

8. Левинзон А. М., Королькова Н. М. Покрытие для интегрирующих сфер спектрофотометрических приборов. // ОМП. – 1974. - №4. С. 33-38.
9. Weidner V. R., Hsia J. J. Reflection properties of press polytetrafluorethylene powder. // J. Opt. Soc. of Amer. 1981. – 71. – p.856-861.

Міхеєнко Л. А., Гордієнко Ю. О. Дослідження точності дифузного випромінювача на основі інтегруючої сфери. В роботі представлений теоретичний аналіз точності дифузного випромінювача на основі інтегруючої сфери, а також розроблена методика розрахунку точності при зміні конструктивних параметрів інтегруючої сфери. Приведені рекомендації по конструюванню установки дифузного випромінювача для забезпечення необхідної рівномірності яскравості у вихідній апертурі.	Miheenko L. A., Gordienko Y. A. Researching of accuracy of the diffusive light source based on an integration sphere. The paper represents the theoretical analysis of accuracy of the diffusive light source based on an integration sphere. Also there were developed the principles of calculation of accuracy dealt with the change of constructive parameters of an integration sphere. There were given the recommendations dealt with the designing of the diffusive light source in order to provide the necessary uniformity of brightness in output aperture.
---	--

*Надійшла до редакції
25 липня 2007 року*

УДК 535.317.6

КОМПАКТНЫЕ СИСТЕМЫ С ЧЕТЫРЬМЯ ОТРАЖЕНИЯМИ ОТ ЗЕРКАЛ

*Артюхина Н.К., Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь*

Рассмотрены компактные зеркальные системы с четырьмя отражениями. Представлены варианты объективов, в которых исправлены основные aberrации. Такие системы могут использоваться в астрономических, фотометрических и оптических приборах, работающих в инфракрасном и ультрафиолетовом диапазоне длин волн.

Введение. Схемные решения

Зеркальные системы широко используются в различных областях оптического приборостроения, что связано с возможностью их работы в широком спектральном диапазоне [1, 2]. В настоящее время исследования в области зеркальной оптики связаны с поиском схем, обладающих повышенными оптическими характеристиками и большими коррекционными возможностями.

Одно из актуальных направлений этих исследований – разработка компактных зеркальных систем с четырьмя отражениями.

К первой группе таких систем можно отнести схемы, состоящие из четырех зеркал с попарно совмещенными вершинами нечетных и четных поверхностей. На рис.1 представлены: а) объектив Корша [3] и б) система на основе зафокальной композиции [4]. Оба объектива состоят из четырех асферических зеркал различного профиля и исправлены в отношении четырех aberrаций – сферической aberrации, комы, астигматизма и дисторсии.

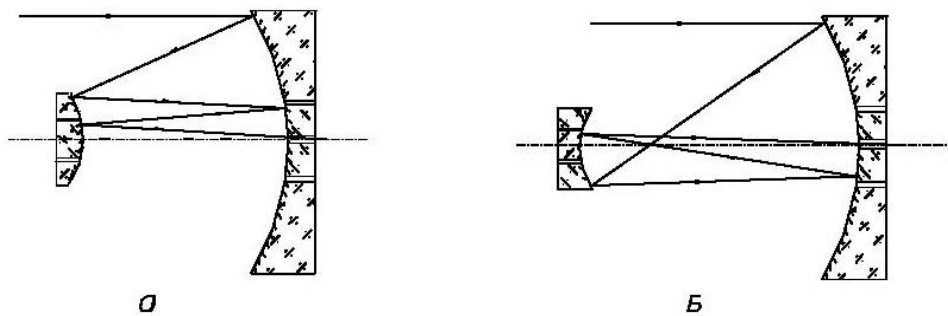


Рис.1. Объективы с попарно совмещенными вершинами четырех зеркал

Системы отличаются простотой конструктивного решения и являются более технологичными, чем четырехзеркальные схемы с разнесенными вершинами зеркальных поверхностей, в которых дополнительное крепление зеркал приводит к увеличению центрального экранирования.

Ко второй группе можно отнести трехзеркальные системы с двойным отражением от главного зеркала. На рис. 2 показаны системы Цукановой Г.И. [5], исправленные в отношении четырех аберраций и состоящие из зафокального объектива и дополнительного малого зеркала.

