

УДК 535.31:535.317

К развитию методов расчета оптических систем

В. А. Семин

Федеральное государственное унитарное предприятие «НПО "Государственный институт прикладной оптики"», г. Казань, Россия

Получено условие точечной фокусировки широкого некогерентного пучка лучей в спектральном диапазоне, в пределах которого зависимости показателей преломления от длины волны $n(\lambda)$ применяемых оптических материалов можно считать линейными. Показано применение полученного условия для ахроматизации светосильных оптических систем путем асферизации поверхностей линз.

Важнейшей (после фотоприемника) составной частью оптико-электронных приборов является оптическая система. Линзовые оптические системы более компактны и имеют большие коррекционные возможности по сравнению с зеркальными, но наличие дисперсии материалов приводит к по-

явлению хроматических aberrаций. Создание линзовых оптических систем, ахроматизированных в широкой области спектра, является актуальной научно-технической задачей. Полученный в данной работе результат позволяет решать эту задачу путем применения асферических поверхностей.

$$dW = dW_0 + dW_1 + \dots + dW_m,$$

где $dW_0 = (\partial W_0 / \partial n_1) dn_1 + (\partial W_0 / \partial n_2) dn_2 + \dots + (\partial W_0 / \partial n_{m+1}) dn_{m+1}$;

$$dW_m = (\partial W_m / \partial n_1) dn_1 + (\partial W_m / \partial n_2) dn_2 + \dots + (\partial W_m / \partial n_{m+1}) dn_{m+1}.$$

В свою очередь

$$\partial W_0 / \partial n_1 = n_1 \frac{(z_1 - z_0) + (y_1 - y_0) y'_1}{\tilde{d}_0} (\partial z_1 / \partial n_1) + \tilde{d}_0;$$

$$\partial W_0 / \partial n_{m+1} = n_1 \frac{(z_1 - z_0) + (y_1 - y_0) y'_1}{\tilde{d}_0} (\partial z_1 / \partial n_{m+1});$$

$$\partial W_1 / \partial n_1 = n_2 \frac{(z_2 - z_1) (\partial z_2 / \partial n_1 - \partial z_1 / \partial n_1) + (y_2 - y_1) [y'_2 (\partial z_2 / \partial n_1) - y'_1 (\partial z_1 / \partial n_1)]}{\tilde{d}_1};$$

$$\partial W_1 / \partial n_2 = n_2 \frac{(z_2 - z_1) (\partial z_2 / \partial n_2 - \partial z_1 / \partial n_2) + (y_2 - y_1) [y'_2 (\partial z_2 / \partial n_2) - y'_1 (\partial z_1 / \partial n_2)]}{\tilde{d}_1} + \tilde{d}_1;$$

$$\partial W_1 / \partial n_{m+1} = n_2 \frac{(z_2 - z_1) (\partial z_2 / \partial n_{m+1} - \partial z_1 / \partial n_{m+1}) + (y_2 - y_1) [y'_2 (\partial z_2 / \partial n_{m+1}) - y'_1 (\partial z_1 / \partial n_{m+1})]}{\tilde{d}_1};$$

$$\partial W_m / \partial n_1 = -n_{m+1} \frac{(z_{m+1} - z_m) + (y_{m+1} - y_m) y'_m}{\tilde{d}_m} (\partial z_m / \partial n_1);$$

$$\partial W_m / \partial n_{m+1} = -n_{m+1} \frac{(z_{m+1} - z_m) + (y_{m+1} - y_m) y'_m}{\tilde{d}_m} (\partial z_m / \partial n_{m+1}) + \tilde{d}_m,$$

где $y'_k = dy_k / dz_k$.

