

01;10
©1992 г.

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ АБЕРРАЦИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ТРАНСАКСИАЛЬНЫХ ТРЕХЭЛЕКТРОДНЫХ ЗЕРКАЛ

Л.Г.Бейзина

Исследованы геометрические aberrации второго порядка, возникающие при фокусировке пучка заряженных частиц в вертикальном направлении, трансаксиальных трехэлектродных вогнутых и выпуклых зеркал с электродами, состоящими из пары параллельных пластин, в случае криволинейной осевой траектории пучка. Проанализировано поведение коэффициентов геометрических aberrаций второго порядка вертикального направления в фокальной плоскости в широких пределах изменения величины потенциала на втором электроде и его ширины. Приведены значения коэффициентов геометрических aberrаций второго порядка вертикального направления вогнутых и выпуклых зеркал, обеспечивающих стигматическую фокусировку без сферической aberrации второго порядка горизонтального направления как параллельного, так и расходящегося пучков заряженных частиц.

В работах [1-3] описаны корпускулярно-оптические свойства электростатических трансаксиальных трехэлектродных вогнутых и выпуклых зеркал в случае криволинейной осевой траектории пучка заряженных частиц. Каждый электрод зеркала состоит из двух идентичных пластин, параллельных средней плоскости, вблизи которой движутся заряженные частицы. Пластины соседних электродов разделены узкими щелями, имеющими форму частей соосных колец, причем центры кривизны щелей у вогнутых зеркал находятся со стороны входа пучка заряженных частиц в электрическое поле, у выпуклых — с противоположной стороны. Средняя плоскость расположена горизонтально, разложение по энергии происходит параллельно этой плоскости. Зеркала формируют астигматическое изображение предмета в виде двух взаимно перпендикулярных штрихов, расположенных в разных плоскостях на некотором расстоянии друг от друга. Фокусировка, осуществляемая в направлении, параллельном средней плоскости, называется фокусировкой горизонтального направления, фокусировка, происходящая в перпендикулярном к средней плоскости направлении, — фокусировкой вертикального направления. Показано, что такие зеркала могут отклонять на различные углы и фокусировать как параллельный, так и расходящийся пучки заряженных частиц. В широких пределах изменения величины потенциала на втором электроде и его ширины исследованы фокусные расстояния горизонтального и вертикального направлений, а также угловые и линей-

ные дисперсии, коэффициенты геометрических и хроматических aberrаций второго порядка горизонтального направления. Выделены зеркала, обладающие большой дисперсией по энергии и обеспечивающие стигматическую фокусировку без сферической aberrации второго порядка горизонтального направления. Приведены их геометрические и электрические параметры, фокусные расстояния горизонтального и вертикального направлений, дисперсии, коэффициенты геометрических и хроматических aberrаций второго порядка горизонтального направления. Однако при решении определенных задач практического приложения необходимо знать и учитывать геометрические aberrации второго порядка вертикального направления.

Координата y частицы, движущейся по смежной траектории с точностью до членов второго порядка малости, определяется по формуле

$$y = y'_0 G + y_0 H + M_1 y'_0 x'_0 + M_2 y'_0 x_0 + M_3 y_0 x'_0 + M_4 y_0 x_0.$$

Используется криволинейная система координат x, y, s , ось s которой смещена с осевой траекторией, а оси x и y направлены по нормали и бинормали к ней; x_0, y_0 — координаты частиц в предметной плоскости; x'_0, y'_0 — тангенсы углов наклона ее вектора скорости к осевой траектории в предметном пространстве; G, H — некоторые частные линейно независимые решения дифференциального уравнения движения заряженных частиц в вертикальном направлении, удовлетворяющие начальным условиям $G_0 = H'_0 = 0$ и $H_0 = G'_0 = 1$; $M_1 - M_4$ — коэффициенты линейных геометрических aberrаций второго порядка вертикального направления. Коэффициенты $M_1 - M_4$, согласно [4], в пространстве изображений определяются такими выражениями:

$$M_j = -\frac{1}{\sqrt{\varphi_0}} \left(H \int_0^{s_1} G \sqrt{\varphi} \mu_j ds - G \int_0^{s_1} H \sqrt{\varphi} \mu_j ds \right), \quad j = 1, 2, 3, 4,$$

