

вался аттестованный набор светофильтров с полосой пропускания 1 нм.

На рис. 7 показаны дифракционные решетки с периодом 10 мкм (*a*, *b*), помещенные в предметных плоскостях бифокального микроскопа, и их совмещенные изображения (*в*). Использовался микрообъектив  $16\times/0,2$ , увеличение микроскопа  $200\times$ , отношение увеличений для предметных плоскостей  $\nu = 1,05$ , расстояние между предметными плоскостями 450 мкм. Линейное поле зрения составило 400 мкм.

#### ВЫВОДЫ

Экспериментально исследована бифокальная оптическая система на основе киноформной линзы. Результаты согласуются с теоретическим рассмотрением. На основе бифокальной системы экспериментально апробирован бифокальный микроскоп отражения, характеристики которого соответствуют требованиям к микроскопу совмещения установок рентгенолитографии: увеличение — до  $600\times$ ; линейное поле зрения — 300 мкм; расстояние между предметными плоскостями изменяется от 40 до 80 мкм в спектральном диапазоне 450—625 нм.

Полученные результаты и проведенные экспертные оценки позволяют сделать вывод о возможности использования микрообъективов с киноформной насадкой в стандартных микроскопах совмещения для придания им свойств двухфокусности.

Выражаем благодарность Ю. И. Юрлову за помощь и внимание к работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Котлецов Б. М. Микроизображения: оптические методы получения и контроля.— Л.: Машиностроение, 1985.
2. Заявка № 30347525 (ФРГ). Verfahren zur vergrößerung der Abbildungstiefe bei Lichtmikroskopen/G. Stumer.— Оубл. 29.04.82.
3. Заявка № 2531237 (Франция). Optique bifocale et son utilisation dans un appareil détecteur d'images vidéofréquence/Y.-A. Emmanuelli.— Оубл. 03.02.84.
4. White A. D. Simple bifocus element for microscope objective // Appl. Opt.— 1977.— V. 16, N 3.— P. 549.
5. Fuls E. N. X-ray lithography applied to the fabrication of one micrometer n-channel metal oxide semiconductor circuits // Opt. Eng.— 1983.— V. 22, N 2.— P. 199—202.
6. Слюсарев Г. Г. Расчет оптических систем.— Л.: Машиностроение, 1975.
7. Young M. Zone plates and their aberrations // JOSA.— 1972.— V. 62, N 8.— P. 972—976.
8. Креопалова Г. В., Пуряев Д. Т. Исследование и контроль оптических систем.— М.: Машиностроение, 1978.

*Поступила в редакцию 5 января 1987 г.*

УДК 535.31 : 681.777.2

**В. Н. АНОХОВСКИЙ, В. И. МОСКАЛЕНКО**

*(Новосибирск)*

#### ВНЕОСЕВОЙ ИК-КОЛЛИМАТОР

Для контроля качества оптических узлов и деталей, работающих в ИК-диапазоне, необходим коллиматор с неплоскостностью волнового фронта порядка  $\lambda/8$ . В настоящее время разработаны и подготовлены зеркальные коллиматоры с экранированием центра выходного зрачка, удовлетворяющие данным требованиям. При использовании таких коллиматоров для контроля оптических деталей, имеющих значительно меньший световой диаметр, чем выходной зрачок коллиматора, происходит существенное увеличение вторичных колец дифракционного кружка

