

## ЧЕТЫРЕХЭЛЕКТРОДНОЕ ЗЕРКАЛО С ДВУМЕРНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

*С. П. Карецкая, Н. Ю. Сайченко*

Рассмотрены корпускулярно-оптические свойства четырехэлектродного зеркала с двумерным электрическим полем. Три электрода зеркала состоят из двух параллельных пластин, четвертый — из одной, перпендикулярной к ним. Найдено распределение потенциала в такой системе. Исследованы фокусирующие свойства, включая геометрические аберрации второго порядка, а также линейная дисперсия по энергии. Показано, что фокусирующими свойствами такого зеркала легко управлять при помощи потенциалов на электродах.

В работах [1-3] были исследованы дисперсионные и фокусирующие свойства трехэлектродных зеркал с двухпластинными электродами, разделенными прямыми щелями. В [4] обсуждалась возможность их применения для анализа заряженных частиц по энергии или для достижения двойной фокусировки в масс-спектрометрах с секторным магнитом. В [5] был описан работающий масс-спектрометр вторичных ионов с энергетическим фильтром на основе такого зеркала. Обращалось внимание на совершенство фокусирующих свойств зеркала, большую дисперсию по энергии при малых габаритах, возможность управлять его корпускулярно-оптическими свойствами, варьируя потенциалы на электродах, а также на простоту конструкции зеркала, удобство размещения источника и приемника.

Возможность управлять качеством фокусировки в зеркале при помощи потенциалов на электродах является, пожалуй, одним из наиболее важных его достоинств. Подбирая потенциалы, удается добиться стигматичности формируемого изображения и сделать сколь угодно малым тот из коэффициентов сферической аберрации второго порядка, который стоит перед квадратом угла расходимости пучка заряженных частиц в средней плоскости. Однако, чтобы одновременно минимизировать коэффициент сферической аберрации, связанный с квадратом угла расходимости пучка в направлении, перпендикулярном к средней плоскости, нужно, кроме потенциалов, подобрать еще точное значение геометрического параметра — ширину промежуточного электрода (см. табл. 3 в [1]).

Стремление устранить нежелательную зависимость качества фокусировки от геометрического параметра и вместе с тем уменьшить габариты зеркала привело к предложению несколько видоизменить его конструкцию, введя четвертый электрод. Конструкция нового зеркала и расположение поставленной ему в соответствие декартовой системы координат показаны на рис. 1. Каждый из трех электродов 1-3 образован парой идентичных, параллельных средней плоскости пластин, расположенных симметрично относительно нее, на расстоянии  $d$  друг от друга. Электрод 4 состоит из одной пластины, расположенной перпендикулярно к средней плоскости. Плоскость  $xz$  совмещена со средней плоскостью зеркала, плоскость  $xy$  — с внутренней поверхностью четвертого электрода. Осевая траектория отклоняемого пучка лежит в средней плоскости зеркала. Будем считать, что последняя расположена горизонтально.

При достаточной протяженности электродных пластин в направлении оси  $x$  электрическое поле рассматриваемой системы в области движения заряженных

частиц является двумерным, потенциал  $\bar{\phi} = \bar{\phi}(y, z)$ . Распределение потенциала в средней плоскости  $\varphi = \varphi(z)$  при бесконечно узких зазорах  $\delta$  между соседними электродами выражается формулой

$$\varphi(z) = \varphi_4 + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\pi} [\operatorname{arctg} \operatorname{sh} \pi(z - z_1) + \operatorname{arctg} \operatorname{sh} \pi(z + z_1)] + \\ + \frac{\varphi_3 - \varphi_2}{\pi} [\operatorname{arctg} \operatorname{sh} \pi(z - z_2) + \operatorname{arctg} \operatorname{sh} \pi(z + z_2)] + \\ + 2 \frac{\varphi_4 - \varphi_3}{\pi} \operatorname{arctg} \operatorname{sh} \pi z, \quad (1)$$

где  $z_1, z_2$  — координаты щелей между первым и вторым, вторым и третьим электродами соответственно.

