

что сегодня наиболее приемлемым с точки зрения простоты, универсальности и обеспечения удовлетворительной точности является метод лежащей на поверхности капли.

2. Предложен комплекс устройств и усовершенствована методика определения краевого угла смачивания по методу лежащей на плоской поверхности капли, учитывающие влияние шероховатости поверхности исследуемого образца, что позволило повысить точность его измерений и достоверность их результатов.

3. Получена уточненная формула для расчета краевого угла смачивания, в которой помимо геометрических параметров капли учитывается влияние шероховатости поверхности образца путем введения коэффициента шероховатости, определяемого как отношение высотных параметров микрогеометрии поверхности исследуемого образца к их значениям, соответствующим его полированной поверхности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Адамсон А.** Физическая химия поверхностей. – М.: Мир, 1979. – 568 с.
2. **Определение** краевого угла в капиллярно-пористых материалах / П. А. Витязь, В. К. Шелег, В. М. Капцевич и др. // Заводская лаборатория. – 1985. – № 4. – С. 53–55.

3. **Метод** определения краевого угла смачивания в пористых порошковых материалах / П. А. Витязь, В. К. Шелег, В. М. Капцевич и др. // Порошковая металлургия. – 1986. – № 4. – С. 52–55.

4. **Зимон А. Д.** Адгезия жидкости и смачивание. – М.: Химия, 1974. – 416 с.

5. **Сумм Б. Д., Горюнов Ю. Б.** Физико-химические основы смачивания и растекания. – М.: Химия, 1976. – 240 с.

6. **Савич В. В., Киселев М. Г., Воронович А. И.** Современные материалы хирургических имплантатов и инструментов. – Мн.: УП «Технопринт», 2003. – 119 с.

7. **Методика** исследования смачиваемости и адсорбционной способности титановых имплантатов / Т. П. Павич, Д. И. Сарока // Новые материалы и технологии: Порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: Материалы докладов. – Мн.: Геопринт, 2004. – С. 208–211.

8. **Boettcher R.** Fast Bone Regeneration (FBR) – ein Anwenderbericht // Dentale Implantologie. – 2001. – № 3. – С. 8–12.

9. **Поверхностные** явления и поверхностно-активные вещества: Справ. / Под ред. А. А. Абрамзона, Е. Д. Шукина. – Л.: Химия, 1984. – 392 с.

10. **Методика** исследования смачиваемости и адсорбционной способности титановых имплантатов / М. Г. Киселев, В. В. Савич, Т. П. Павич // Наука – образованию, производству, экономике. Материалы Второй междуна-род. науч.-техн. конф. – Мн.: БНТУ, 2004. – С. 220–224.

11. **United States patent** 5268733, G 01 B 11/26; G 01 N 13/02, 1993.

12. **United States patent** 4688938, G 01 B 11/26, 1987.

13. **Филонов М. Р.** Измерение плотности металлических расплавов методом лежащей капли с использованием цифровой фотокамеры // Материаловедение. – 2002. – № 1. – С. 13–19.

УДК 535.317

## КОМПОЗИЦИЯ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНАСТИГМАТИЧЕСКОЙ АФОКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

*Канд. техн. наук, доц. АРТЮХИНА Н. К., КОРСАК Н. В.*

*Белорусский национальный технический университет*

Современное оптическое приборостроение ставит перед разработчиками оптических систем задачу получения все более совершенного качества изображения при большой светосиле и значительных угловых полях зрения. Существенное расширение спектрального диапазона работы оптических приборов и создание приемников лучистой энергии, чувствительных в

далеких областях спектра, создают необходимость разработки чисто зеркальной оптики, применяемой во многих областях науки и техники. В объективах с высокой и синтезированной апертурой часто встречаются задачи, использующие схемное решение с телескопической насадкой к фокусирующему объективу [1–3]. В связи с этим исследование возможно-

стей известных и создание принципиально новых конструкций афокальных зеркальных систем весьма актуально и представляет значительный интерес.

В настоящей работе рассматривается композиция анастигматической схемы с двумя вогнутыми параболическими зеркалами различной оптической силы и выпуклым гиперболическим зеркалом, полученная в результате поиска афокальных систем [4].

Принципиальная схема исследуемой системы приведена на рис. 1. Зеркала 1 и 2 образуют классический объектив Кассегрена, который создает действительное изображение предмета на оптической оси, где установлено плоское зеркало 4. Вогнутое зеркало 3, расположенное перпендикулярно оптической оси основной системы, переносит промежуточное изображение в бесконечность. Третье зеркало является коррекционным элементом для устранения комы и астигматизма эквивалентной системы из первых двух зеркал, без нарушения коррекции в ней сферической аберрации, а кривизна изображения исправляется подбором конструктивных параметров.

