

10

© 1991 г.

ХРОМАТИЧЕСКИЕ АБЕРРАЦИИ ДВУХЭЛЕКТРОДНЫХ ТРАНСАКСИАЛЬНЫХ ЗЕРКАЛ

Л. Г. Бейзина, С. П. Карецкая

Рассмотрены хроматические aberrации второго порядка электростатических двухэлектродных трансаксиальных зеркал в случае, когда осевая траектория пучка заряженных частиц криволинейна. Найдены связи между коэффициентами линейных и угловых хроматических aberrаций. Приведены значения этих коэффициентов для вогнутых и выпуклых трансаксиальных зеркал с плоскими электродами в зависимости от отношения потенциалов на электродах при различных радиусах кольцевых щелей. Данные представлены графически в таблице.

В работах [1-4] исследовались корпускулярно-оптические свойства электростатических двухэлектродных трансаксиальных вогнутых и выпуклых зеркал в случае, когда осевая траектория пучка заряженных частиц является криволинейной. Рассматривались зеркала, электродная система которых представляет собой две пластины, расположенные симметрично относительно средней плоскости и одинаковым образом разрезанные на части кольцевыми щелями. Часть одной пластины и идентичная ей часть другой находятся под одним потенциалом и образуют электрод. Осевая траектория пучка расположена в средней плоскости. С помощью ЭВМ рассчитывались фокусные расстояния, линейная и угловая дисперсии по энергии, коэффициенты линейных и угловых геометрических aberrаций второго порядка. Хроматические aberrации не учитывались. Однако при большом разбросе энергий заряженных частиц знание их величины и возможности устранения становится необходимым.

Обратимся вначале к работе [5], в которой проводится теоретическое исследование отклонения и фокусировки пучков заряженных частиц в электростатических трансаксиальных системах. Для удобства обращения переобозначим оси используемой там системы естественных координат s, p_2, p_3 на s, x, y , сохранив остальные обозначения. Решим уравнение (5) этой работы, удержав члены второго порядка малости, зависящие от разброса энергий заряженных частиц, и найдем выражения для коэффициентов хроматических aberrаций. Для зеркала в пространстве изображений они имеют вид

$$K_i = x_{i0} - x_{i1} + b \int_0^s \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \frac{x_i \sqrt{\varphi} - x_{i1} \sqrt{\varphi_0}}{(1 - ka) \sqrt{\varphi}} ds, \quad (i = 7, 8, 9), \quad (1)$$

$$\begin{aligned} x_7 &= 2k_1 Dg + k_2 (Dg)' + 2k_3 D'g' + k_6 g' + k_7 g, \\ x_8 &= 2k_1 Dh + k_2 (Dh)' + 2k_3 D'h' + k_6 h' + k_7 h, \\ x_9 &= k_1 D^2 + k_2 DD' + k_3 D'^2 + k_6 D' + k_7 D. \end{aligned} \quad (2)$$

Суммарная aberrационная хроматическая поправка второго порядка в направлении главной нормали определяется формулой

$$\Delta_{xp} = K_7 x'_0 \varepsilon_0 + K_8 x_0 \varepsilon_0 + K_9 \varepsilon_0^2, \quad (3)$$

где x'_0 — тангенс угла наклона смежной траектории к осевой в предметном пространстве; x_0 — ее координата в предметной плоскости $s=0$; ε — отклонение энергии частицы, движущейся по этой траектории, от основной энергии; $\varepsilon_0 = \varepsilon/\varphi_0$, φ_0 — потенциал предметного пространства.

