

## ТРЕХЭЛЕКТРОДНЫЕ ТРАНСАКСИАЛЬНЫЕ ЗЕРКАЛА

Л. Г. Бейзина, С. П. Карецкая

Продолжается исследование диспергирующих и фокусирующих свойств трехэлектродных трансаксиальных зеркал с двухпластинными электродами. Найдены геометрические и электрические параметры таких зеркал, у которых достаточно велика угловая дисперсия по энергии, обеспечена стигматическая фокусировка объемного параллельного пучка заряженных частиц и скомпенсирована сферическая абберация второго порядка в фокальной плоскости. Выделено также множество трехэлектродных зеркал с большой линейной дисперсией по энергии, которые обеспечивают стигматическую фокусировку объемного гомоцентрического расходящегося пучка практически без сферической абберации второго порядка. Обсуждаются возможные применения и достоинства таких зеркал.

Настоящая работа продолжает начатое в [1] исследование корпускулярно-оптических свойств трехэлектродных трансаксиальных зеркал, каждый из электродов которых состоит из пары параллельных средней плоскости пластин, удаленных от нее на одно и то же расстояние  $d/2$ . Исследуются свойства зеркал с криволинейной осевой траекторией пучка заряженных частиц. Сохранены принятые ранее обозначения. При вычислениях единицей длины служит расстояние  $d$  между пластинами, образующими электрод, единицей потенциала — потенциал  $\varphi_1$  первого по ходу пучка электрода. Нормировка потенциала определяется условием: на осевой траектории в точке с потенциалом  $\Phi(r)$  кинетическая энергия заряженных частиц  $W = -e\Phi$ .

Одной из задач, решаемых в настоящем исследовании, является поиск геометрических и электрических параметров таких трехэлектродных зеркал, которые обладают достаточно высокой угловой дисперсией по энергии и обеспечивают стигматическую фокусировку высокого качества для параллельного объемного монокинетического пучка заряженных частиц. Поиск проводился путем численного моделирования на БЭСМ-6. Варьировались радиусы щелей, разделяющих соседние электроды, угол отклонения пучка, потенциалы на электродах зеркала и выбирались те совокупности значений этих параметров, при которых достигается стигматичность изображения в фокальной плоскости и компенсируется сферическая абберация второго порядка, точнее, абсолютные значения соответствующих абберационных коэффициентов становятся меньше некоторой наперед заданной величины. В табл. 1 приведены параметры вогнутых, в табл. 2 — выпуклых зеркал с такими свойствами.

Поясним смысл приведенных в табл. 1, 2 параметров. Как для вогнутых, так и для выпуклых зеркал указан меньший из радиусов двух концентрических щелей, разделяющих примыкающие друг к другу пластины соседних электродов (рис. 1). Для вогнутых зеркал — это  $R_1$  ( $R_2 > R_1$ ), для выпуклых —  $R_2$  ( $R_1 > R_2$ ). Ширина промежуточного электрода  $l = |R_2 - R_1|$ . При расчетах кольцевые щели считаются бесконечно узкими, на практике ширина их не должна превышать  $0.25 d$ . При конечной ширине щелей  $R_1, R_2$  — их средние радиусы, действительная ширина промежуточного электрода  $l = l - \delta$ , где  $\delta$  — ширина каждой из щелей.  $\alpha$  — угол отклонения осевой траектории;  $a$  — параметр, равный по величине длине перпендикуляров, опущенных из центра зеркала (точка пересечения оси симметрии поля с плоскостью симметрии) на падающий и отражен-