где $\mu_1 = QgG - 2(kg')G'$, $\mu_2 = QhG - 2(kh')G'$, $\mu_3 = QgH - 2(kg')H'$, $\mu_4 = QhH - 2(kh')H'$;

$$Q = \frac{\varphi_{12}}{2\varphi} - \frac{k'\varphi_{02}}{\varphi} - \frac{k\varphi'\varphi_{02}}{\varphi^2};$$

штрихами обозначено дифференцирование по s ; φ_0 — потенциал предметного пространства; φ — распределение потенциала вдоль осевой траектории; h, g — некоторые частные линейно независимые решения дифференциального уравнения движения заряженных частиц в средней плоскости, удовлетворяющие начальным условиям $g_0 = h'_0 = 0$ и $h_0 = g'_0 = 1$.

Для трансаксиальных систем [5]

$$k = \frac{\sin \beta}{2\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial r}$$

— кривизна осевой траектории; r — радиус-вектор, проведенный из центра (точка пересечения оси симметрии с плоскостью симметрии) в текущую точку осевой траектории; β — угол между этим радиус-вектором и

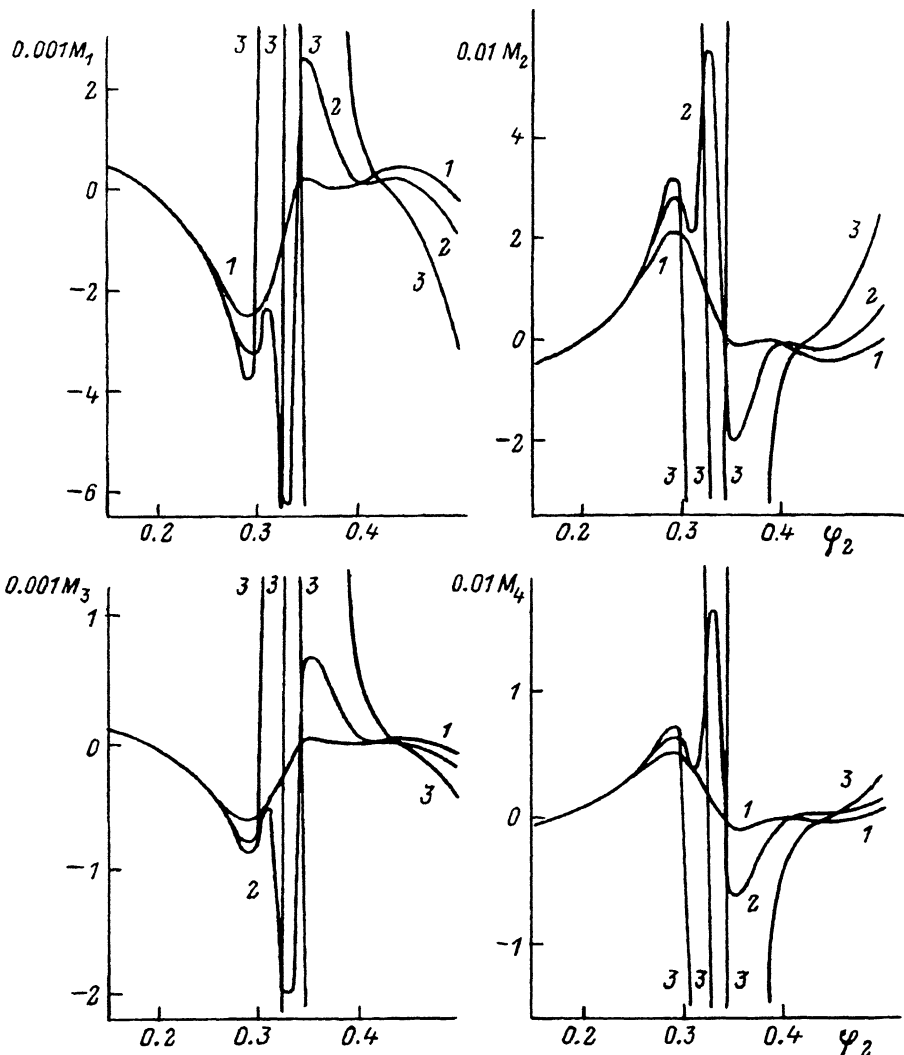


Рис. 1. Коэффициенты геометрических aberrаций второго порядка вертикального направления трехэлектродных вогнутых зеркал.

вектором, направленным по касательной к осевой траектории;

$$\varphi = \frac{d\varphi}{ds} = \frac{\partial\varphi}{\partial r} \cos \beta;$$

$$\varphi_{12} = \left(\frac{\partial^3\varphi}{\partial r^3} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2\varphi}{\partial r^2} - \frac{1}{r_3} \frac{\partial\varphi}{\partial r} \right) \sin \beta;$$

$$\varphi_{20} = \frac{\partial^2\varphi}{\partial r^2} \sin^2 \beta + \frac{1}{r} \frac{\partial\varphi}{\partial r} \cos^2 \beta;$$

$$\varphi_{02} = \frac{\partial^2\varphi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial\varphi}{\partial r}.$$