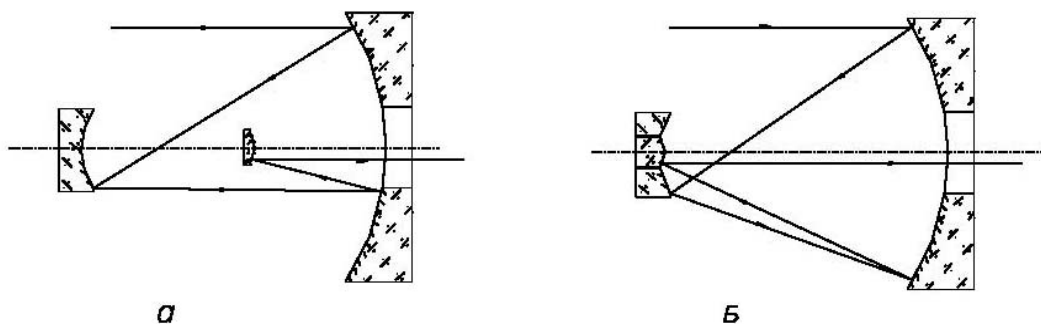


Рис.2. Трехзеркальные объективы с двойным отражением от главного зеркала

Новой группой компактных зеркальных систем с четырьмя отражениями являются объективы с двойным отражением от каждого из зеркал. Автором были исследованы и рассчитаны системы [6, 7, 8], в которых диаметр второго зеркала принципиально больше диаметра входного зрачка. В своей конструкции такие зеркальные объективы используют обратную классическую систему Кассегрена, в которой размер вторичного зеркала превышает по размеру главное.

Объектив (рис. 3,а) состоит из двух сферических, концентрически расположенных зеркал [6], и обеспечивает значительно меньшие габариты по сравнению с известной системой Боуэна. Схема (рис. 3,б) позволяет уменьшить осевую длину в два раза по сравнению с системой [6], но из-за нарушения условия концентричности коррекционные возможности здесь ниже. В таких системах,

содержащих зеркальные поверхности любой формы, значения деформаций зеркал возрастают с уменьшением коэффициента экранирования, причем существуют два ряда решений, отличающихся принципиально.

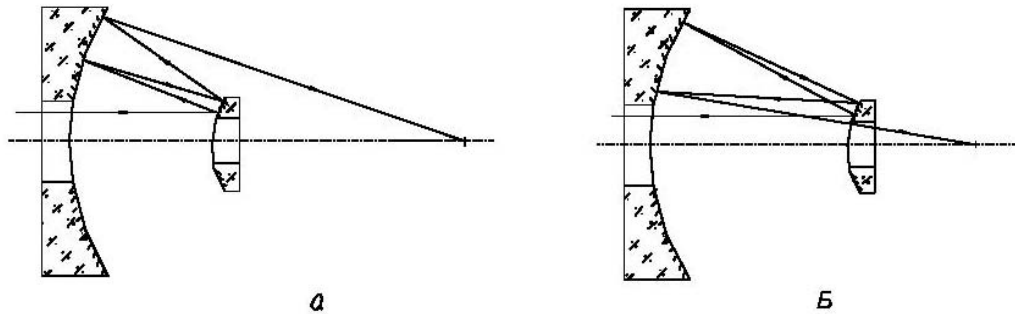


Рис.3. Двухзеркальные объективы с двойным отражением от зеркал

Первое характеризуется тем, что изображение располагается недалеко от первого зеркала, квадраты эксцентриситетов поверхностей принимают отрицательные значения, а расстояние между зеркалами более чем в 1,4 раза превышает фокусное расстояние системы. Во втором — изображение вынесено за пределы системы, квадраты эксцентриситетов меридиональных кривых положительны, а расстояние между зеркалами остается практически постоянным и равным около $0,82 f'$. Рассчитанные системы из двух сферических зеркал [7, 8], имеющие фокусное расстояние $f' = 200$ мм, относительное отверстие $D/f' = 1:4$, угловое поле $2\omega = 6^\circ$, обладают хорошим качеством изображения и представляют практический интерес.

Описание и расчет объектива с четырьмя отражениями

В настоящей работе проводится дальнейшее исследование зеркальных анастигматов с четырьмя отражениями от первого и второго зеркал. На рис.4 показан объектив, состоящий из вогнутого 1 и выпуклого 2 зеркал, оптическая схема которого обеспечивает процесс повторного отражения пучка световых лучей от зеркальных поверхностей. Такая система использует классическую схему Кассегрена, в которой размер первого зеркала определяется диаметром входного зрачка.