Т а б л и ц а 1

## Вогнутые зеркала для коллиматоров и камер

$R_1$	$\alpha$ , град	$l$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi_4$	$\alpha$	$r_{\max}$	$R_{\text{эф}}$	$-f$	$D_1'$	$-fy$	$K_1$	$-K_2$	$-K_4$	$K_5$
20	140.0	1.141	0.2014	0.0600	0.1644	8.530	21.04	24.92	8.94	0.628	8.64	9.9	0.97	-0.55	0.68
	130.0	1.130	0.2816	0.1490	0.2508	10.32	21.01	24.89	7.28	0.843	9.22	13	1.3	0.24	0.96
	120.0	1.121	0.3754	0.2520	0.3518	12.43	20.96	24.87	5.52	1.12	9.63	20	2.2	1.4	1.3
	110.0	1.113	0.4827	0.3680	0.4665	14.28	20.91	24.90	3.75	1.55	9.74	28	3.7	1.9	1.7
	100.0	1.183	0.5971	0.4659	0.5914	16.01	20.81	24.91	2.16	2.27	9.33	34	7.4	3.2	2.3
30	130.0	1.155	0.2476	0.1060	0.2202	14.54	30.99	34.41	12.3	0.474	13.4	21	1.3	1.7	0.86
	120.0	1.141	0.3359	0.2080	0.3095	17.24	30.99	34.49	10.3	0.620	13.7	22	1.3	2.1	1.1
	110.0	1.140	0.4275	0.3100	0.4077	19.76	30.95	34.46	8.18	0.797	13.8	36	2.6	4.0	1.4
	100.0	1.131	0.5297	0.4250	0.5147	22.18	30.92	34.51	5.95	1.06	13.7	46	3.6	5.2	1.7
	90.00	1.150	0.6347	0.5350	0.6264	24.42	30.86	34.54	3.79	1.47	13.0	61	6.3	5.5	2.3
50	110.0	1.171	0.4818	0.3700	0.4667	34.80	50.94	54.14	13.8	0.510	21.5	72	3.1	8.3	1.5
	90.0	1.158	0.5789	0.4840	0.5663	38.32	50.93	54.20	10.6	0.651	20.8	86	4.1	10	1.8
	80.00	1.155	0.6754	0.5940	0.6667	41.55	50.89	54.24	7.39	0.872	19.7	110	5.9	12	2.4

Т а б л и ц а 2

## Выпуклые зеркала для коллиматоров и камер

$R_2$	$-\alpha$ , град	$l$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi_4$	$\alpha$	$r_{\min}$	$R_{\text{эф}}$	$f$	$D_1'$	$-fy$	$K_1$	$K_2$	$K_4$	$-K_5$
7	90.00	1.315	0.3046	0.2067	0.2731	3.703	7.085	5.237	10.9	1.65	2.75	2.2	0.42	2.1	1.5
	80.00	1.339	0.3670	0.2729	0.3359	4.110	7.092	5.265	15.7	1.48	7.46	0.98	0.31	10	1.6
10	90.00	1.289	0.3438	0.2517	0.3154	5.666	10.09	8.013	13.6	1.38	3.18	8.0	2.0	3.8	4.8
	80.00	1.311	0.4091	0.3233	0.3822	6.240	10.09	8.146	19.0	1.27	8.58	1.3	0.36	14	1.8
20	90.00	1.253	0.4052	0.3258	0.3826	12.43	20.09	17.58	20.4	0.994	2.56	18	8.7	5.1	2.6
	80.00	1.265	0.4793	0.4043	0.4573	13.59	20.10	17.74	23.7	0.925	6.48	4.7	0.56	15	2.3
30	90.00	1.291	0.5493	0.4851	0.5301	14.63	20.10	17.86	36.1	0.905	19.6	-0.69	0.26	42	2.1
	80.00	1.246	0.5096	0.4409	0.4903	21.08	30.10	27.51	28.1	0.766	4.28	12	0.89	14	2.9
40	90.00	1.263	0.5841	0.5237	0.5666	22.66	30.10	27.66	31.6	0.740	12.1	7.0	0.76	33	2.5
	70.00	1.247	0.6086	0.5462	0.5874	30.73	40.10	37.52	36.4	0.641	8.03	14	0.99	29	3.0
50	70.00	1.238	0.6156	0.5611	0.6008	38.83	50.10	47.41	39.8	0.578	5.60	15	0.85	27	3.7

ный осевые лучи или на их продолжения. Знак параметра  $a$  определяет направление движения частиц в поле зеркала. Расчеты проводились для  $a > 0$ ; при этом в вогнутом зеркале движение частиц происходит против часовой стрелки,  $a > 0$ , в выпуклом — по часовой стрелке,  $a < 0$ .  $\varphi_2$  и  $\varphi_3$  — потенциалы на втором и третьем электродах зеркала,  $\varphi_u$  — потенциал в точке поворота осевой траектории,  $\varphi_u = (a/r_u)^2$ , где  $r_u$  — расстояние этой точки от центра зеркала. Для вогнутого зеркала точкой поворота является точка, наиболее удаленная от центра,  $r_u = r_{\max}$ ; для выпуклого — точка, ближайшая к центру,  $r_u = r_{\min}$ . Величины  $r_{\max}$  и  $r_{\min}$  дают представление о глубине проникновения частиц в поле зеркала,  $\varphi_u$  — о степени их торможения.  $R_{\text{эф}}$  — радиус эффективной поверхности отражения,  $R_{\text{эф}} = |a| / \cos(\alpha/2)$ .  $f$  и  $f_y$  — фокусные расстояния, определяющие фокусирующие свойства зеркала в горизонтальном (параллельном средней плоскости) и вертикальном направлениях. Они считаются положительными, если