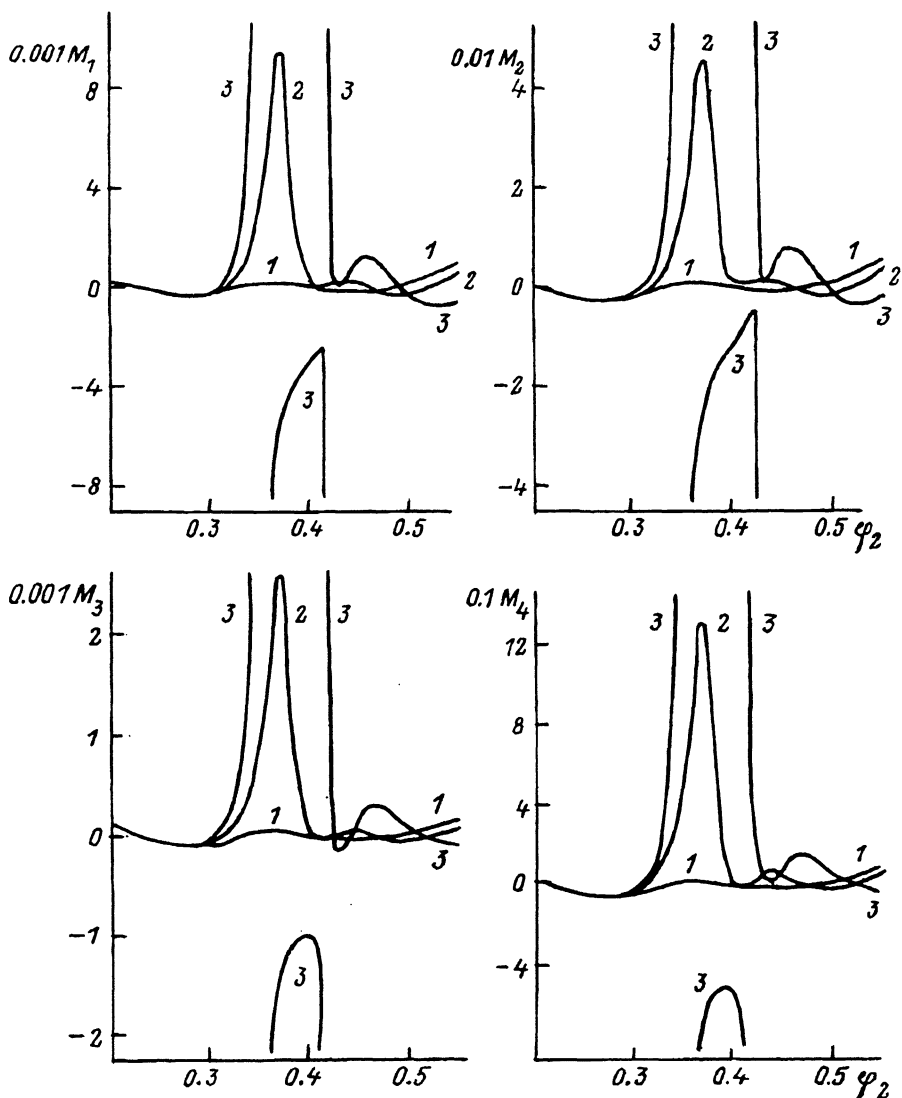


Рис. 2. Коэффициенты геометрических aberrаций второго порядка вертикального направления трехэлектродных выпуклых зеркал.

С помощью ЭВМ БЭСМ-6 определялись значения коэффициентов $M_1 - M_4$ геометрических aberrаций второго порядка, возникающих при фокусировке параллельного или расходящегося пучков заряженных частиц в вертикальном направлении в широком интервале геометрических и электрических параметров исследуемых зеркал. По причине ограниченности размеров работы приводится только часть полученного материала.

На рис. 1 и 2 представлены значения коэффициентов $M_1 - M_4$ в фокальной плоскости вогнутых и выпуклых зеркал при изменении потенциала φ_2 на втором электроде. Геометрические и электрические параметры этих зеркал, как и в работах [1,3], имеют следующие значения: радиус первой

Таблица 1. Зеркала для коллиматоров и камер

| Тип зеркала | $R_1 (R_2)$ | $(\pm)\alpha$, град | φ_2 | φ_3 | M_1 | M_2 | $-M_3$ | $10^2 M_4$ |
|-------------|-------------|----------------------|-------------|-------------|-------|-------|--------|------------|
| Вогнутое | 20 | 140.0 | 0.2014 | 0.0600 | -3.9 | 0.66 | 1.1 | 0.81 |
| | | 130.0 | 0.2816 | 0.1490 | -9.2 | 1.2 | 1.3 | 1.5 |
| | | 120.0 | 0.3754 | 0.2520 | -17 | 2.2 | 1.3 | -0.18 |
