значение остаточной сферической аберрации находим из условия равенства нулю частной производной поперечной сферической аберрации по апертурному углу

$$\frac{d\delta g'_e}{d\mathrm{tg}\sigma'} = 0.$$

Применив выражения (3) и (8), это условие представим в виде

$$\Delta'_e + \frac{3}{8}\mathrm{tg}^2\sigma' - \frac{45}{128}\mathrm{tg}^4\sigma' + \frac{343}{1024}\mathrm{tg}^6\sigma' = 0. \qquad (9)$$

Вполне очевидно, что $0 < \mathrm{tg}\sigma'_{\mathrm{extr}} < 1$. В результате применения метода итерации Ньютона при начальном значении $\mathrm{tg}\sigma' = 0{,}7$ находим, что $\mathrm{tg}\sigma'_{\mathrm{extr}} = 0{,}746$. При этом экстремальное значение остаточной сферической аберрации $(\delta g'_e)_{\mathrm{extr}} = 0{,}0207$.

Проведём к аберрационной кривой касательную, параллельную линии ke, т.е. под тем же углом $\psi_{\Delta' e}$, до пересечения с осью абсцисс

в точке ($\delta g'_{ke}$, 0), как показано на рис. 2. Таким образом, в рассматриваемом сечении светового пучка лучей плоскостью получаем светлое кольцо сравнительно узкой ширины, равной $\delta g'_{ke} - \delta g'_{0\Delta' e} = (\delta g'_e)_{\text{extr}}$. Средний радиус светлого кольца R_{med} определяется выражением $R_{\text{med}} = 0{,}5(\delta g'_{0\Delta' e} + \delta g'_{ke})$. Для того чтобы окружность среднего радиуса "стянуть" в точку, А. Бауэрс вторую плоскую поверхность плоскопараллельной пластики заменил конической, совместив вершину конической поверхности с центром входного зрачка. Смысл введения конической поверхности заключается в том, чтобы светлое кольцо преобразовать в аберрационное пятно рассеяния диаметром $d_p = |(\delta g'_e)_{\text{extr}}|$.

Обозначим угол при вершине конуса $2\gamma = 180° - 2\beta$. Угол w отклонения параллельного пучка лучей конической пластинкой в меридиональной плоскости равен $w = (n - 1)\beta$. Требуемый угол отклонения пучка лучей по смыслу решаемой задачи равен $w = R_{\text{med}} /(f'_0+\Delta')$. При этом угол $\beta = w/(n - 1)$. Пусть в качестве материала пластинки с конической поверхностью выбрано стекло марки ТК8 ($n_e = 1{,}61675$). Тогда при $\delta g'_{0\Delta' e} = 0{,}055$ и $\delta g'_{ke} = 0{,}0757$: $R_{\text{med}} = 0{,}0654$; $w = 0{,}0776$; $\beta = 0{,}1259$ рад. Таким образом, введение конической поверхности позволило уменьшить диаметр аберрационного пятна рассеяния по сравнению с пятном рассеяния в плоскости параксиального изображения примерно в десять раз.

Заметим, что введение в систему пластинки с конической поверхностью приведёт к хроматической аберрации сдвига изображения. Дифференцируя формулу, определяющую угол отклонения параллельного пучка лучей конической пластинкой в меридиональной плоскости, получаем $dw = dn\beta$. При этом хроматическая аберрация сдвига изображения определится формулой $\delta w_{\text{last}} = w/\mu$, где μ – коэффициент дисперсии материала пластинки. Так, например, коэффициент дисперсии стекла марки ТФ8 равен $\mu_e = 58{,}84$. Тогда при $w = 0{,}0776$ хроматическая аберрация $\delta w_{\text{last}} = 0{,}0013$. Отсюда следует, что чем меньше угол w, тем меньше требуемая величина угла β, а требуемая величина угла w тем меньше, чем меньше средний радиус светлого кольца в сечении пучка лучей плоскостью; светлое кольцо тем уже, чем ближе аберрационная кривая к прямой линии.

Очевидным решением этой задачи является уменьшение относительного отверстия (увеличение диафрагменного числа) системы и возможное при этом увеличение центрального экранирования входного зрачка по диаметру. Однако Бауэрс А. решил эту задачу иначе, дополнив рассматриваемую систему мениском, образующим с отражающей поверхностью сферической формы концентрическую систему поверхностей [2]. Анализ аберрационных свойств такой системы выполним на конкретном примере.