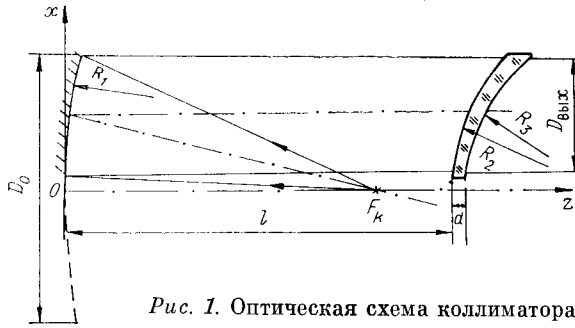


Рис. 1. Оптическая схема коллиматора

рассеяния. Это порождает необходимость в расчете и изготовлении коллиматора без экранирования центра выходного зрачка. В данной работе произведен абберационный расчет коллиматора, состоящего из сферического зеркала и корректирующего мениска (внеосевая схема Гершеля — Максудова), для диапазона длин волн  $\lambda$  от 3 до 12 мкм, а также приведены рекомендации по центровке мениска. Оценку его параметров (толщины  $d$ , радиусов кривизны  $R_2, R_3$ ) и расстояния от зеркала до мениска  $l$  можно получить, пользуясь формулами, приведенными в [1]. Световой диаметр зеркала, равный 130 мм, и фокус  $f_3 = 1040$  мм задавались исходя из конструктивных особенностей прибора. Расчет оптической схемы производился по тригонометрическим формулам с оптимизацией параметров мениска по кривизне волнового фронта. Предварительный абберационный расчет исправления сферической абберации мениском с условием его ахроматизации сделан по формуле [1].

Значение сферической абберации зеркала находим по формуле [3]

$$\Delta S'_{x_i} = \frac{x_i^2}{4R_1}, \quad (1)$$

где  $\Delta S'_{x_i}$  — продольная сферическая абберация зеркала;  $R_1 = 2f_3$  — кривизна сферического зеркала;  $x_i$  — координата по оси абсцисс (рис. 1).

Находим значение абберации для координат  $x_1 = 15$ ,  $x_2 = 75$ ,  $x_3 = 135$  мм, тогда  $\Delta S'_{x_1} = 27$ ,  $\Delta S'_{x_2} = 676$ ,  $\Delta S'_{x_3} = 2190,5$  мкм. Соответственно угловые абберации для этих лучей будут [1]

$$\eta_{x_i} = \Delta S'_{x_i} \frac{x_i}{f_3^2}. \quad (2)$$

Подставив в (2) численные значения  $x_i$  и  $\Delta S'_{x_i}$ , получим  $\eta_{x_1} = 0,037 \times 10^{-5}$ ;  $\eta_{x_2} = 4,688 \times 10^{-5}$ ;  $\eta_{x_3} = 27,34 \times 10^{-5}$  рад. Кроме исправления монохроматических аббераций мениск должен вносить минимум хроматических аббераций, т. е. быть ахроматичным.

Условие ахроматического мениска выражается соотношением [1]

$$\Delta R/d = (n^2 - 1)/n^2, \quad (3)$$

где  $\Delta R = R_2 - R_3$  — разность радиусов кривизны первой и второй поверхностей;  $n$  — показатель преломления материала мениска. В качестве материала для мениска выбираем стекло марки ИКС-25 [2], пропускающее излучение в диапазоне длин волн  $\lambda = 3-14$  мкм. Спектральная характеристика пропускания материала во всем диапазоне постоянна, поэтому при работе с таким коллиматором ее можно не учитывать. В атмосфере существуют окна прозрачности для ИК-излучения с диапазонами длин волн  $\lambda$  от 3 до 5 мкм и от 7,8 до 11,8 мкм. Рассчитаем параметры мениска для каждого диапазона и определим средние значения параметров на длинах волн от 3 до 11,8 мкм.

Полагаем

$$n_{ср 10} = \frac{n_{3,0} + n_{5,0}}{2}; \quad n_{ср 20} = \frac{n_{7,8} + n_{11,8}}{2}, \quad (4)$$

где  $n_{10}$  — показатель преломления материала на основной длине волны для первого диапазона;  $n_{20}$  — для второго диапазона;  $n_{3,0}$ ,  $n_{5,0}$ ,  $n_{7,8}$ ,

$n_{11,8}$  — показатели преломления материала на длинах волн 3,0; 5,0; 7,8 и 11,8 мкм соответственно.