Группируя слагаемые, получим выражение для полного приращения оптического пути в виде

$$\begin{aligned} dW = & \tilde{d}_0 dn_1 + \tilde{d}_1 dn_2 + \dots + \tilde{d}_m dn_{m+1} + \\ & + \left[n_1 \frac{(z_1 - z_0) + (y_1 - y_0) y'_1}{\tilde{d}_0} - n_2 \frac{(z_2 - z_1) + (y_2 - y_1) y'_1}{\tilde{d}_1} \right] (\partial z_1 / \partial n_1) dn_1 + \dots + \\ & + \left[n_1 \frac{(z_1 - z_0) + (y_1 - y_0) y'_1}{\tilde{d}_0} - n_2 \frac{(z_2 - z_1) + (y_2 - y_1) y'_1}{\tilde{d}_1} \right] (\partial z_1 / \partial n_{m+1}) dn_{m+1} + \\ & + \left[n_2 \frac{(z_2 - z_1) + (y_2 - y_1) y'_2}{\tilde{d}_1} - n_3 \frac{(z_3 - z_2) + (y_3 - y_2) y'_2}{\tilde{d}_2} \right] (\partial z_2 / \partial n_1) dn_1 + \dots + \\ & + \left[n_2 \frac{(z_2 - z_1) + (y_2 - y_1) y'_2}{\tilde{d}_1} - n_3 \frac{(z_3 - z_2) + (y_3 - y_2) y'_2}{\tilde{d}_2} \right] (\partial z_2 / \partial n_{m+1}) dn_{m+1} + \dots + \\ & + \left[n_m \frac{(z_m - z_{m-1}) + (y_m - y_{m-1}) y'_m}{\tilde{d}_{m-1}} - n_{m+1} \frac{(z_{m+1} - z_m) + (y_{m+1} - y_m) y'_m}{\tilde{d}_m} \right] (\partial z_m / \partial n_1) dn_1 + \dots + \\ & + \left[n_m \frac{(z_m - z_{m-1}) + (y_m - y_{m-1}) y'_m}{\tilde{d}_{m-1}} - n_{m+1} \frac{(z_{m+1} - z_m) + (y_{m+1} - y_m) y'_m}{\tilde{d}_m} \right] (\partial z_m / \partial n_{m+1}) dn_{m+1}. \end{aligned}$$

Если система преломляющих поверхностей изображает без aberrаций точку *A* на длине волны λ , то это значит, что выполняются все равенства системы (2); тогда все выражения в квадратных скобках последней формулы равны нулю, и приращение оптического пути приобретает простой вид

$$dW = \tilde{d}_0 dn_1 + \tilde{d}_1 dn_2 + \dots + \tilde{d}_m dn_{m+1} = \text{const} \quad (3)$$

(для безабберационного изображения точки на длине волны $\lambda + d\lambda$ оптические пути для всех лучей и на этой длине волны тоже должны быть одинаковы, следовательно, приращение оптического пути должно быть постоянной величиной).

Условие (3) — это условие ахроматизации. Оно получено в предположении, что выполняется условие (1), и дополняет его. Совместное выполнение равенств (1) и (3) означает, что пучок света будет сфокусирован в точку не только на длине волны λ , но и на всех длинах волн в прилегающем спектральном диапазоне, строго говоря, бесконечно малом, но при практическом применении формул дифференциалы dn_1, \dots, dn_{m+1} можно отождествить с конечными приращениями показателей преломления, если зависимости $n_1(\lambda) \dots n_{m+1}(\lambda)$ для оптических сред в пределах рассматриваемого спектрального диапазона не сильно отличаются от линейных

$$\Delta W = \tilde{d}_0 \Delta n_1 + \tilde{d}_1 \Delta n_2 + \dots + \tilde{d}_m \Delta n_{m+1} = \text{const.} \quad (4)$$

Порядок практического применения формулы (4) точно такой же, как и формулы (1). Если в оптической системе есть хотя бы один луч, для которого значение константы может быть заранее вычислено (обычно это оптическая ось), то выражение (4), составленное для произвольного луча, приравнивается этому значению. В результате получается уравнение, связывающее координаты всех поверхностей условием ахроматиза-