| | | 110.0 | 0.4827 | 0.3680 | -33 | 4.5 | 1.7 | 2.8 |
| | 30 | 100.0 | 0.5971 | 0.4659 | -50 | 9.8 | 1.5 | -3.2 |
| | | 130.0 | 0.2476 | 0.1060 | -9.8 | 0.94 | 1.0 | -0.34 |
| | | 120.0 | 0.3359 | 0.2080 | -16 | 1.4 | 1.6 | 1.4 |
| | | 110.0 | 0.4275 | 0.3100 | -28 | 2.3 | 1.5 | 0.07 |
| | 50 | 100.0 | 0.5297 | 0.4250 | -46 | 4.0 | 1.6 | -0.24 |
| | | 90.0 | 0.6347 | 0.5350 | -75 | 7.8 | 1.6 | -2.2 |
| | | 100.0 | 0.4818 | 0.3700 | -46 | 2.4 | 2.4 | 2.5 |
| | | 90.0 | 0.5789 | 0.4840 | -64 | 3.5 | 1.7 | -0.54 |
| | | 80.0 | 0.6754 | 0.5940 | -110 | 6.3 | 2.7 | 2.6 |
| | | 70.0 | 0.7811 | 0.7040 | -160 | 10.0 | 2.0 | 0.0 |
| Выпуклое | 7 | 90.0 | 0.3046 | 0.2067 | 4.3 | 0.38 | 1.3 | 0.20 |
| | | 80.0 | 0.3670 | 0.2729 | 11 | 0.75 | 0.55 | 0.00 |
| | 10 | 90.0 | 0.3438 | 0.2517 | 6.6 | 0.43 | 1.8 | -0.02 |
| | | 80.0 | 0.4091 | 0.3233 | 15 | 0.80 | 0.68 | 0.33 |
| | 20 | 90.0 | 0.4052 | 0.3258 | 4.8 | 0.33 | 4.9 | -0.56 |
| | | 80.0 | 0.4793 | 0.4043 | 20 | 0.64 | 2.1 | 0.10 |
| | | 70.0 | 0.5493 | 0.4851 | 34 | 1.1 | 0.70 | 0.27 |
| | 30 | 80.0 | 0.5096 | 0.4409 | 17 | 0.45 | 5.0 | -0.20 |
| | | 70.0 | 0.5841 | 0.5237 | 39 | 0.88 | 1.8 | 0.37 |
| | 40 | 70.0 | 0.6036 | 0.5462 | 39 | 0.66 | 3.9 | -0.08 |
| | 50 | 70.0 | 0.6156 | 0.5611 | 33 | 0.52 | 6.9 | -0.01 |