За пределами поля системы $k_1=k_2=0$, $k_3=a/2$, $k_6=b/2$, $k_7=-(1/2)$. В предметном пространстве $x_i=x_{i0}$ принимают значения $x_{70}=b_0/2$, $x_{80}=-(1/2)$, $x_{90}=0$. В пространстве изображений $x_i=x_{i1}$ определяются равенствами

$$\begin{aligned}x_{71} &= aD'_1 g'_1 + \frac{b}{2} g'_1 - \frac{1}{2} g, \\x_{81} &= aD'_1 h'_1 + \frac{b}{2} h'_1 - \frac{1}{2} h, \\x_{91} &= \frac{a}{2} D_1'^2 + \frac{b}{2} D_1' - \frac{1}{2} D.\end{aligned}$$

Учитывая, что в этом пространстве $g'_1 = b_0/b_1 = 1 + b_0/f$, $h'_1 = -(1/f)$ (f — фокусное расстояние), $g = g'_1(b - b_1)$, $D = D_1'b$, получим

$$\begin{aligned}x_{71} &= aD'_1 \left(1 + \frac{b_0}{f}\right) + \frac{b}{2}, \\x_{81} &= -\frac{aD'_1}{f} - \frac{1}{2}, \\x_{91} &= \frac{aD_1'^2}{2}.\end{aligned}$$

Следовательно, x_{i0} и x_{i1} постоянны, а коэффициенты K_i в пространстве изображений могут быть записаны в виде

$$\begin{aligned}K_7 &= -aD'_1 \left(1 + \frac{b_0}{f}\right) + b\mathcal{J}(x_7), \\K_8 &= \frac{aD'_1}{f} + b\mathcal{J}(x_8), \\K_9 &= -\frac{aD_1'^2}{2} + b\mathcal{J}(x_9),\end{aligned}\tag{4}$$

где введено обозначение

$$\mathcal{J}(x_i) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \frac{x_i \sqrt{\varphi} - x_{i0} \sqrt{\varphi_0}}{(1 - ka) \sqrt{\varphi}} ds, \quad (i = 7, 8, 9).$$

Интегрирование в бесконечных пределах означает, что интеграл берется от некоторого значения s в предметном пространстве до некоторого значения s в пространстве изображений. Выбор этих значений произволен, так как подынтегральные функции вне поля обращаются в нуль.

Дифференцируя (4) по s , получим коэффициенты угловых хроматических aberrаций в пространстве изображений

$$K'_i = K'_{i1} = \mathcal{J}'(x_i).\tag{5}$$

Таким образом, в трансаксиальной системе коэффициенты линейных и угловых хроматических aberrаций связаны между собой соотношениями

$$\begin{aligned}K_7 &= -aD'_1 \left(1 + \frac{b_0}{f}\right) + bK'_{71}, \\K_8 &= \frac{aD'_1}{f} + bK'_{81}, \\K_9 &= \frac{aD_1'^2}{2} + bK'_{91}.\end{aligned}\tag{6}$$

Принимая во внимание равенство $g = b - b_0/2$ [5] и соотношения (2), найдем

$$\mathcal{J}(x_7) = \mathcal{J}(x_{7b}) - b_0 \mathcal{J}(x_8),$$

где $x_{7b} = 2k_1 Db + k_2 (Db)' + 2k_3 D'b' + k_6 b' + k_7 b$.

Расчеты показали, что в рассматриваемом зеркале всегда $\mathcal{J}(x_{7b}) = 0$, т. е. $\mathcal{J}(x_7) = -b_0 \mathcal{J}(x_8)$, а между коэффициентами существуют следующие связи:

$$K_7 + b_0 K_8 = -aD'_1, \quad K'_{71} + b_0 K'_{81} = 0. \quad (7)$$

В плоскости гауссова изображения $s = s_1$, где $b = b_1$, $K_i = K_{i1}$,

$$\begin{aligned} K_{71} &= -aD'_1 \left(1 + \frac{b_0}{f}\right) - b_0 b_1 K'_{81}, \\ K_{81} &= \frac{aD'_1}{f} + b_1 K'_{81}, \\ K_{91} &= -\frac{aD_1'^2}{2} + b_1 K'_{91}. \end{aligned} \quad (8)$$

В фокальной плоскости пространства изображений $s = s(F_1)$, где $b = f$, $K_i = K_{iF}$,

$$\begin{aligned} K_{7F} &= -aD'_1 \left(1 + \frac{b_0}{f}\right) - b_0 f K'_{81}, \\ K_{8F} &= \frac{aD'_1}{f} + f K'_{81}, \\ K_{9F} &= -\frac{aD_1'^2}{2} + f K'_{91}. \end{aligned} \quad (9)$$

В этом случае начальная координата смежной траектории задана в плоскости диафрагмы $s = s_a$, где $b = b_a$.