Пусть требуется определить параметры оптической системы объектива, построенной по схеме Бауэрса А. Фокусное расстояние объектива $f'_0 = 250$ мм, диафрагменное число $F \approx 0{,}7$, коэффициент центрального экранирования $k_e \approx 0{,}5$. Путём изменения толщины мениска приводим распределение остаточной сферической аберрации к виду, удовлетворяющему требованиям решаемой задачи. Конструктивные параметры и остаточные аберрации изображения, образованного рассчитанной системой, приведены в табл. 1.

Из крайней точки кривой сферической аберрации через граничную точку экранируемой части пучка проведём прямую, которая пересекает ось абсцисс в точке, расположенной на расстоянии $\delta g'_{\Delta' e}$ от начала координат. При этом в соответствии с формулой (5) получаем

$$\Delta'_e = \frac{\delta g'_{\text{last}} - \delta g'_e}{\text{tg}\sigma'_{\text{last}} - \text{tg}\sigma'_e} = \frac{-6{,}88 + 0{,}96}{1 - 0{,}386} = -9{,}642 \text{ мм}.$$

В соответствии с формулой (6)

$$\delta g'_{0\Delta' e} = \frac{\delta g'_e \text{tg}\sigma'_{\text{last}} - \delta g'_{\text{last}} \text{tg}\sigma'_e}{\text{tg}\sigma'_{\text{last}} - \text{tg}\sigma'_e} = 2{,}762 \text{ мм}.$$

Линия, пересекающая ось абсцисс в точке ($\delta g'_{0\Delta' e}$, 0), определяется уравнением (7): $\delta g'_{\Delta' e} = \delta g'_{0\Delta' e} + \Delta'_e \text{tg}\sigma' = 2{,}762 - 9{,}642\text{tg}\sigma'$.

При этом отклонение аберрационной кривой от этой линии определится выражением (8), с учётом формулы (7) принимающим вид

$$\delta g'_e = \delta g' - \delta g'_{0\Delta' e} - \Delta'_e \text{tg}\sigma' = \delta g' - 2{,}762 + 9{,}642\text{tg}\sigma'.$$

Результаты вычислений представим в виде табл. 2.

По данным табл. 1 построена кривая зависимости $\delta g'_e = \delta g'_e(\text{tg}\sigma')$, представленная на рис. 3. Из вида кривой следует возможность уменьшения ширины светлого кольца в изображении точки, если принять

$$\delta g'^*_{\text{last}} = \delta g'_{\text{last}} - 0{,}14 = -7{,}02 \text{ мм};$$

$$\delta g'^*_e = \delta g'_e + 0{,}08 = -0{,}88 \text{ мм}.$$

Таблица 1. Начальный вариант оптической системы объектива Бауэрса

Конструктивные параметры						
№ пов.	Радиусы, мм	D, мм	Марки стекол	Показатель преломления	Световые диаметры, мм	Стрелки, мм
				1,000000		
1	−222,500	27,50	ТК8	1,616754	402,87	−128,00
2	−250,000	274,74		1,00000	438,66	−130,02
3	−524,741	−150,00		−1,00000	611,71	−98,35
4	0,000			1,00000	461,03	0,00

Остаточные аберрации				
s_0, мм	s_p, мм	s'_p, мм	s'_0, мм	f'_0, мм
	−222,5	374,7	124,74	250,00
$y = 0$, мм	m, мм	$\Delta s'$, мм	$\mathrm{tg}\sigma'$	$\delta g'$, мм
	182,00	−6,85	1,00	−6,88
	158,00	−6,33	0,780	−4,93
	129,00	−4,67	0,586	−2,74
	91,00	−2,48	0,386	−0,957

Таблица 2. Результаты расчёта аберраций

$\mathrm{tg}\sigma'$	0,386	0,489	0,586	0,681	0,780	0,886	1,0
$\delta g'$, мм	−0,96	−1,77	−2,74	−3,81	−4,93	−6,01	−6,88
$\delta g'_e$, мм	0	0,18	0,15	−0,006	−0,17	−0,23	0

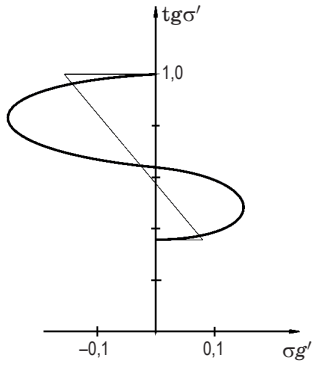

Рис. 3. Кривая зависимости $\delta g'_e = \delta g'_e(\mathrm{tg}\sigma')$.