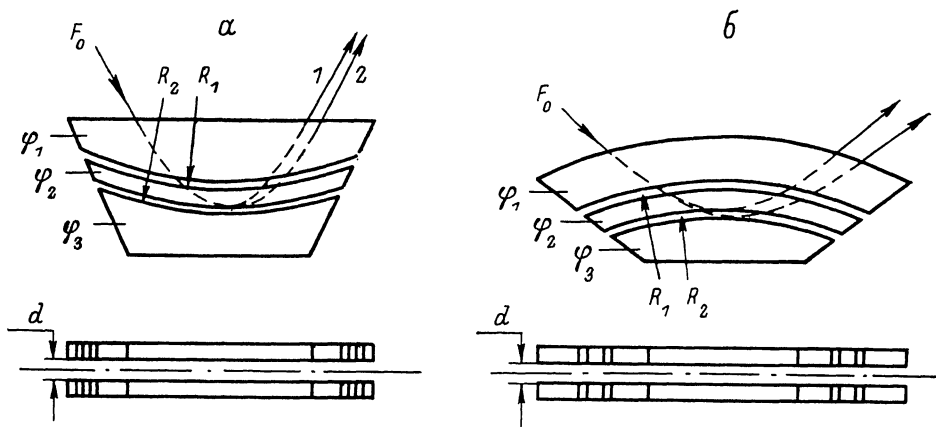


Рис. 1. Зеркальные объективы с дисперсией по энергии на основе вогнутого (а) и выпуклого (б) трансаксиальных зеркал.

1, 2 — траектории частиц с различной энергией. Энергия частиц, движущихся по траекториям 2, на 5% превышает основную энергию (1). а:  $R_1 = 20$ ,  $\alpha = 120^\circ$ ,  $\alpha = 12.43$ ,  $f = -5.52$ ,  $D'_1 = 1.12$ ; б:  $R_2 = 20$ ,  $\alpha = 80^\circ$ ,  $\alpha = -13.59$ ,  $f = 23.7$ ,  $D'_1 = -0.925$ .

при перемещении вдоль осевой траектории в предметном пространстве сначала идет фокус, потом главная точка, в пространстве изображений — сначала главная точка, потом фокус, и отрицательными при обратном расположении главных точек и фокусов. Зная  $f$ , нетрудно найти положение фокусов  $F_0$  и  $F_1$ , так как в средней плоскости любого трансаксиального зеркала положение главных плоскостей  $\mathcal{H}_0$  и  $\mathcal{H}_1$  всегда известно: они проходят через центр зеркала перпендикулярно к падающему и отраженному осевым лучам. У зеркал из табл. 1, 2 фокус  $F_{y0}$  совмещен с  $F_0$ ,  $F_{y1}$  с  $F_1$ ;  $D'_1$  — значение угловой дисперсии по энергии в пространстве изображений;  $K_1, K_2, K_4, K_5$  — значения абберационных коэффициентов в фокальной плоскости пространства изображений. Коэффициенты сферической абберации  $K_3$  и  $K_6$  в фокальной плоскости для всех зеркал из табл. 1, 2 по величине меньше, чем  $1 \cdot 10^{-2}$ . Используя приведенные в таблицах данные, можно вычислить координаты  $x_F, y_F$  точки, в которой траектория, близкая к осевой, пересекает фокальную плоскость пространства изображений, по формулам

$$x_{F_1} = x'_a f + D'_1 f \frac{e}{\varphi_1} + K_1 x_a'^2 + K_2 x_a' x_a + K_3 x_a^2 + K_4 y_a'^2 + K_5 y_a' y_a + K_6 y_a^2,$$

$$y_{F_1} = y'_a f.$$

Здесь  $x_a, y_a, x'_a, y'_a$  — линейные и угловые координаты смежной траектории при входе в поле зеркала. Считается, что поле начинается при  $r = r_a = R_1 - 3$  в вогнутом и при  $r = r_a = R_1 + 3$  в выпуклом зеркалах. Кинетическая энергия частицы, движущейся по этой траектории в предметном пространстве,  $W = -e(\varphi_1 + e)$ .