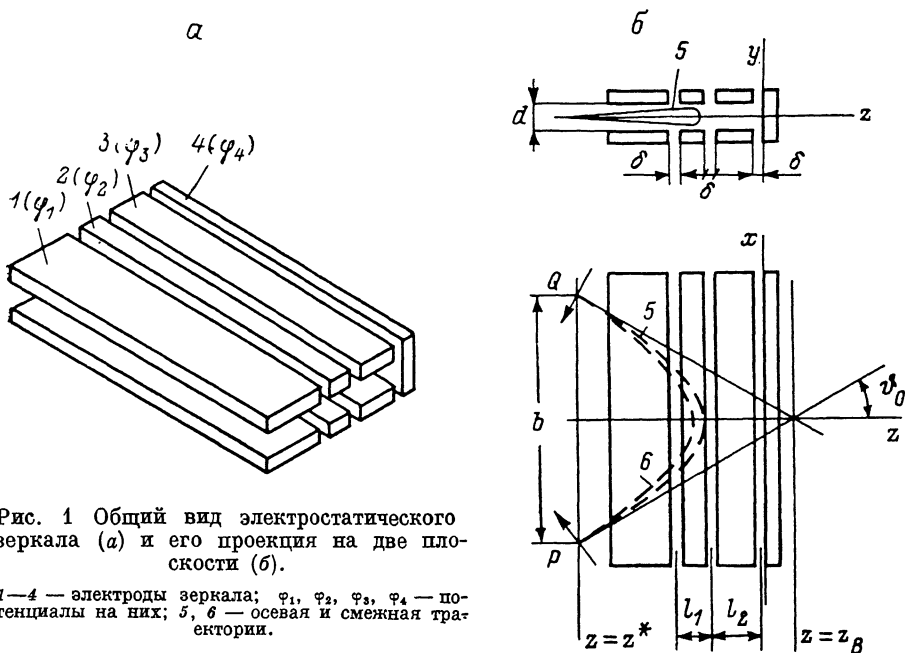


Рис. 1 Общий вид электростатического зеркала (а) и его проекция на две плоскости (б).

1—4 — электроды зеркала;  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$  — потенциалы на них; 5, 6 — осевая и смежная траектории.

При выводе (1) использован принцип зеркального отражения, согласно которому влияние четвертого электрода при нулевом потенциале на нем аналогично добавлению расположенной симметрично относительно этого электрода трехэлектродной системы с двухпластинными электродами с соответственно равными по величине, но противоположными по знаку потенциалами (рис. 2).

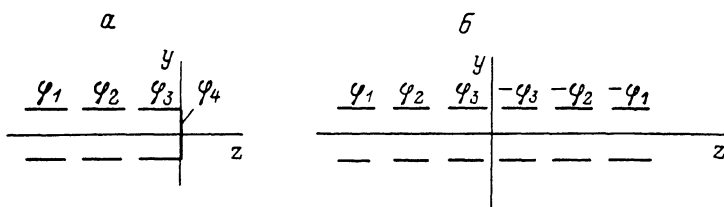


Рис. 2. При  $\varphi_4 = 0$  распределение потенциала в системах а и б для  $z < 0$  одинаково.

Формулу для определения потенциала в системе, показанной на рис. 2, б, нетрудно записать, используя формулу для трехэлектродной системы с двухпластинными электродами [6] и принцип суперпозиции. Добавив затем в полученное выражение в качестве аддитивного слагаемого потенциал четвертого электрода  $\varphi_4$ , получим окончательно (1).