Тогда

$$\Delta'^*_e = \frac{\delta g'^*_{\mathrm{last}} - \delta g'^*_e}{tg\sigma'_{\mathrm{last}} - tg\sigma'_e} = -10{,}0 \text{ мм};$$

$$\delta g'^*_{0\Delta' e} = \frac{\delta g'^*_e tg\sigma'_{\mathrm{last}} - \delta g'^*_{\mathrm{last}} tg\sigma'_e}{tg\sigma'_{\mathrm{last}} - tg\sigma'_e} = 2{,}98 \text{ мм}.$$

При этом $\delta g'^*_e = \delta g' - 2{,}98 + 10\mathrm{tg}\sigma'$. И в этом случае результаты вычислений удобно представить в виде табл. 2.

Из анализа величин, представленных в таблице, следует, что в плоскости, смещённой относительно параксиального изображения на расстояние $\Delta'^*_e = -10{,}0$ мм, при рассматриваемом характере коррекции сферической аберрации изображение точки имеет вид светлого кольца шириной не более 0,3 мм при среднем радиусе кольца $R_{\mathrm{med}} = 2{,}98$ мм. Дополнение рассматриваемой системы пластинкой с конической поверхностью позволяет светлое кольцо преобразовать в пятно диаметром, равным ширине кольца. Для этого угол наклона параллельного пучка лучей должен быть равен

$$w = \frac{R_{\mathrm{mede}}}{f'_0 + \Delta'^*_e} = \frac{2{,}98}{250 - 10} = 0{,}01242.$$

Пластинка с конической поверхностью в сечении меридиональной плоскостью имеет вид двух симметрично расположенных клиньев с углами в вершине ±β. Для пластинки из стекла ТК8 получаем

$$\beta = \frac{w}{n-1} = \frac{0{,}01242}{0{,}61675} = 0{,}02014 \text{ рад},$$

т.е. $\beta = 1°9'14''$. При этом коническая поверхность определяется уравнением

$$x^2 + y^2 = (49{,}6457z)^2. \qquad (10)$$

Таблица 3. Вариант оптической системы объектива Бауэрса

Конструктивные параметры						
N пов.	Радиусы, мм	D, мм	Марки стекол	Показатель преломления	Световые диаметры, мм	Стрелки, мм
				1,000000		
1	0,000	40,00	ТК8	1,616754	364,18	0,00
2	A*	222,50		1,000000	364,18	−3,40
3	−222,500	27,50	ТК8	1,616754	361,10	−92,47
4	−250,000	274,74		1,000000	386,39	−91,33
5	−524,740	−150,00		−1,000000	429,67	−45,99
6	0,000			1,000000		0,00
A*: $y^2 = -0{,}1z + 2862{,}48z^2$						
Остаточные аберрации						
s_0, мм	s_p, мм	s'_p, мм	s'_0, мм	f'_0, мм		
∞	24,74	124,74	114,74	250.00		
$y = 0$, мм	m, мм	$\Delta s'$, мм	$\mathrm{tg}\sigma'$	$\delta g'$, мм		
	182,00	0,149	0,981	0,146		
	158,00	−0,192	0,761	−0,146		
	129,00	0,194	0,570	0,110		
	91,00	−0,260	0,373	−0,969		

Конструктивные параметры и остаточные аберрации изображения, образованного оптической системой, полученной в результате расчёта и незначительной дополнительной коррекции аберраций, вызванных изменением хода лучей после конической поверхности, приведены в табл. 3. Схема оптической системы приведена на рис. 4а.

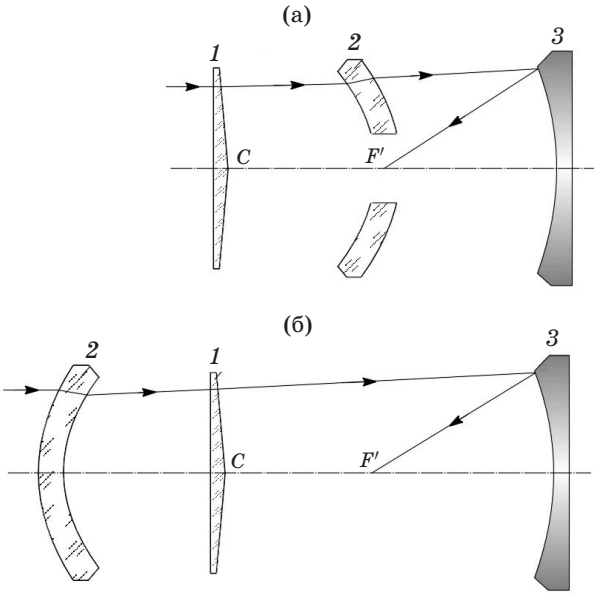

Рис. 4. Схема оптической системы объектива Бауэрса. *1* – пластинка с конической поверхностью, *2* – концентрический мениск, *3* – сферическое зеркало.