На рис. 1 и 2 представлены зависимости коэффициентов $K_{7F} - K_{9F}$ от потенциала φ_2 второго по ходу пучка электрода для двухэлектродных вогнутых и выпуклых зеркал с радиусами кольцевых щелей $R_1 = 10$ (кривые 1) и 50 (кривые 2) при отношении $a/R_1 = 0.4$. Коэффициенты вычислены в предположении, что диафрагма расположена при входе в поле зеркала. Считается, что оно начинает действовать на расстоянии $R_1 - 3$ для вогнутых и $R_1 + 3$ для выпуклых зеркал. Как и прежде, при вычислениях за единицу измерения потенциала принят потенциал φ_1 первого электрода ($\varphi_0 = \varphi_1$), за единицу длины — расстояние между пластинами, составляющими отдельный электрод. Кардинальные элементы и коэффициенты геометрических aberrаций второго порядка рассматриваемых вогнутых зеркал можно найти в [1, 2], выпуклых — в [3]. Из приведен-

Номер группы	R_1	α , град	φ_2	D'_1	$-K_{71}$	K_{81}	$-K_{91}$	
I	10	130.0	-0.1472	0.219	1.0	0.23	0.11	
		120.0	-0.0210	0.287	1.6	0.39	0.23	
	30	110.0	0.0327	0.097	1.7	0.14	0.09	
		90.0	0.3009	0.148	3.2	0.34	0.24	
		70.0	0.5734	0.249	6.3	0.80	0.79	
	50	110.0	0.0175	0.056	1.6	0.08	0.05	
		90.0	0.2803	0.083	3.0	0.18	0.12	
		70.0	0.5442	0.129	5.4	0.44	0.35	
	II	10	140.0	0.1266	2.53	12	4.8	15
			130.0	0.2388	3.78	22	15	42
		30	130.0	0.1374	0.748	10	0.99	3.9
			110.0	0.3252	1.23	23	3.6	14
90.0			0.5422	2.16	51	17	55	
50		130.0	0.1237	0.416	9.3	0.47	1.9	
		110.0	0.3008	0.658	20	1.4	6.6	
		90.0	0.5033	1.04	39	4.6	20	
		70.0	0.7080	1.90	82	25	78	

ных рис. 1, 2 видно, что величиной коэффициентов можно эффективно управлять как потенциалами на электродах зеркала, так и радиусом кольцевых щелей. Зная значения коэффициентов $K_{7F}-K_{9F}$, можно по формулам (9) найти значения коэффициентов угловых хроматических aberrаций $K'_{71}-K'_{91}$ в пространстве изображений, а по формулам (6)—(8) вычислить значения коэффициентов линейных хроматических aberrаций $K'_{71}-K'_{91}$ в любой плоскости этого

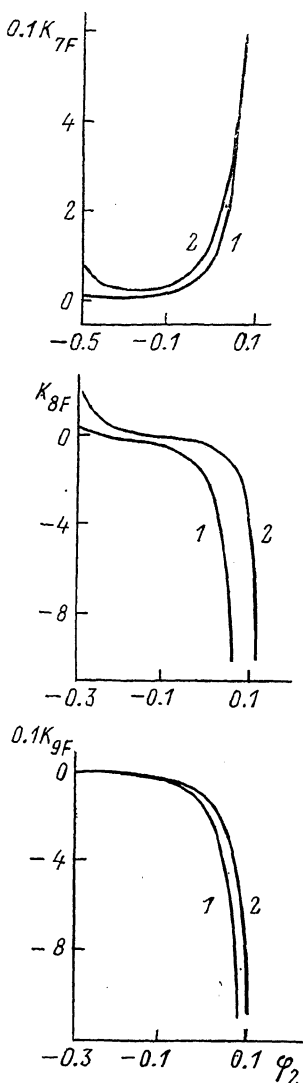


Рис. 1. Коэффициенты хроматических aberrаций двухэлектродных вогнутых зеркал.