Формирование изображения происходит следующим образом: световые лучи параллельным пучком падают на отражающую поверхность зеркала 1, отразившись от которой световой пучок претерпевает второе отражение от зеркальной поверхности 2. Далее, снова отразившись последовательно от зеркал 1 и 2, лучи проходят сквозь центральное отверстие 3 в зеркале 1 и формируют изображение в фокальной плоскости объектива.

Конструктивные параметры зеркал рассматриваемого объектива связаны следующими соотношениями:

$$r_1 = r_3; \quad r_2 = r_4; \quad d = -d_1 = d_2 = -d_3. \quad (1)$$

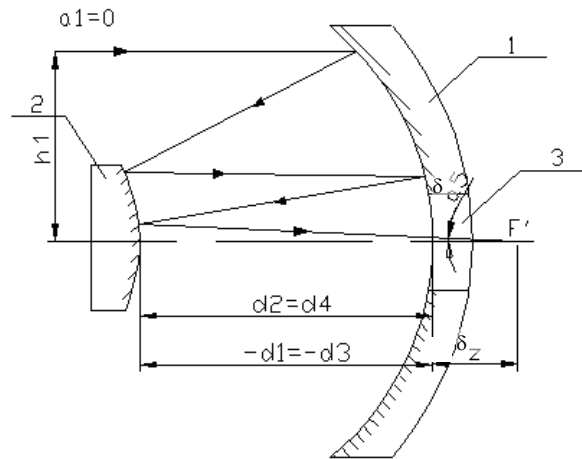


Рис.4. Оптическая схема объектива с четырьмя отражениями

Расчет объектива проводился по методике расчета зеркальных систем, изложенной в работе [9], где даны все обозначения для четырех отражений от зеркал, с учетом уравнений, связывающих коэффициенты Зейделя с конструктивными параметрами оптической системы [10] и с использованием программного пакета MathCAD 2003.

На первом этапе расчета вводили условия масштаба

$$\alpha_1 = 0; \quad \alpha_5 = 1; \quad h_1 = 1,0; \quad f' = 1,0 \quad (2)$$

и определяли тангенсы углов с оптической осью α_s и высоты нулевого (параксиального) луча $h_s = h_{s+1} + \alpha_{s+1} d_s$, необходимые для определения значений радиусов зеркальных поверхностей r_s , которые выражаются формулами

$$r_1 = \frac{2}{\alpha_2}; \quad r_2 = \frac{2h_2}{\alpha_2 + \alpha_3}; \quad r_3 = \frac{2h_3}{\alpha_3 + \alpha_4}; \quad r_4 = \frac{2h_4}{\alpha_4 + 1}; \quad (3)$$

а также осевых расстояний d_s между зеркалами

$$d_1 = \frac{1 - h_2}{\alpha_2}; \quad d_2 = \frac{h_2 - h_3}{\alpha_3}; \quad d_3 = \frac{h_3 - h_4}{\alpha_4}. \quad (4)$$

Для конструктивных характеристик объективов с четырьмя отражениями дополнительно использовали ранее полученное выражение [11]:

$$d_1^2 - d_1(2\delta + \eta + 1) + (1 + \delta)(\delta - \eta^2) = 0, \quad (5)$$

где d_1 - расстояние, прошедшее лучом света после первого отражения до второго зеркала; δ - расстояние, определяющее вынос плоскости изображения; η - коэффициент центрального экранирования системы, который в процессе расчета необходимо стремиться минимизировать.

Центральное экранирование для рассчитываемой системы, определяли из выражения:

$$\eta = \frac{h_2}{h_1} = 1 + \alpha_2 d \quad (6)$$

На втором этапе выполняли абберрационный расчет. Для зеркальной оптики хроматические коэффициенты Зейделя равны нулю, а монохроматические значительно упрощаются в связи с тем, что $\nu_s = \frac{1}{n_s} = (-1)^{s+1}$.

Расчет параметров рассматриваемого зеркального объектива сводился к решению системы из пяти уравнений, содержащей шесть неизвестных: $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, d, \sigma_1, \sigma_2$. В уравнениях, определяющих устранение сферической абберации, комы и астигматизма III порядка, соответствующие коэффициенты Зейделя B_0, K_0, C_0 приравнивали к нулю и дополнительно использовали выражения (1-4).