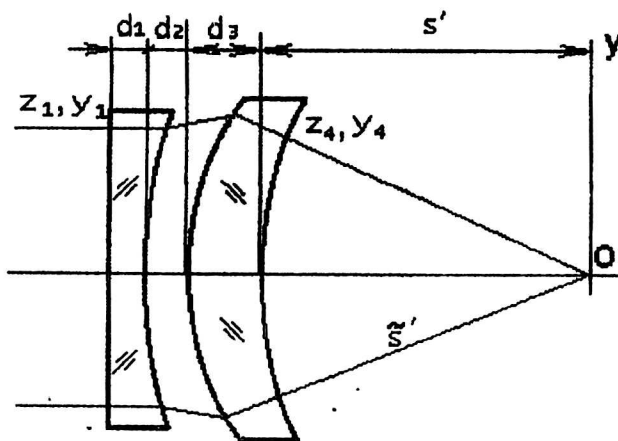
ции и позволяющее рассчитывать поверхности, реализующие это условие.

В одиночной положительной линзе условие (4) выполняться не может, поэтому создание линзовой оптической системы с действительным изображением, ахроматизированной в соответствии с условием (4), возможно как минимум на двух линзах — одной положительной и одной отрицательной.

Для разработки приборов дистанционного действия в инфракрасной области спектра наибольший интерес представляют два спектральных диапазона: 3—5 и 8—12 мкм (окна прозрачности атмосферы). Расчет линзовой оптики, эффективно работающей одновременно в двух этих диапазонах, является особенно актуальным.

Для расчета ахроматического двухлинзового объектива в качестве положительной линзы применены бескислородное стекло ИКС-34, в качестве отрицательной — керамика ПО-4 (соединение цинка и селена) (рис. 2). Первая поверхность в этом объективе плоская, а последняя сферическая; вторая и третья поверхности вычислялись, обеспечивая выполнение условий (1) и (4). Расчет поверхностей проводили по методике, изложенной выше в работе В. А. Семина. Система уравнений для схемы на рис. 2 имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{z_4 - y_4 y_4'}{\sqrt{z_4^2 + y_4^2}} &= n_4 \frac{(z_4 - z_3) + (y_4 - y_3) y_4'}{\sqrt{(z_4 - z_3)^2 + (y_4 - y_3)^2}}; \\ z_1 + \tilde{d}_1 n_2 + \tilde{d}_2 + \tilde{d}_3 n_4 + \tilde{s}' &= (n_2 - 1) d_1 + (n_4 - 1) d_3; \\ \tilde{d}_2 + n_2 \tilde{d}_1 &= \sqrt{(z_3 - z_{02})^2 + (y_3 - y_{02})^2} + \\ &+ n_2 \sqrt{(z_{02} - z_1)^2 + (y_{02} - y_1)^2}; \\ \tilde{d}_1 \Delta n_2 + \tilde{d}_3 \Delta n_4 &= d_1 \Delta n_2 + d_3 \Delta n_4. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$



r	d	\bar{n}
		1
0	5	2.4199
13.6433*	5	1
18.3908*	10	2.601875
-50		1

* - асферические поверхности

Рис. 2. Двухлинзовый ахроматический объектив

Эта система получена на основе системы уравнений (2), модифицированной так, как описано выше, и дополненной условием ахроматизации (4). Здесь z_{02} , y_{02} — начальные условия для второй поверхности. Для плоской поверхности $z_1 = \text{const}$. За независимую переменную принималась координата y_4 . Система уравнений решалась относительно координат z_2, y_2, z_3, y_3 как неизвестных.

Показатели преломления и частные дисперсии, которые фигурируют в системе уравнений (5), ввиду явной нелинейности характеристик $n(\lambda)$ материалов в пределах широкого спектрального диапазона задавались следующим образом. Для каждого материала показатель преломления брался как среднеарифметическое показателей преломления на длинах волн $\lambda = 4$ и 10 мкм (середины диапазонов 3–5 и 8–12 мкм), а частные дисперсии — как их разность (рис. 3). Таким образом, было определено:

$$n_2 = 2,4199; n_4 = 2,601875;$$

$$\Delta n_2 = 0,0264; \Delta n_4 = 0,01555.$$

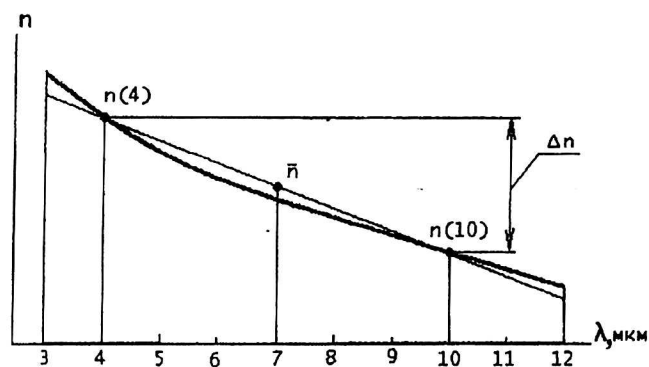


Рис. 3. Показатель преломления \bar{n} и частная дисперсия Δn в диапазоне 3–12 мкм как исходные данные для ахроматизации

При таком задании оптических величин в рассчитанном объективе осевой хроматизм на длинах волн 4 и 10 мкм должен отсутствовать полностью, а в остальных точках диапазона 3–12 мкм он будет определяться отступлением реальных характеристик $n(\lambda)$ каждого материала от линейных, с которыми они пересекаются в точках $\lambda = 4$ и $\lambda = 10$ мкм. Конструктивные элементы объектива (см. рис. 2) следующие: $d_1 = 5$ мм; $d_2 = 5$ мм; $d_3 = 10$ мм; $s' = 50$ мм; сферическая поверхность концентрична фокусу, т. е. $r_4 = 50$ мм; фокусное расстояние $F' \cong 38,5$ мм; относительное отверстие для осевого пучка $D:F' \cong 1:1,44$. Результаты расчета координат поверхностей по ходу лучей осевого пучка приведены в таблице.

Для последующего анализа оптической системы рассчитанные профили второй и третьей поверхностей аппроксимировались полиномами

$$z_2 = 0,03870001y_2^2 - 0,3970724 \cdot 10^{-3}y_2^4 +$$

$$+ 0,5571738 \cdot 10^{-5}y_2^6 - 0,6282481 \cdot 10^{-7}y_2^8 +$$

$$+ 0,4765804 \cdot 10^{-9}y_2^{10} - 0,2232490 \cdot 10^{-11}y_2^{12} +$$

$$+ 0,5787470 \cdot 10^{-14}y_2^{14} - 0,6323048 \cdot 10^{-17}y_2^{16};$$

$$z_3 = 0,03569793y_3^2 - 0,9567210 \cdot 10^{-4}y_3^4 +$$

$$+ 0,6340106 \cdot 10^{-6}y_3^6 - 0,3484339 \cdot 10^{-8}y_3^8 +$$

$$+ 0,1351080 \cdot 10^{-10}y_3^{10} - 0,3321219 \cdot 10^{-13}y_3^{12} +$$

$$+ 0,4589463 \cdot 10^{-16}y_3^{14} - 0,2700253 \cdot 10^{-19}y_3^{16}.$$

Координаты поверхностей объектива на рис. 2 по ходу лучей осевого пучка (в мм)

y_4	x_4	y_3	x_3	$y_2 = y_1$	x_2
0,0	-50,0	0,0	-60,0	0,0	-65,0
1,0	-49,989999	1,199214	-59,948728	0,772480	-64,976864
2,0	-49,959984	2,393843	-59,798187	1,545457	-64,909341
3,0	-49,909919	3,579854	-59,556736	2,318385	-64,802226
4,0	-49,839743	4,754075	-59,235471	3,091464	-64,661870
5,0	-49,749372	5,914229	-58,845837	3,865170	-64,494797
6,0	-49,638695	7,058783	-58,398124	4,640219	-64,306839
7,0	-49,507575	8,186750	-57,900879	5,417535	-64,102805
8,0	-49,355851	9,297523	-57,360895	6,198233	-63,886478
9,0	-49,183331	10,390738	-56,783452	6,983605	-63,660767
10,0	-48,989795	11,466188	-56,172624	7,775136	-63,427886
11,0	-48,774994	12,523774	-55,531548	8,574525	-63,189514
12,0	-48,538644	13,563457	-54,862652	9,383728	-62,946932
13,0	-48,280431	14,585242	-54,167830	10,205017	-62,701125
14,0	-48,000000	15,589168	-53,448573	11,041069	-62,452861
15,0	-47,696960	16,575291	-52,706065	11,895089	-62,202749
16,0	-47,370877	17,543695	-51,941264	12,770994	-61,951285
17,0	-47,021272	18,494486	-51,154956	13,673685	-61,698892
18,0	-46,647615	19,427803	-50,347817	14,609477	-61,445954