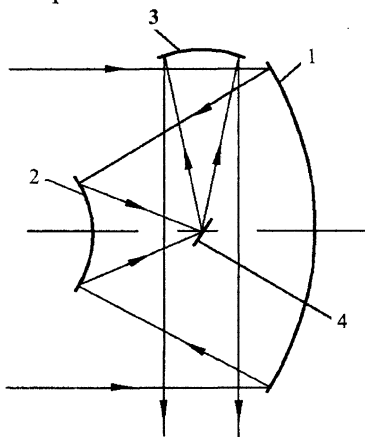


Рис. 1. Принципиальная схема афокальной анастигматической системы с промежуточным изображением между вторым и третьим зеркалами

Для расчета рассматриваемой трехзеркальной афокальной системы введем условия нормировки для первого нулевого луча, идущего из осевой точки предмета на край входного зрачка (обозначения в [5]):

$$h_1 = 1,0; \alpha_3 = 1,0; f'_{1,2} = 1,0; \alpha_1 = \alpha_4 = 0. \quad (1)$$

В результате расчета углов и высот нулевого луча получим сводку формул для определе-

ния радиусов зеркальных поверхностей  $r$  и осевых расстояний  $d$  между зеркалами:

$$r_1 = \frac{2}{\alpha_2}; r_2 = \frac{2h_2}{\alpha_2 + \alpha_3}; r_3 = \frac{2h_3}{\alpha_3 + \alpha_4}; \quad (2)$$

$$d_1 = \frac{1-h_2}{\alpha_2}; d_2 = \frac{h_2-h_3}{\alpha_3}.$$

Введем параметр  $\delta$ , определяющий положение третьего зеркала относительно вершины первого зеркала. Тогда

$$d_2 = -(d_1 - \delta). \quad (3)$$

Если задано значение видимого увеличения  $\Gamma$ , то получим дополнительные соотношения:

$$h_3 = \frac{1}{\Gamma}; d_2 = \frac{\Gamma h_2 - 1}{\Gamma}. \quad (4)$$

Композиция афокальной системы (рис. 2), где поверхности зеркал обозначены главными плоскостями, выполняется при условии  $h_1 \leq -S_3$ , которое с учетом формул (1), (4) имеет вид

$$K \geq -\Gamma \alpha_3. \quad (5)$$

В этом случае третье зеркало не вносит дополнительного экранирования, но относительное отверстие системы Кассегрена  $A = D : f'_{1,2} = 1:K$  не может быть любым. Оно тем больше, чем меньше видимое увеличение  $\Gamma$ .

Для оценки габаритных соотношений зеркальной оптики учитывается коэффициент кривизны изображения третьего порядка, который при исправленном астигматизме для трехкомпонентной системы выражает условие Петцваля:

$$D_0 = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^3 \frac{v_s \alpha_{s+1} - v_{s+1} \alpha_s}{h_s}.$$

Тогда, учитывая (1), получим выражение

$$\alpha_2 - \frac{1 + \alpha_2}{h_2} + \Gamma = 0, \quad (6)$$

из которого легко найти значение высоты

$$h_2 = \frac{1 + \alpha_2}{\Gamma + \alpha_2}. \quad (7)$$

Преобразовав формулы (3) и (7), имеем равенство  $h_2 = \frac{\Gamma - \alpha_2(\delta\Gamma + 1)}{\Gamma(1 - \alpha_2)}$  и квадратное уравнение для определения  $\alpha_2$

$$\alpha_2^2(1 + \delta\Gamma - \Gamma) + \alpha_2\delta\Gamma^2 + \Gamma(1 - \Gamma) = 0. \quad (8)$$

Максимально возможное угловое поле зрения  $\omega$  и размер плоского зеркала  $h_4$ , служащего для вывода светового пучка из телескопической системы, определяются по экранированному лучу из выражений:

$$f'_{1,2} \operatorname{tg}\omega = \frac{\eta D}{2\Gamma}; \quad h_4 = \frac{\eta}{\Gamma},$$

где  $D$  – диаметр входного зрачка афокальной системы;  $\eta$  – коэффициент центрального экранирования объектива Кассегрена, который определяется значением высоты  $h_2$ . При рассмотрении вариантов габаритного расчета целесообразно следить за апертурой зеркал, не допуская в них высоких относительных отверстий. Иногда по технологическим соображениям целесообразно считать заданной величину оптической силы первого зеркала  $\Phi_1 = \alpha_2 = \frac{1}{f_1} = -1,0$ .