Находим параметры мениска из формулы (1)

$$\eta_{x_i} = \frac{\Delta S'_{x_i} x_i}{(S'_0)^2} \simeq x_i^3 \frac{(n_{\text{ср}} + 2)(n_{\text{ср}} - 1)d \left[ \frac{(n_{\text{ср}}^2 - 1)(n_{\text{ср}} - 1)}{n_{\text{ср}}^2(n_{\text{ср}} + 2)} - \frac{\Delta R}{d} \right]}{2n_{\text{ср}} R_2^4}, \quad (5)$$

где  $d$  — толщина мениска на оптической оси.

Из (5) для обоих диапазонов получаем параметры мениска:  $d = 12$ ;  $R_2 = 563$ ;  $R_3 = 554,5$  мм.

Для более точного определения параметров коллиматора поставим оптимизационную задачу: определить расстояние между мениском и зеркалом, а также параметры  $d$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , позволяющие получить волновой фронт, наименее отклоняющийся от плоского.

Для этого выберем  $N$  лучей, отражающихся от поверхности зеркала на высотах  $x_i$ :

$$x_i = x_{\text{н}} + \frac{x_{\text{в}} - x_{\text{н}}}{N} i, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (6)$$

где  $x_{\text{н}}$  и  $x_{\text{в}}$  — высоты для нижнего и верхнего лучей.

Используя законы геометрической оптики, проследим дальнейший ход лучей в коллиматоре. Нас интересуют углы наклона лучей, вышедших из коллиматора, к оптической оси. Зная эти углы, мы можем построить поверхность волнового фронта.

Учитывая, что коллиматор обладает центральной симметрией, сведем трехмерную задачу расчета хода лучей к двумерной в цилиндрической системе координат  $r$ ,  $z$ . В плоскости, проходящей через оптическую ось и центры зеркала и мениска, координаты  $x$  и  $r$  совпадают (см. рис. 1). В плоскости  $xz(r, z)$  координаты волнового фронта вычисляются следующим образом:

$$z = z(r) = \int_{r_{\text{min}}}^r K(r) dr, \quad (7)$$

где  $r_{\text{min}} \leq r \leq r_{\text{max}}$ ,  $r_{\text{min}} = x_{\text{н}}$ ,  $r_{\text{max}} = x_{\text{в}}$ ,  $K(r)$  — тангенс угла наклона лучей к оптической оси, равный  $dz/dr$ , как следует из определения поверхности волнового фронта.

Определим величину среднеквадратичного отклонения поверхности волнового фронта от плоскости

$$W^2 = \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} [z(r) - z_0]^2 dr, \quad (8)$$

где

$$z_0 = \frac{1}{r_{\text{max}} - r_{\text{min}}} \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} z(r) dr = \text{const} \quad (9)$$

— плоскость, наименее отклоняющаяся от поверхности волнового фронта. Величина  $W$ , а также форма волнового фронта будут зависеть от параметров коллиматора, поэтому основная задача сводится к следующему: найти минимум функционала

$$J = \min_{l, R_2, R_3, d} W(l, R_2, R_3, d) \quad (10)$$

по указанным параметрам при условии, что значение

$$I = \left| \frac{\Delta R}{d} - \frac{n^2 - 1}{n^2} \right| \quad (11)$$

также минимально (аналог условия ахроматичности (3)).

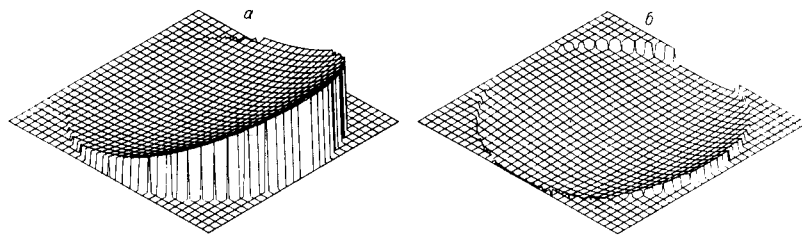


Рис. 2. Формы волновых фронтов:  
 а — идущего от зеркала к мениску (волновой фронт перед зеркалом); б — на выходе коллиматора (волновой фронт за мениском); масштаб высоты волнового фронта  $1 : 0,275 \cdot 10^{-3}$  см

При численной реализации задачи интегралы (7) — (9) вычислялись по квадратурным формулам. Начальные значения параметров для задачи (10) — (11) были взяты из предварительных расчетов (1) — (5), далее, спускаясь по градиенту ( $\text{grad } W$ ), находим полное решение задачи.

