

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. Сарака // 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.

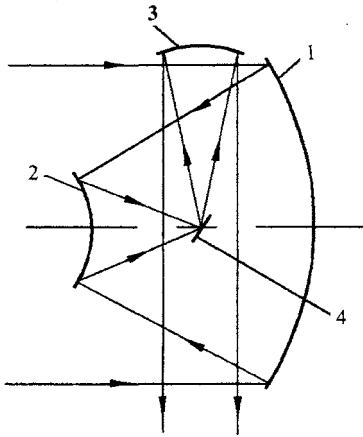


Рис. 1. Принципиальная схема афокальной анастигматической системы с промежуточным изображением между вторым и третьим зеркалами

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]):

$$h_1 = 1,0; \alpha_3 = 1,0; f'_{12} = 1,0; \alpha_1 = \alpha_4 = 0. \quad (1)$$

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 δ , определяющий положение третьего зеркала относительно вершины первого зеркала. Тогда

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

Если задано значение видимого увеличения Γ , 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 $A = D : f'_{12} = 1:K$ не может быть любым. Оно тем больше, чем меньше видимое увеличение Γ .

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 α_2

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

Максимально возможное угловое поле зрения ω 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; η – 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 ω при минимальном коэффициенте центрального экранирования η для трех вариантов телескопических систем различного видимого увеличения Γ .

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

Γ	-4^x	-6^x	-9^x
A	0,5	0,33	0,22
η	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; Δ' – 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		
		ΔD', дптр	Δ', дптр	L'_m - L'_s	Δσ'
-4 ^x	2°	-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.

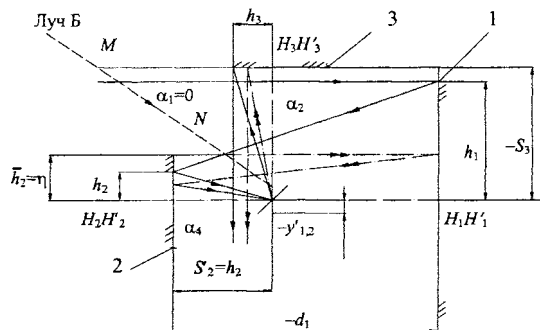


Рис. 2. Расположение бленд в композиции с третьим зеркалом, находящимся перпендикулярно оптической оси

В результате аберрационного расчета и построения диаграмм виньетирования путем проектирования оправ зеркал и бленд на плоскость входного зрачка получена афокальная система $\Gamma = -4^x$ 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. Кудряня 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.