В рассматриваемой системе деформации поверхностей σ_s одинаковы для четных и нечетных поверхностей, к тому же эти коррекционные параметры равны и противоположны по знаку квадрату эксцентриситета меридиональной кривой второго порядка, т.е. $\sigma_{1,2} = -e_{1,2}^2$.

Окончательную подстановку и запись системы уравнений, связывающих коэффициенты аббераций третьего порядка с конструктивными параметрами оптической системы, осуществили в среде MathCad:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{s=1}^m h_s \cdot Q_s = 0 \\ -\frac{1}{2} \sum_{s=1}^m W_s + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^m h_s \cdot S_s \cdot Q_s = 0 \\ \frac{1}{2} \sum_{s=1}^m \frac{\nu_{s+1} \alpha_{s+1} - \nu_s \alpha_s}{h_s} - \sum_{s=1}^m S_s W_s + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^m h_s \cdot S_s^2 \cdot Q_s = 0 \\ \alpha_3 + \alpha_4 = \alpha_2 (1 + (\alpha_2 - \alpha_3) d); \\ (1 + \alpha_2 d)(1 + \alpha_4) = (\alpha_2 + \alpha_3)(1 + (\alpha_2 - \alpha_3 + \alpha_4) d); \\ \sigma_2 = \sigma_4. \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (7) \\ \\ \\ \sigma_1 = \sigma_3; \end{array}$$

Вспомогательные величины W_s, S_s, P_s, T_s, Q_s для каждого отражения представлены в табл. 1, причем $Q_s = T_s \sigma_s + P_s$. Система абберационных и конструктивных уравнений, содержащая шесть неизвестных (7), имела несколько решений.

Закономерности получаемых решений и выбор из них наиболее подходящих вариантов осуществляли путем подстановки в исходную систему дополнительных условий, оформленных в виде неравенств. Наиболее важными из них считали минимизацию коэффициента центрального экранирования системы и технологичность зеркальных поверхностей, определяемую величинами квадратов эксцентриситета асферических поверхностей.

Таблица - Вспомогательные абберационные величины

	Первая поверхность	Вторая поверхность	Третья поверхность	Четвертая поверхность

W	$\frac{\alpha_2^2}{2}$	$\frac{\alpha_3 - \alpha_2}{2}(\alpha_3 + \alpha_2)$	$\frac{\alpha_4 - \alpha_3}{2}(\alpha_4 + \alpha_3)$	$\frac{1 - \alpha_4}{2}(1 + \alpha_4)$
S	0	$\frac{d}{1 - \alpha_2 d}$	$\frac{d}{1 - \alpha_2 d} + \frac{d}{(1 - \alpha_2 d)(1 - \alpha_2 d + \alpha_3 d)}$	$\frac{\frac{d}{1 - \alpha_2 d} + \frac{d}{(1 - \alpha_2 d)(1 - \alpha_2 d + \alpha_3 d)} + \frac{d}{(1 - \alpha_2 d + \alpha_3 d)(1 - \alpha_2 d + \alpha_3 d - \alpha_4 d)}}{d}$
P	$-\frac{\alpha_2^3}{4}$	$\frac{(\alpha_3 - \alpha_2)^2}{4}(\alpha_3 + \alpha_2)$	$-\frac{(\alpha_4 - \alpha_3)^2}{4}(\alpha_4 + \alpha_3)$	$\frac{(1 - \alpha_4)^2}{4}(1 + \alpha_4)$
T	$-\frac{\alpha_2^3}{4}$	$\frac{(\alpha_3 + \alpha_2)^3}{4}$	$-\frac{(\alpha_4 + \alpha_3)^3}{4}$	$\frac{(1 + \alpha_4)^3}{4}$
Q	$-\frac{\alpha_2^3}{4} \cdot (1 + \sigma_1)$	$\frac{\alpha_3 + \alpha_4}{-4}((\alpha_3 + \alpha_4)^2 \sigma_1 + (\alpha_4 - \alpha_3)^2)$	$\frac{\alpha_3 + \alpha_4}{-4}((\alpha_3 + \alpha_4)^2 \sigma_1 + (\alpha_4 - \alpha_3)^2)$	$\frac{1 + \alpha_4}{4}((1 + \alpha_4)^2 \sigma_2 + (1 - \alpha_4)^2)$

Поиск решения осуществляли с помощью вычислительного программного пакета MathCAD 2003 для ряда заданных коэффициентов экранирования в соответствии с уравнением (6). При этом произвели необходимые упрощения и учитывали, что при больших абсолютных значениях деформаций асферических поверхностей всегда сказываются aberrации высших порядков, поэтому поверхности зеркал становятся нетехнологичными. Базовыми вариантами для дальнейшей оптимизации были приняты зеркальные схемы с наименьшей асферичностью поверхностей.