Численные расчеты для нескольких длин волн показали, что коллиматор работоспособен в указанном выше диапазоне. На рис. 2 показаны формы волновых фронтов, которые могут быть получены на выходе коллиматора рассматриваемого типа для найденных оптимальных (в указанном выше смысле) значений параметров мениска ( $d = 15,26$ ;  $R_2 = 607,5$ ;  $R_3 = 598,2$  мм). По расчетам для светового диаметра коллиматора 100 мм волновой фронт отличается от плоского менее чем на  $\lambda/8$  ( $\lambda = 5$  мкм). Необходимо отметить, что мениск с параметрами, вычисленными по формулам (1) — (5), волнового фронта не исправляет. Как отмечалось в [1], формулы (1) — (5) работоспособны только для значений  $d$  и  $\Delta R$ , которые значительно меньше  $R_1$  и  $R_2$ .

Рассмотрим теперь вопрос о методике центровки мениска коллиматора. Юстировка ИК-объективов представляет большие трудности из-за

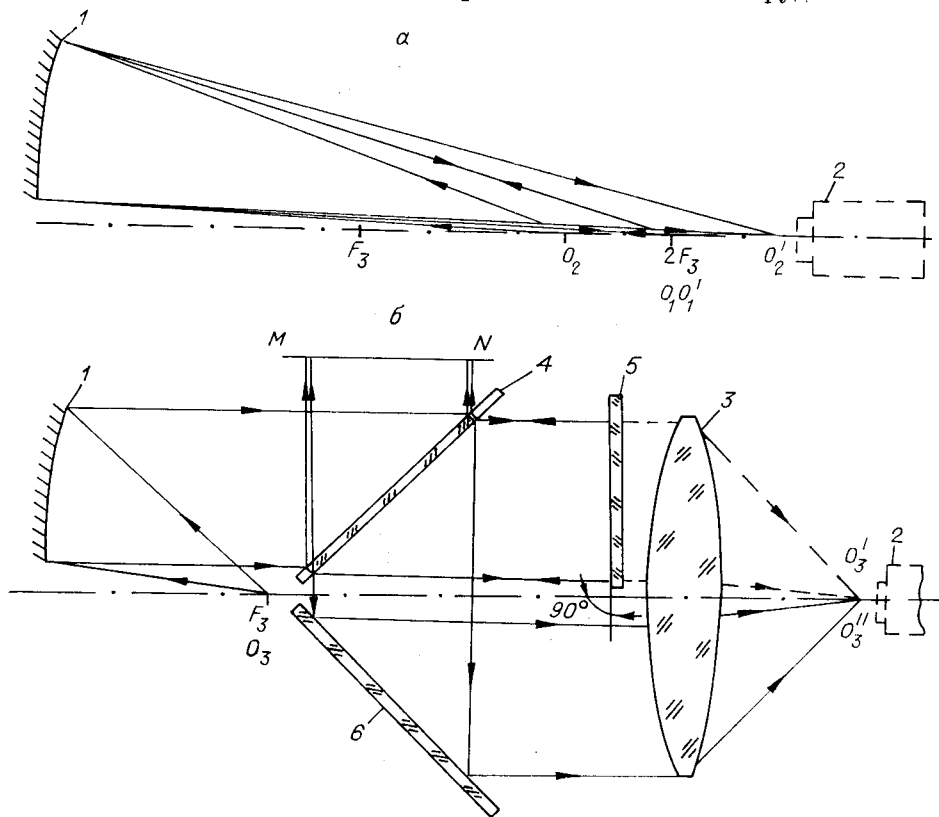


Рис. 3. Оптическая схема приспособлений для центрирования мениска

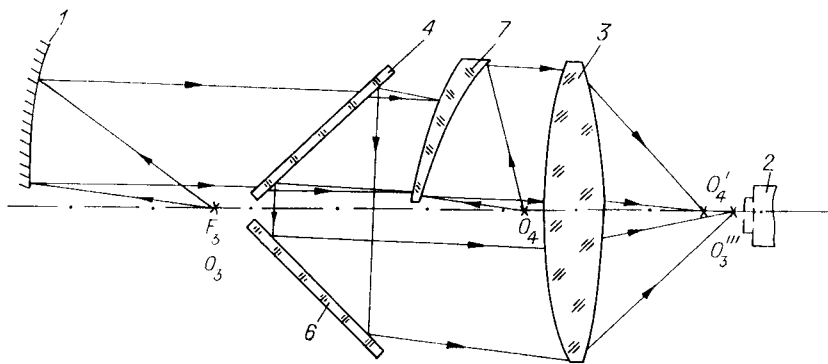


Рис. 4. Оптическая схема центрирования мениска

сложности визуализации отраженных от поверхностей бликов. В этой связи предлагается следующий способ юстировки рассматриваемого коллиматора в видимой области спектра.

Из [3, 4] известно, что оптическая система считается отцентрированной, если поверхности оптических деталей установлены таким образом, что блики, отраженные от этих поверхностей, находятся на оптической оси системы. Местоположение оптической оси зеркала 1 (рис. 3, а) коллиматора определяют автоколлимационным методом с помощью микроскопа 2, самосветящегося перекрестия  $O_1$  и его автоколлимационного изображения  $O_1'$ . Для более точного совмещения рассматривают в микроскоп расфокусированные перекрестие и его изображение, смещенные в положения  $O_2$  и  $O_2'$  соответственно вдоль оси. Устанавливают