по ходу пучка кольцевой щели $R_1 = 20$; ширина второго электрода $l = 1.2$ (кривая 1), 1.5 (кривая 2), 2.0 (кривая 3); прицельный параметр $a = 12$ и потенциал на третьем по ходу пучка электроде $\varphi_3 = 0.25$. Единицей измерения потенциала служит потенциал φ_1 первого по ходу пучка электрода, единицей длины — расстояние d между пластинами, образующими электрод. Координаты x_0 и y_0 задаются на входе в поле зеркала. Электрическое поле отсутствует за пределами области $R_1 - 3 \leq r \leq R_2 + 3$ для вогнутых и $R_2 + 3 \leq r \leq R_1 - 3$ для выпуклых зеркал. Потенциал нормирован так, что обращается в нуль там, где равна нулю скорость частицы, движущейся по осевой траектории. Распределение потенциала в средней плоскости определяется с помощью приближенных формул (1) из [1]. Сравнение значений абберационных коэффициентов, найденных при использовании этих формул и точных формул (2) из [1], при работе с которыми требуются большие затраты машинного времени, показывает, что отличие между ними незначительно. Расположение кардинальных элементов в средней плоскости, значения фокусных расстояний горизонтального и вертикального направлений, коэффициенты геометрических и хроматических аббераций второго порядка горизонтального направле-