При вычислении корпускулярно-оптических параметров зеркала были использованы формулы работы [7], где введена криволинейная система координат

нат ( $s, p_2, p_3$ ). Ось  $s$  совмещена с осевой траекторией пучка заряженных частиц, оси  $p_2$  и  $p_3$  направлены по нормали и бинормали к ней соответственно. Траектория, смежная с осевой, задается значениями малых параметров  $p_2 = p_{20}, p_3 = p_{30}, p'_2 = p'_{20}, p'_3 = p'_{30}$  и  $\varepsilon$  в предметной плоскости  $s=0$ ;  $\varepsilon$  определяет отличие энергий частиц, движущихся по осевой и смежной траекториям. В предметном пространстве энергия частиц  $E = -e(\varphi_1 + \varepsilon)$ . Смежная траектория пересекает плоскость изображений в точке с координатами

$$p_2 = -p_{20} + D_1 \frac{\varepsilon}{\varphi_1} + K_1 p_{20}^2 + K_2 p'_{20} p_{20} + K_3 p_{20}^3 + K_4 p_{30}^2 + K_5 p'_{30} p_{30} + K_6 p_{30}^3, \quad (2)$$

$$p_3 = G_1 p'_{30} + H_1 p_{30} + M_1 p'_{30} p'_{20} + M_2 p'_{30} p_{20} + M_3 p_{30} p'_{20} + M_4 p_{30} p_{20}. \quad (3)$$

В этих разложениях коэффициент  $D_1$  представляет собой линейную дисперсию по энергии,  $H_1$  — линейное увеличение в направлении оси  $y$ ,  $K_i$  и  $M_j$  — аберрационные коэффициенты. В рассматриваемом зеркале всегда  $K_2 = K_3 = 0$ .

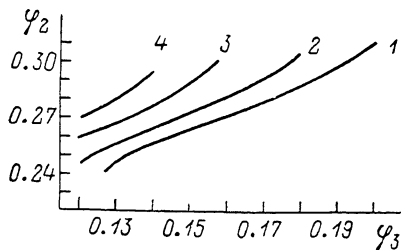


Рис. 3. Зависимость между потенциалами на электродах зеркала, обеспечивающая стигматичность изображения.

Если изображение стигматично, то коэффициент  $G_1 = 0$ . При расчетах за единицу потенциала принят потенциал  $\varphi_1$  первого электрода, за единицу длины — расстояние  $d$  между пластинами двухпластинных электродов (рис. 1).

Исследование возможностей нового зеркала было проведено для систем с углом падения осевой траектории  $\vartheta_0 = 30^\circ$ . Выбирались зеркала, формирующие стигматическое изображение в случае, когда предметная плоскость и плоскость изображений равноудалены от зеркала. Осевая траектория пересекает эти плоскости в точках с одинаковой координатой  $z = z^*$ . Для зеркал

с заданной шириной электродных пластин второго  $l_1$  и третьего  $l_2$  электродов при фиксированных значениях  $\varphi_3$  и  $\varphi_4$  имеется несколько значений  $\varphi_2$ , обеспечивающих стигматичность изображения. Множество таких зеркал в соответствии с ходом кривой  $\varphi_2 = f(\varphi_3)$  при данном значении  $\varphi_4$  распадается на несколько групп, как и в случае трехэлектродного зеркала с двухпластинными электродами [2]. Наиболее интересной по величине дисперсии и качеству фокусировки, как и там, является группа II. Поэтому в дальнейшем обсуждаются свойства зеркал именно из этой группы.

На рис. 3—5 показана зависимость корпускулярно-оптических параметров зеркала с шириной электродных пластин  $l_1 = 1.2$  и  $l_2 = 1.5$  от потенциала  $\varphi_3$  для четырех значений потенциала  $\varphi_4$ . Соответствие между значениями  $\varphi_4$  и кривыми следующее: 1 — 0.000, 2 — 0.428, 3 — 1.000, 4 — 1.500.

На рис. 3 дана взаимосвязь между потенциалами на электродах зеркала, при которых оно работает в режиме стигматической фокусировки. На рис. 4, а показано положение эффективной плоскости отражения  $z = z_B$  относительно щели между первым и вторым электродами при этих потенциалах, на рис. 4, б — положение плоскости  $z = z^*$  относительно той же щели. Рис. 5 дает представление о величине линейной дисперсии  $D$  и коэффициентов сферической аберрации  $K_1$  и  $K_4$  в этих зеркалах.