В общем случае в этой зеркальной оптической системе для исправления aberrаций третьего порядка – сферической aberrации, комы и астигматизма – имеются три коррекционных параметра (деформации поверхностей). Остальные параметры нельзя считать полноценными, так как их использование может привести к конструктивно неосуществимой системе или дающей мнимое изображение, или вообще не пропускающей свет на плоскость изображения.

Запишем уравнения, связывающие коэффициенты aberrаций третьего порядка с конструктивными параметрами:

$$\left. \begin{aligned} B_0 &= \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=3} h_s Q_s; \\ K_0 &= -\frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=3} W_s + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=3} h_s Q_s S_s; \\ C_0 &= \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=3} \frac{v_{s+1}\alpha_{s+1} - v_s\alpha_s}{h_s} - \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=3} W_s S_s + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=3} h_s Q_s S_s^2; \\ D_0 &= \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=3} \frac{v_s\alpha_{s+1} - v_{s+1}\alpha_s}{h_s} + C_0, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где вспомогательные величины определяются формулами:  $v_s = \frac{1}{n_s}$ ;  $h_{s+1} = h_s - \alpha_{s+1}d_s$ ;

$$S_s = \sum_{k=1}^{k=s-1} \frac{v_{k+1}d_k}{h_k h_{k+1}}; \quad S_1 = 0; \quad T_s = \frac{(v_s\alpha_{s+1} - v_{s+1}\alpha_s)^3}{v_s v_{s+1} (v_{s+1} - v_s)^2};$$

$$P_s = \left( \frac{\alpha_{s+1} - \alpha_s}{v_{s+1} - v_s} \right)^2 (v_{s+1}\alpha_{s+1} - v_s\alpha_s);$$

$$W_s = \left( \frac{\alpha_{s+1} - \alpha_s}{v_{s+1} - v_s} \right) (v_{s+1}\alpha_{s+1} - v_s\alpha_s).$$

Исследуемая система будет анастигматом, если

$$-\alpha_2 + \frac{\alpha_2 + \alpha_3}{h_2} - \frac{\alpha_3}{h_3} - 2(S_2W_2 + S_3W_3) = 0. \quad (10)$$

Решив систему уравнений (9) с использованием формул (6), (7) и значений вспомогательных величин, находим коэффициенты деформации поверхностей:  $\sigma_1 = -1,0$ ;  $\sigma_2 = -7,708874$ ;  $\sigma_3 = -1,0$ . Первое и третье зеркала имеют параболическую форму, а квадрат эксцентриситета меридиональной кривой поверхности второго зеркала  $e^2$  описывает гиперболоид и определяется формулой

$$e^2 = \left( \frac{r_1 - 2}{r_1 + 2} \right)^2. \quad (11)$$

В табл. 1 приведены максимально возможные относительные отверстия  $A$  и угловые поля зрения  $\omega$  при минимальном коэффициенте центрального экранирования  $\eta$  для трех вариантов телескопических систем различного видимого увеличения  $\Gamma$ .

Таблица 1  
Оптические характеристики афокальных систем с третьим зеркалом, расположенным перпендикулярно оптической оси

$\Gamma$	$-4^x$	$-6^x$	$-9^x$
$A$	0,5	0,33	0,22
$\eta$	0,18	0,17	0,15
$\operatorname{tg}\omega$	0,0015	0,0047	0,0018

Представляет практический интерес афокальная система, имеющая увеличение  $\Gamma = -4^x$ , габариты и конструктивные параметры которой определяются углом  $\alpha_2 = -2,324722$  и высотой  $h_2 = 0,20945$  (указаны относительные значения величин).

Приведем конструктивное описание и тех-

нические характеристики этой композиции, рассчитанной для  $\delta = 0,05$ :

$$f'_{1,2} = 500 \text{ мм}; D : f'_{1,2} = 1:2; 2\omega = 2^\circ;$$

$$* r_1 = -470,40 \text{ мм}; d_1 = -191,95; h_1 = 125 \text{ мм};$$

$$** r_2 = -163,34 \text{ мм}; d_2 = 216,95; h_2 = 25,2 \text{ мм};$$

$$*** r_3 = -250,0 \text{ мм}; h_3 = 31,25 \text{ мм}.$$

Форма асферических поверхностей соответственно первого, второго и третьего зеркал определяется уравнениями:

$$* y^2 = -940,8x;$$

$$** y^2 = -326,68x + 6,70874x^2;$$

$$*** y^2 = -500x.$$

Аберрационные характеристики представлены в табл. 2, где  $\Delta D'$  – сферическая аберрация;  $\Delta'$  – дисторсия;  $L'_m - L'_s$  – величина астигматической разности;  $\Delta\sigma'$  – угловой размер фигуры рассеяния для края поля.