Обсуждение результатов

В ходе анализа вычислений для разных коэффициентов экранирования получено, что рассчитанные варианты существуют только при коэффициентах экранирования по площади от 10% до 30%. С ростом коэффициента экранирования резко возрастает деформация второго зеркала, что приводит к росту aberrаций высших порядков и вызывает трудность в изготовлении поверхности зеркала 2. Базовым вариантом была выбрана система с центральным экранированием $\eta = 0,35$, имеющая следующие приведенные значения: $r_1 = -1.0675$, $r_2 = -0.4651$; $h_1 = 1$, $h_2 = 0,35$, $h_3 = 0,2222$, $h_4 = 0,1250$; $d = 0,3469$. Объектив исправлен в области aberrаций третьего порядка на сферическую aberrацию, меридиональную кому и астигматизм. Aberrации высших порядков невелики из-за малой асферичности зеркал. В одном из рассчитанных вариантов объектива с техническими характеристиками: $f' = 4000\text{мм}$, $D/f' = 1:10$, $2\omega = 1^\circ 00'$ формы неасферических поверхностей первого и второго зеркал определены следующими уравнениями: $y^2 + z^2 = -3732,4x - 0,0026x^2$; $y^2 + z^2 = -1855,2x + 0,3973x^2$.

Рассчитанный объектив имеет очень высокое разрешение в центральной зоне: кружок рассеяния для осевой точки изображения составляет величину по-

рядка 0,015 мм. Максимальная величина волновой aberrации составляет величину $N = -0,18\lambda$.

Геометрическая частотно-контрастная характеристика объектива на рис. 5 приведена в виде графиков пучков (осевого и нормированных внеосевых). Снижение частотно-контрастной характеристики по мере увеличения поля зрения происходит из-за центрального экранирования и виньетирования внеосевых пучков.

Выводы

Рассчитанные варианты объективов отличаются простотой и технологичностью конструкции. Использование двойного отражения от каждого из зеркал позволяет значительно уменьшить продольные и поперечные габариты системы, а также дает возможность выноса плоскости изображения за пределы оптической системы.

Отсутствие хроматических aberrаций, малые остаточные aberrации и приемлемые условия для размещения приемной аппаратуры в рассчитанной зеркальной системе открывают хорошие возможности по ее промышленной адаптации. Результаты расчетов и полученные формулы могут быть использованы при проектировании новых зеркальных систем, используемых в оптических приборах, работающих в УФ и ИК областях спектра.