вспомогательный объектив 3 (рис. 3, б), перекрестие (или точечную диафрагму)  $O_3$  в фокальную точку  $F_3$  и получают изображение диафрагмы  $O_3'$ . Параллельность пучка проверяется по интерференционной картине в плоскости  $MN$  с помощью плоскопараллельной полупрозрачной пластины 4. Устанавливают зеркала 5 и 6. В фокусе объектива 3 получают изображение точечной диафрагмы  $O_3''$ , совпадающее с положением изображения  $O_3'$ . Вместо зеркала 5 устанавливают мениск 7 (рис. 4) и точечную диафрагму  $O_4$  в фокусе задней поверхности мениска. Получают отраженные изображения  $O_4'$  и  $O_4''$ . С помощью юстировочных винтов оправы мениска достигают совмещения видимого изображения  $O_4'$  с оптической осью коллиматора, а наклоном и смещением мениска перпендикулярно оптической оси добиваются того, чтобы изображения  $O_4'$  и  $O_4''$  заняли ближайшее положение к оптической оси и находились на одинаковом расстоянии.

На основании выполненных расчетов можно утверждать следующее. Коллиматор, необходимый для контроля качества оптических деталей и узлов, работающих в диапазоне длин волн 3–14 мкм, может быть построен по схеме Гершеля — Максудова. При использовании дифракционно-ограниченного зеркала диаметром 100 мм с фокусом, равным 1040 мм, и рассчитанного мениска, изготовленного из материала ИКС-25, можно получать волновые фронты с неплоскостностью менее  $\lambda/5$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Максудов Д. Д. *Астрономическая оптика*. — М.: Наука, 1979.
2. ОСТ 3-3441-83. *Стекло оптическое бескислородное. Технические условия*. — Введ. 01.07.84.
3. Сулим А. В. *Производство оптических деталей*. — М.: Высш. шк., 1975.
4. А. с. 1109706 (СССР). *Способ центровки оптических элементов и их блоков*/ Я. Б. Дыскин, В. Ф. Морсков, А. И. Кириллов, А. Ф. Наумов. — Оpubл. в БИ, 1984, № 31.

Поступила в редакцию 12 мая 1986 г.