Из приведенных рисунков видно, что, изменяя только потенциалы на электродах зеркала, удается эффективно управлять его корпускулярно-оптическими свойствами. Так, при  $\varphi_4 = 0.428$  вблизи  $\varphi_3 = 0.162$  коэффициенты сферической аберрации  $K_1$  и  $K_4$  проходят через нуль, т. е. при соответствующем выборе значений потенциалов могут быть сделаны сколь угодно малыми. Следует отметить, что, как и в трехэлектродном зеркале с двухпластинными электродами, ширина второго электрода заметно влияет на величину коэффициента  $K_4$ . Если при изменении  $l_1$  слишком далеко отойти от выбранного значения  $l_1 = 1.2$ , то минимизировать одновременно коэффициенты  $K_1$  и  $K_4$  при помощи потенциалов невоз-

можно. Выбор значения  $l_2$  менее критичен. Результаты, приведенные в табл. 1, подтверждают сказанное. В этой таблице даны корпускулярно-оптические параметры зеркал с различной шириной второго и третьего электродов; по-прежнему  $\vartheta_0 = 30^\circ$ . Для каждого зеркала указан интервал значений  $\varphi_3$ , в котором при определенном  $\varphi_4$  коэффициенты  $K_1$  и  $K_4$  изменяют знак. Потенциалом  $\varphi_2$  обеспечивается стигматичность изображения. Через  $z_u$  обозначена координата точки поворота осевой траектории в поле зеркала, в табл. 1 дано расстояние  $(z_u - z_1)$  от первой щели до этой точки. Через  $b$  обозначено расстояние между центральной точкой  $P$  предмета и ее изображением  $Q$  (рис. 1). Обратим внимание, что в указанном интервале значений  $\varphi_3$  малыми оказываются не только коэффициенты сферической aberrации, но и aberrационные коэффициенты  $K_3$ ,  $M_1$ ,  $M_2$  и  $M_3$ . Сравнивая параметры зеркал с одинаковой шириной второго элект-

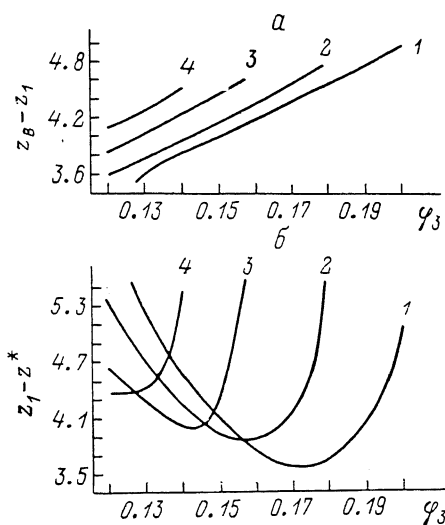


Рис. 4. Положение плоскостей  $z = z_B$  и  $z = z^*$  относительно координаты первой щели  $z = z_1$  в зависимости от потенциалов  $\varphi_3$  и  $\varphi_4$ .

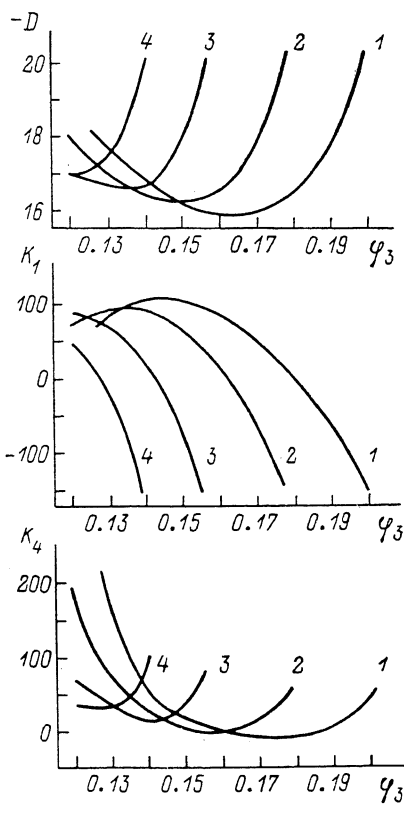


Рис. 5. Зависимость линейной дисперсии по энергии  $D$  и коэффициентов сферической aberrации  $K_1$  и  $K_4$  от потенциалов  $\varphi_3$  и  $\varphi_4$ .