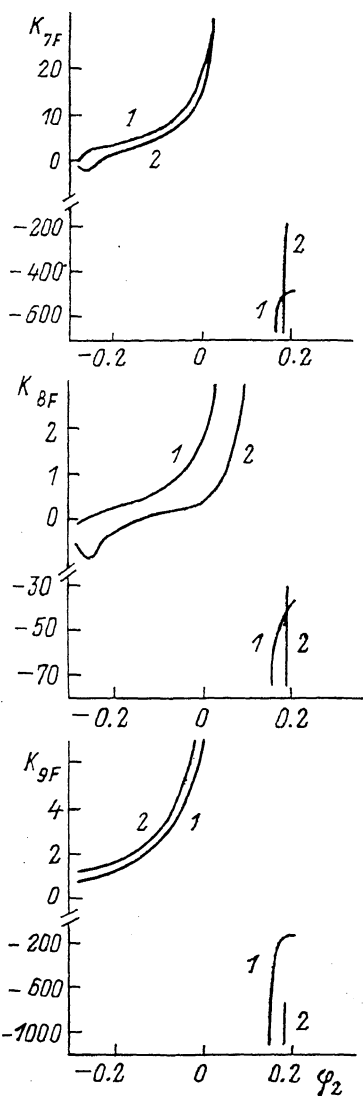


Рис. 2. Коэффициенты хроматических aberrаций двухэлектродных выпуклых зеркал.

пространства. При вычислении $K_{7F}-K_{9F}$ использовалась общая программа, пригодная для анализа любой электростатической системы с плоскостью симметрии. В ее основу положены общие формулы работы [6]. Полученные здесь соотношения служили для контроля за правильностью проводимых расчетов.

В таблице приведены значения коэффициентов хроматических aberrаций $K_{71}-K_{91}$ для двухэлектродных вогнутых зеркал, у которых предмет и изображение расположены в главных плоскостях, $b_0=b_1=0$. Для различных значений R_1 и α (угол отклонения пучка заряженных частиц) найдены такие φ_2 , при которых достигается стигматическая фокусировка пучка. При этом в плоскости изображения пучок фокусируется в первом порядке по энергии ($D_1=0$) и во втором порядке по углам расходимости в средней плоскости и в ортогональном

направлении ($K_{11}=K_{41}=0$). Коэффициенты $K_{71}-K_{91}$ при $b_1=0$ становятся пропорциональными угловой дисперсии по энергии $K_{71}=-aD'_1$, $K_{81}=(aD'_1)/f$, $K_{91}=-((aD'_1)^2)/2$. Значения a , r_{\max} (глубина проникновения пучка в поле зеркала) и $R_{\text{эф}}$ (радиус эффективной поверхности отражения) для этих зеркал можно найти в [4]. Из таблицы видно, что коэффициенты $K_{71}-K_{91}$ достаточно малы, поэтому и при большом разбросе по энергиям двухэлектродные вогнутые зеркала остаются отклоняющими системами высокого качества. В зеркалах группы I линейное увеличение в направлении, перпендикулярном к средней плоскости, равно -1 , в зеркалах группы II $+1$.

Список литературы

- [1] Бейзина Л. Г., Карецкая С. П., Кельман В. М. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 9. С. 1681—1689.
- [2] Бейзина Л. Г., Карецкая С. П., Кельман В. М. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 7. С. 1249—1255.
- [3] Бейзина Л. Г., Карецкая С. П., Кельман В. М. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 3. С. 434—439.
- [4] Бейзина Л. Г., Карецкая С. П. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 10. С. 1972—1977.
- [5] Карецкая С. П., Федюлина Л. В. // ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 4. С. 735—739.
- [6] Карецкая С. П., Федюлина Л. В. // ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 4. С. 740—745.

Институт ядерной физики КазССР
Алма-Ата

Поступило в Редакцию
3 августа 1990 г.