Как следует из таблицы остаточных аберраций, диаметр пятна рассеяния в изображении точки равен $d_p = 0{,}292$ мм, т.е. достаточно близок к расчётному значению. При увеличении диафрагменного числа (при уменьшении светосилы системы) применение конической поверхности позволяет достичь более совершенной коррекции аберраций. Конструктивные параметры и остаточные аберрации изображения, образованного оптической системой при $f'_0 = 250$ мм и $F = 1$, приведены в табл. 4.

Изображение, образованное рассматриваемой системой, расположено вблизи первой поверхности концентрического мениска, что не всегда удобно для размещения приёмного устройства. Однако при повороте мениска вокруг центра кривизны поверхностей на угол, равный 180°, коррекция сферической аберрации не изменяется [4]. Голландским оптиком Бауэрсом А. были разработаны различные варианты зеркально-линзовых объективов, применяемых в флюорографической аппаратуре фирмы “Оделька”, в том числе и такой, схема которого представлена на рис. 4б. В этой схеме пластинка с конической поверхностью расположена не в параллельном пучке лучей, что может повлиять на достигнутый уровень коррекции аберраций изображения, образованного исходной системой. Однако, располагая возможностью изменения величин Δ'_e и $\delta g'_{0\Delta' e}$, это влияние вполне можно компенсировать.

Таблица 4. Оптическая система объектива Бауэрса

Фокусное расстояние в мм	250,09
Диафрагменное число	1,000
Положение предмета относительно первой поверхности, мм	∞
Положение изображения относительно последней поверхности, мм	131,530
Диаметр входного зрачка, мм	250,000
Положение входного зрачка относительно первой поверхности, мм	24,741
Положение выходного зрачка относительно последней поверхности, мм	384,150
Основная длина волны, нм	546,070

Конструктивные параметры

N пов.	Радиусы, мм	D, мм	Марки стекол	Показатель преломления	Световые диаметры, мм	Стрелки, мм
				1,000000		
1	0,000	40,00	ТК8	1,616754	250,17	0,00
2	A*	212,58		1,000000	250,13	–0,40
3	–212,580	46,67	ТК8	1,616754	250,46	–40,80
4	–259,250	284,90		1,000000	275,63	–39,67
5	–544,150	–160,00		–1,000000	310,15	–22,56
6	0,000			1,000000	152,43	0,00

A*: $y^2 = -0{,}1z + 97300z^2$

Остаточные аберрации

s_0, мм	s_p, мм	s'_p, мм	s'_0, мм	f'_0, мм
∞	24,74	134,06	131,53	250,90
$y = 0$, мм	m, мм	$\Delta s'$, мм	$\mathrm{tg}\sigma'$	$\delta g'$, мм
	125,00	0,0238	0,569	0,0136
	108,00	0,0307	0,474	0,0146
	88,40	0,106	0,374	0,0396
	62,50	–0,0142	0,255	–0,0036

Рассмотренная схема построения оптической системы была принята за основу Волосовым Д.С. и Бабинцевым В.Ф. при разработке оптической системы объектива “Антарес” [5, 6]. Объективы этого типа нашли применение в ширококадровой флюорографии, в системах для фотографирования искусственных спутников Земли и в других приборах.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ермолаева Е.В., Зверев В.А., Тимощук И.Н.* Волновая аберрация в изображении точки при центральном экранировании входного зрачка // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 11. С. 47–50.
2. *Bouwers A.* Improvement of resolving power of optical systems by a new optical element // Appl. sci. Res. Section B. 1953. V. 3. P. 147–148.
3. *Зверев В.А., Хлусова Н.И.* Применение плоскопараллельной пластинки для исправления сферической аберрации // Оптико-механическая промышленность. 1972. № 9. С. 24–25.
4. *Попов Г.М.* Концентрические оптические системы и их применение в оптическом приборостроении. М.: Наука, 1969. 135 с.
5. *Бабинцев В.Ф., Волосов Д.С.* Зеркально-линзовый объектив // А.с. № 127448 Бюлл. изобр. 1960. № 7. С. 50.
6. *Бабинцев В.Ф.* Особо светосильные зеркально-линзовые объективы типа “Антарес” // Оптико-механическая промышленность. 1965. № 9. С. 15–17.