трода  $l_1 = 1.20$  и различной шириной третьего электрода  $l_2 = 1.30, 1.50, 2.00$ , видим, что, несмотря на значительное изменение  $l_2$ , величины  $(z_B - z_1)$ ,  $(z^* - z_1)$  и  $b$ , определяющие положение предмета и изображения, не изменяются. Мало изменяется и линейная дисперсия  $D$ . В зеркалах с  $l_2 = 1.50$  и  $l_1 = 1.20, 1.24, 1.30$  отличие в значениях параметров  $(z_B - z_1)$ ,  $(z^* - z_1)$ ,  $b$  и  $D$  выражено сильнее. Диапазон изменения  $l_1$ , в котором достижимо требуемое качество фокусировки, сужен по сравнению с диапазоном  $l_2$ . Как показали расчеты, при  $l_1 = 1.1$  или  $1.4$  минимизировать одновременно  $K_1$  и  $K_4$  не удастся.

В табл. 2 приведены параметры зеркал, у которых третий и четвертый электроды соединены между собой и находятся под одним и тем же потенциалом  $\varphi_3 = \varphi_4$ . Напомним, что в зеркале с двухпластинными электродами для того, чтобы сохранить нужный характер симметрии поля в области движения заряженных частиц, ширина (размер в направлении оси  $z$ ) крайних электродных пластин должна быть  $\geq 2.5 d$ . На таком расстоянии от щели между электродами поле практически уже отсутствует и электродные пластины могут быть обрезаны. Замыкание указанным выше образом пластин отражающего электрода позволяет уменьшить габариты системы. В табл. 2 даны параметры зеркал

Таблица 1

$l_1$	$l_2$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi_4$	$z_B - z_1$	$z_H - z_1$	$-(z^* - z_1)$	$b$	$-D$	$10 \cdot K_1$	$10^2 \cdot K_1$	$10^3 \cdot K_6$	$-10 \cdot K_6$	$10^2 \cdot M_1$	$10^3 \cdot M_2$	$10^2 \cdot M_3$	$-10 \cdot M_4$
1.20	1.50	0.2820	0.1623	0.4280	4.42	1.10	3.89	9.60	16.6	6.0	-1.5	0.54	1.8	3.0	1.9	-0.52	2.7
		0.2821	0.1624	0.4280	4.42	1.10	3.90	9.60	16.6	-0.48	4.3	3.2	1.7	-8.3	1.7	3.1	2.7
1.20	1.30	0.2820	0.1625	0.3030	4.42	1.10	3.89	9.60	16.6	2.4	-13	-5.4	1.3	25	1.3	5.3	2.8
		0.2822	0.1626	0.3030	4.42	1.11	3.90	9.61	16.6	-4.0	3.9	-3.2	1.9	-7.7	1.9	-3.1	2.7
1.20	2.00	0.2820	0.1664	1.4250	4.42	1.10	3.89	9.60	16.6	7.0	-4.9	-1.4	1.8	9.6	1.6	1.4	2.8
		0.2821	0.1665	1.4250	4.42	1.10	3.90	9.61	16.6	-0.43	2.5	2.3	1.7	-4.9	1.7	-2.3	2.7
1.21	1.50	0.2812	0.1538	0.6650	4.40	1.10	3.89	9.57	16.6	3.4	-1.6	0.36	1.8	3.2	1.8	-0.35	2.8
		0.2813	0.1539	0.6650	4.41	1.10	3.89	9.58	16.6	-4.5	0.11	1.1	1.8	-0.18	1.6	-1.1	2.8
1.30	1.50	0.2766	0.0373	4.8145	4.31	1.07	3.87	9.45	16.4	2.9	-4.3	-2.2	1.9	8.7	-0.11	2.2	2.9
		0.2767	0.0374	4.8145	4.32	1.07	3.87	9.45	16.4	-8.0	0.70	0.30	1.8	-1.4	-0.080	-0.29	2.9