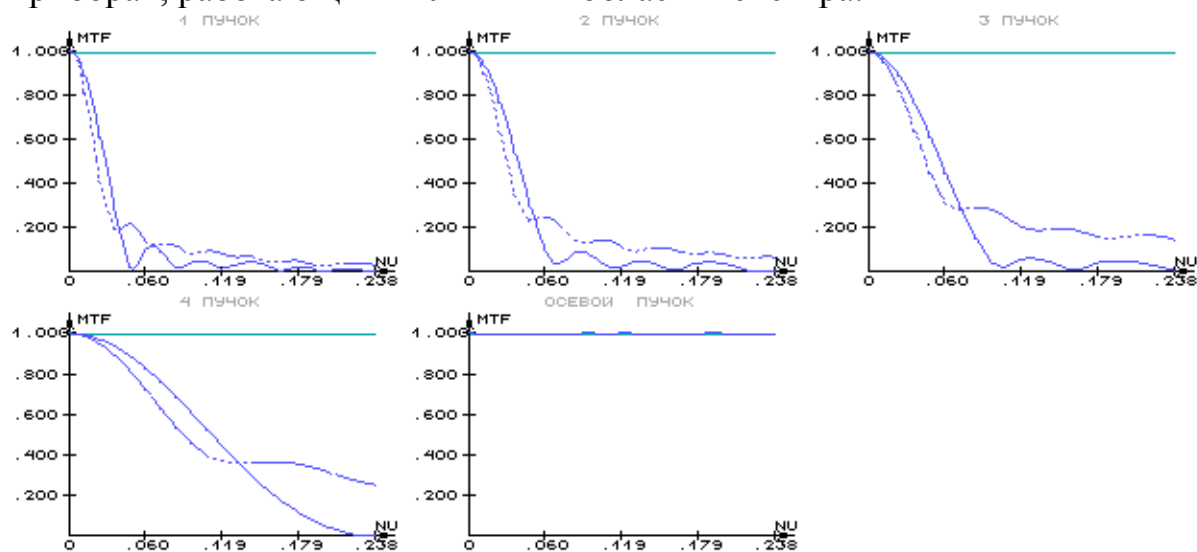


Рис.5. Геометрическая ЧКХ

Литература

1. W. J. Smith. Modern Optical Engineering, the Design of Optical Systems. - McGraw-Hill, New York, 2000. - 604 с.
2. Запрягаева Л.А., Свешникова И.С. Расчет и проектирование оптических систем. - М.: Логос, 2000. - 580 с.
3. Korch Dietrich. Two well-corrected four-mirror telescopes. // Applied Optics. - 1974, v. 13, №8. - P. 1767.
4. Гашкин И.С., Янушко Н.М. Зеркальный объектив. // Авторское свидетельство СССР на изобретение № 648931, 1979.
5. Цуканова Г.И. Оптические системы телескопов с синтезированной апертурой. // Оптический журнал. - 1994, №9, С.28-31.

6. Артюхина Н.К., Константинов Д.В. Зеркальный объектив с четырьмя отражениями. // Патент РФ на изобретение № 4111, 2001.
7. Артюхина Н.К., Богатко А.В., Толстик Н.А. «Зеркальный объектив» //Патент РФ на изобретение № 9022, 2006.
8. Артюхина Н.К. Система из двух сферических зеркал с двойным отражением. //Оптический журнал. – 2005, т.72, №10. С.57 -59.
9. Чуриловский В.Н. Теория хроматизма и аберраций третьего порядка. Л.: Наука, 1968–312с.
10. Артюхина Н.К. Расчет деформаций несферических поверхностей в четырехзеркальных системах. //Доклады НАН РФ. - 2006, т.50, №3. С.102-105.
11. Артюхина Н.К., Шкадаревич А.П. Корректированные зеркальные системы с двойным отражением.//Журнал прикладной спектроскопии. - 2007, т.74, №2. С. 267 – 270.

Артюхина Н.К. Компактні системи з чотирма відбиттями від дзеркал. Розглянуто компактні дзеркальні системи з чотирма відбиттями. Наведені варіанти об'єктивів, у яких виправлені основні аберрації. Такі системи можуть використовуватися в астрономічних, фотометричних та оптичних приладах, які працюють в інфрачервоному та ультрафіолетовому діапазоні довжин хвиль.	Artioukhina N.K. The compact systems with four mirror reflections. It is examined the compact mirror systems with four reflections. Some variants of calculation in which there are no main aberrations are considered. Such objectives are useful for space astronomy, photometry and optical devices using UV and IR spectral range in research.
--	--

*Надійшла до редакції
15 вересня 2007 року*

УДК 535.24 : 628.9

ШИРОКОДИАПАЗОННЫЙ ОСЛАБИТЕЛЬ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Михеенко Л.А., Шишкин В.А., Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина.

Предложена схема ослабителя на базе интегрирующих сфер для калибровки и испытания широкодиапазонного фотометрического оборудования. Разработаны инженерная методика и рекомендации по выбору основных элементов конструкции.

Введение

Ослабители оптического излучения находят широкое применение в измерительной фотометрии, оптической метрологии, научных исследованиях [1]. Основными требованиями, предъявляемыми к ослабителям являются максимально большой диапазон коэффициента ослабления τ_0 , высокая точность его определения расчетным путем, низкая неравномерность изменения τ_0 по апертуре, малая спектральная селективность, приемлемые для измерительной аппаратуры габариты [1,2]. Одновременное выполнение перечисленных требований является сложной научно-технической задачей. В частности до настоящего времени не удалось получить диапазон изменения τ_0 более чем 10^5 при неравномерности пропускания по апертуре менее 1% и неизменной спектральной характеристике. нерешенной является также задача увеличения апертуры ослабителя более 40 ... 60 мм для широкодиапазонных устройств. Значительными являются также и габариты ослабителя, особенно для величин τ_0 более 10^{-5} .