Графический ход абберационных кривых на длинах волн 3, 4, 5, 8, 10 и 12 мкм представлен на рис. 4. Как видно, абберации на всех длинах волн имеют одинаковый волнообразный характер. Это может быть объяснено только погрешностью аппроксимации сложных профилей полиномами высокой степени. При использовании полиномов меньшей степени наблюдается более грубое общее искажение профилей и, соответственно, абберационных характеристик.

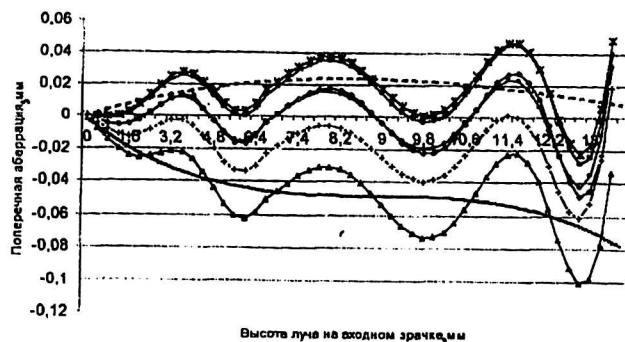


Рис. 4. Осевые абберационные характеристики объектива в спектральном диапазоне 3–12 мкм: —◆— 4 мкм; —▲— 3 мкм; —*— 8 мкм; — — — — — сглаживающая кривая (3 мкм); —●— 10 мкм; —■— 5 мкм; —+— 12 мкм; - - - - - сглаживающая кривая (8 мкм)

Характеристики на длинах волн 4 и 10 мкм практически совпадают и осциллируют около среднего значения, весьма близкого к нулю. Очевидно, это среднее значение и есть абберация, которую имеет объектив с вычисленными

поверхностями, не искаженными аппроксимацией. Иными словами, осевая абберация на этих длинах волн отсутствует, что и предполагалось заранее. На других длинах волн абберация имеет место и определяется величиной отступления характеристик $n(\lambda)$ материалов от линейных (см. рис. 3). В целом хроматизм объектива при таком расчете сравнительно невелик в весьма широком спектральном диапазоне и при большом относительном отверстии. При наличии материалов с более линейными характеристиками $n(\lambda)$ хроматизм может быть еще уменьшен.

При пространственном ходе лучей выражение для приращения оптического пути при изменении показателей преломления (4) не изменится, только в выражениях для отрезков при появлении третьей координаты следует, что в самой общей форме условие ахроматизации имеет вид

$$\Delta W = \int_A^{A'} \Delta n(x, y, z) ds = \text{const},$$

где A, A' — предметная точка и ее изображение, соответственно;
 $\Delta n(x, y, z)$ — дисперсия среды в функции координат;
 ds — элемент траектории луча.

При этом на основной длине волны должно выполняться условие

$$W = \int_A^{A'} n(x, y, z) ds = \text{const}.$$

To the development of the calculating methods for optical systems

V. A. Semin

Federal Scientific-and-Production Center "State Institute of Applied Optics", Kasan, Russia

The paper presents the condition of point focusing the wide nonmonochromatic light beam in a spectral range within which the dependencies of refractive indices on the $n(\lambda)$ wavelength of used optical materials can be considered as the line ones. The application of the obtained condition for achromatizing the high — power optical systems by means of aspherizing the lens surfaces is shown.