Таблица 2

$l_1$	$l_2$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$z_B - z_1$	$z_H - z_1$	$-(z^* - z_1)$	$b$	$-D$	$10 \cdot K_1$	$10^2 \cdot K_4$	$10^3 \cdot K_5$	$-10 \cdot K_6$	$10^2 \cdot K_6$	$10^3 \cdot M_1$	$10^3 \cdot M_2$	$10^2 \cdot M_3$	$-10 \cdot M_4$
1.1875	1.50	0.2833	0.1724	4.45	1.11	3.91	9.66	16.7	1.3	1.6	0.78	1.8	1.8	-3.2	-0.17	-0.77	2.8
		0.2833	0.1725	4.45	1.11	3.91	9.66	16.7	-0.045	-2.1	-1.0	1.8	1.8	4.2	-0.22	1.0	2.9
1.1870	1.00	0.2833	0.1729	4.45	1.11	3.91	9.65	16.7	3.5	-8.1	-3.6	1.8	1.8	16	5.6	3.6	2.8
		0.2835	0.1730	4.45	1.11	3.91	9.66	16.7	-3.2	2.1	1.6	1.7	1.7	-4.3	8.8	-1.6	2.8
1.1710	0.50	0.2855	0.1847	4.50	1.13	3.93	9.73	16.8	1.7	-1.4	-0.52	1.7	1.7	2.7	2.5	0.52	2.8
		0.2856	0.1848	4.50	1.13	3.93	9.73	16.9	-4.0	3.9	2.1	1.7	1.7	-7.7	2.6	-2.1	2.8

с различной шириной третьего электрода при  $\vartheta_0 = 30^\circ$ . В этом зеркале, как и в трехэлектродном зеркале с двухпластинными электродами,  $l_1$  является «рабочим» параметром и подбирается из условия минимизации абберационного коэффициента  $K_4$ . Из приведенных результатов видим, что при уменьшении  $l_2$  до 0.5 удается сохранить требуемую ситуацию, когда коэффициенты  $K_1$  и  $K_4$  изменяют знак в одном и том же диапазоне значений  $\varphi_3$ , при выборе нужных значений  $\varphi_3$  и соответствующих им значений  $\varphi_2$ . Сравнение корпускулярно-оптических параметров зеркала с  $l_2 = 1.5$  и параметров трехэлектродного зеркала с двухпластинными электродами при том же угле падения  $\vartheta_0 = 30^\circ$  (табл. 3 в [1]) показывает их полную идентичность. Очевидно, что и в других зеркалах из этой таблицы (для других значений угла падения  $\vartheta_0$ ) можно подобным образом на расстоянии  $\geq 1.5 d$  от второй щели замкнуть пластины отражающего электрода, сохранив корпускулярно-оптические параметры зеркала.

#### Список литературы

- [1] Кельман В. М. и др. // ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 11. С. 2140—2145.
- [2] Карецкая С. П., Сайченко Н. Ю. // Изв. АН КазССР. Сер. физ.-мат., 1984. № 2. С. 75—78.
- [3] Карецкая С. П., Сайченко Н. Ю. // Изв. АН КазССР. Сер. физ.-мат. 1984. № 4. С. 65—68.
- [4] Карецкая С. П., Кельман В. М., Сайченко Н. Ю. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 3. С. 580—585.
- [5] Даукеев Д. К. и др. // ЖТФ. 1985. Т. 55. № 3. С. 632—635.
- [6] Гликман Л. Г., Кельман В. М., Якушев Е. М. // ЖТФ. 1967. Т. 37. Вып. 9. С. 1720—1725.
- [7] Карецкая С. П., Федулина Л. В. // ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 4. С. 740—745.

Институт ядерной физики  
АН КазССР  
Алма-Ата

Поступило в Редакцию  
25 июля 1988 г.