Таблица 2

Аберрационные характеристики трехзеркальной афокальной композиции

Г	2ω	Точка на оси	Точка вне оси		
		$\Delta D'$ , дптр	$\Delta'$ , дптр	$L'_m - L'_s$	$\Delta\sigma'$
$-4^\times$	$2^\circ$	-0,0007	0,299	0,0004	-12''

В рассматриваемой композиции защита плоскости промежуточного изображения от прямой засветки осуществляется за счет введения бленд  $M$  и  $N$  (рис. 2). Установка бленды  $N$  у второго зеркала возможна за счет увеличения коэффициента центрального экранирования до значения, равного  $h_2 = \eta = 0,35$ . Размеры бленд  $N(h_N, l_N)$  и  $M(h_M, l_M)$  определяют по наиболее опасному лучу Б:

$$l_N = -d_1 \frac{\eta - h_2}{h_1 - h_2}; \quad (12)$$

$$l_M = \frac{(h_1 - 2Ky'_{1,2})(h_2 - l_N)}{\eta - y'_{1,2}2K} - d_1 + h_2. \quad (13)$$

Для оптических и конструктивных параметров, указанных выше, имеем:

$$h_N = 47,5 \text{ мм}; l_N = 46,3 \text{ мм};$$

$$h_M = 125,0 \text{ мм}; l_M = 208,5 \text{ мм}.$$

Рассмотрение прохождения постороннего света, попадающего на второе зеркало, минуя первое, а также лучей, многократно отраженных от других зеркал, показало, что для его

устранения не требуется введение дополнительных бленд.

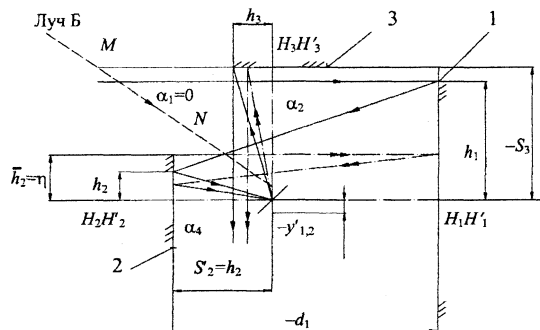


Рис. 2. Расположение бленд в композиции с третьим зеркалом, находящимся перпендикулярно оптической оси

В результате аберрационного расчета и построения диаграмм виньетирования путем проектирования оправ зеркал и бленд на плоскость входного зрачка получена афокальная система  $\Gamma = -4^\times$  с отличным качеством изображения, в которой виньетирование по площади входного зрачка для углового поля  $2\omega = 2^\circ$  порядка 20%, а центральное экранирование  $-\eta = 0,35$ . Плоскость изображения в ней защищена от постороннего света. В плоскости Гаусса пятно рассеяния имеет угловой размер около  $10''$ , но при выборе плоскости установки  $0,001$  дптр для осевой точки получим угловую аберрацию для края поля около  $5''$ .

### ВЫВОД

Рассмотренная композиция откорректирована в отношении четырех аберраций: сферической, комы, астигматизма и кривизны изображения. Поле зрения ограничено не аберрационными свойствами системы, а величиной допустимого виньетирования наклонных пучков.

Такая телескопическая система может быть применена для целей навигации, пилотажа, в приборах космического мониторинга и др.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Русинов М. М. Несферические поверхности в оптике. – М.: Недра, 1992. – С. 145–149.
2. Afocal two-mirror system // Daniil T. Puryayev. – Optical Engineering. – 1993. – Vol. 32, № 6. – P. 1325–1327.
3. Цуканова Г. И. Оптические системы телескопов с синтезированной апертурой // Оптический журнал. – 1994. – № 9. – С. 28–31.
4. Кудрина Н. К. Телескопическая трехзеркальная система // РЖ-8Д-1686. – Физика. – 1977. – № 8. – С. 1–50.
5. Чуриловский В. Н. Теория хроматизма и аберраций третьего порядка. – Л.: Наука, 1968. – 312 с.