Таблица 2. Зеркала для энергоанализаторов

| Тип зеркала | $R_1(R_2)$ | $(\pm)\alpha$, град | φ_2 | φ_3 | $10^2 M_1$ | $10^2 M_2$ | $10^3 M_3$ | $10 M_4$ |
|-------------|------------|----------------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|----------|
| Вогнутое | 20 | 120.0 | 0.3931 | 0.2846 | 0.60 | 0.50 | 1.1 | -4.9 |
| | | 110.0 | 0.4846 | 0.4079 | -0.09 | 0.56 | 6.8 | -6.7 |
| | 30 | 110.0 | 0.4436 | 0.3417 | -0.92 | 0.11 | 2.1 | -3.9 |
| | | 100.0 | 0.5472 | 0.4564 | 0.74 | 0.90 | 1.4 | -4.8 |
| | | 90.0 | 0.6602 | 0.5826 | -0.08 | 1.1 | 1.8 | -7.9 |
| | 50 | 120.0 | 0.3190 | 0.2089 | 0.33 | 2.1 | -1.8 | -3.2 |
| | | 110.0 | 0.4049 | 0.3014 | 0.51 | 1.9 | -2.5 | -2.9 |
| | | 100.0 | 0.4969 | 0.4038 | -0.62 | 1.8 | -2.6 | -3.0 |
| | | 90.0 | 0.5928 | 0.5125 | -0.78 | 1.7 | -9.6 | -3.4 |
| | | 80.0 | 0.6904 | 0.6239 | -0.70 | 1.8 | 1.1 | -4.7 |
| Выпуклое | 7 | 90.0 | 0.3124 | 0.2052 | 0.73 | 0.00 | 1.2 | 0.49 |
| | | 80.0 | 0.3684 | 0.2727 | 2.7 | 0.07 | 1.9 | 0.15 |
| | 10 | 110.0 | 0.2350 | 0.1226 | 0.43 | 0.04 | 1.3 | 0.19 |
| | | 100.0 | 0.2923 | 0.1824 | -0.80 | -0.11 | -9.3 | 0.10 |
| | | 90.0 | 0.3512 | 0.2501 | -0.29 | -0.04 | 2.2 | 0.46 |
| | 30 | 110.0 | 0.3041 | 0.1949 | -0.12 | -0.46 | 1.6 | 1.8 |
| | | 100.0 | 0.3732 | 0.2718 | -1.0 | -0.34 | 1.2 | 1.2 |
| | | 90.0 | 0.4442 | 0.3542 | 3.0 | -0.20 | 4.2 | 0.73 |
| | | 80.0 | 0.5156 | 0.4390 | 2.7 | 0.07 | 2.8 | 0.41 |
| | 50 | 120.0 | 0.2550 | 0.1439 | -0.67 | -1.6 | -1.7 | 2.7 |
| | | 110.0 | 0.3240 | 0.2160 | 0.96 | -1.2 | 6.9 | 1.9 |
| | | 100.0 | 0.3966 | 0.2972 | 1.5 | -1.0 | 7.7 | 1.3 |
| | | 90.0 | 0.4715 | 0.3838 | 1.4 | -0.58 | 6.2 | 0.93 |
| | | 80.0 | 0.5466 | 0.4723 | 5.0 | -0.15 | 6.3 | 0.62 |
| | | 70.0 | 0.6199 | 0.5596 | 5.5 | 0.05 | 5.0 | 0.36 |

ния можно найти в [1,3]. Как видно из рисунков, M_1-M_4 сильно зависят от потенциала φ_2 . Имеются два близких для всех коэффициентов узких интервала φ_2 , в которых M_1-M_4 проходят через нуль. Следовательно, незначительно варьируя l , φ_2 , φ_3 , можно минимизировать эти коэффициенты.

В табл. 1 приведены коэффициенты геометрических aberrаций второго порядка вертикального направления вогнутых и выпуклых зеркал, фокусирующих параллельный пучок заряженных частиц в точку без сферической aberrации второго порядка горизонтального направления. Кроме M_1-M_4 даны угол отклонения осевой траектории пучка α , потенциалы второго φ_2 и третьего φ_3 электродов, радиусы первой щели по ходу пучка R_1 для вогнутых и второй щели по ходу пучка R_2 для выпуклых зеркал. Как видно из таблицы, у всех исследуемых систем отсутствует aberrация, связанная с линейными координатами частицы в предметной плоскости.

В табл. 2 представлены M_1-M_4 вогнутых и выпуклых зеркал, формирующих стигматическое изображение предмета с линейным увеличени-

ем —1. И в этом случае оба коэффициента сферической аберрации второго порядка горизонтального направления равны нулю. Из приведенных данных следует, что у таких систем также практически отсутствуют геометрические аберрации второго порядка вертикального направления. Значения коэффициентов, приведенные в табл. 1 и 2, являются важным дополнением к сведениям о корпускулярно-оптических свойствах трансаксиальных трехэлектродных зеркал [2,3].

Список литературы

- [1] Бейзина Л.Г., Карецкая С.П. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 5. С. 877–883.
- [2] Бейзина Л.Г., Карецкая С.П. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 5. С. 870–876.
- [3] Бейзина Л.Г., Карецкая С.П. // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 7. С. 191–193.
- [4] Карецкая С.П., Федулина Л.В. // ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 4. С. 735–739.
- [5] Карецкая С.П., Федулина Л.В. // ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 4. С. 740–745.

Институт ядерной физики
Алма-Ата

Поступило в Редакцию
13 февраля 1992г.