Таблица 3

## Вогнутые зеркала для энергоанализаторов

$R_1$	$\alpha$ , град	$l$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi_4$	$\alpha$	$r_{\max}$	$R_{\text{эф}}$	$-f$	$-D_1$	$-f/y$	$10^3 K_2$	$-10^3 K_3$	$10^3 K_5$	$-K_6$
20	120.0	1.117	0.3931	0.2846	0.3651	12.70	21.02	25.40	4.85	13.7	2.67	2.4	13	-1.2	0.23
	110.0	1.085	0.5077	0.4079	0.4846	14.59	20.96	25.45	3.18	12.2	3.42	6.3	36	-0.81	0.25
30	120.0	1.145	0.3477	0.2382	0.3175	17.50	31.06	34.99	9.47	15.1	2.49	2.2	4.5	0.83	0.21
	110.0	1.126	0.4436	0.3417	0.4173	20.04	31.02	34.93	7.45	14.5	3.47	4.6	9.1	1.9	0.21
50	100.0	1.103	0.5472	0.4564	0.5256	22.46	30.98	34.96	5.31	13.4	4.36	7.6	20	-1.7	0.24
	90.00	1.070	0.6802	0.5826	0.6441	24.82	30.92	35.10	3.15	11.5	4.98	17	63	-1.7	0.24
50	120.0	1.163	0.3190	0.2089	0.2875	27.39	51.08	54.75	18.4	15.9	2.32	2.6	2.0	1.8	0.20
	110.0	1.150	0.4049	0.3014	0.3768	31.34	51.05	54.64	15.8	15.9	3.40	4.0	3.1	2.3	0.19
50	100.0	1.137	0.4969	0.4038	0.4728	35.09	51.03	54.60	13.0	15.7	4.57	6.6	5.3	2.2	0.18
	90.00	1.121	0.5928	0.5125	0.5732	38.61	51.00	54.61	9.85	15.0	5.72	9.9	10	0.55	0.17
50	80.00	1.098	0.6904	0.6239	0.6754	41.88	50.96	54.67	6.64	13.6	6.67	18	24	-1.5	0.18

Таблица 4

## Выпуклые зеркала для энергоанализаторов

$R_2$	$\alpha$ , град	$l$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi_4$	$\alpha$	$r_{\min}$	$R_{\text{эф}}$	$f$	$D_1$	$-f/y$	$10^3 K_2$	$-10^3 K_3$	$10^3 K_5$	$10^3 K_6$
7	90.00	1.313	0.3124	0.2052	0.2771	3.730	7.086	5.275	8.55	25.8	4.41	-1.1	13	-8.9	11
	80.00	1.339	0.3684	0.2727	0.3372	4.118	7.092	5.376	13.9	40.1	9.73	-1.2	5.3	-8.6	6.4
10	110.0	1.270	0.2350	0.1226	0.1974	4.472	10.07	7.796	7.10	18.6	1.65	3.1	22	-13	7.1
	100.0	1.272	0.2923	0.1824	0.2567	5.107	10.08	7.945	8.40	21.3	3.03	1.5	18	9.8	14
30	90.00	1.286	0.3512	0.2501	0.3191	5.699	10.09	8.061	10.9	27.4	5.63	1.0	12	2.5	10
	80.00	1.311	0.4113	0.3229	0.3834	6.250	10.09	8.159	17.0	42.0	11.7	5.2	5.4	-1.3	5.9
30	110.0	1.215	0.3041	0.1949	0.2707	15.65	30.08	27.30	16.4	18.5	2.66	6.7	14	-15	17
	100.0	1.217	0.3732	0.2718	0.3431	17.62	30.09	27.42	17.5	20.9	4.31	7.2	14	-8.1	14
50	90.00	1.226	0.4442	0.3542	0.4179	19.45	30.10	27.51	19.4	24.8	6.85	9.2	13	-32	11
	80.00	1.240	0.5156	0.4390	0.4933	21.14	30.10	27.60	23.1	31.4	11.2	15	9.6	-11	7.4
50	120.0	1.209	0.2550	0.1439	0.2203	23.50	50.07	46.99	24.7	17.2	1.74	11	9.6	17	14
	110.0	1.202	0.3240	0.2160	0.2917	27.05	50.08	47.15	24.9	18.2	2.88	15	11	-67	17
50	100.0	1.202	0.3966	0.2972	0.3677	30.38	50.09	47.28	25.4	20.2	4.49	17	12	-72	14
	90.00	1.208	0.4715	0.3638	0.4465	33.48	50.10	47.34	26.5	23.0	6.80	22	12	-54	11
50	80.00	1.217	0.5466	0.4723	0.5256	36.32	50.10	47.42	28.8	27.3	10.3	26	10	-47	8.5
	70.00	1.232	0.6199	0.5596	0.6029	38.90	50.10	47.49	33.6	34.6	16.4	26	8.1	-33	6.0

Выпуклые зеркала для энергоанализаторов ( $\Phi$  ( $r$ )) рассчитывались по формуле (2) работы [1]

$R_2$	$-\alpha$ , град	$l$	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi_4$	$\alpha$	$r_{\min}$	$R_{\text{эф}}$	$f$	$D_1$	$-f/y$	$10^4 K_2$	$-10^3 K_3$	$10^2 K_5$	$10^2 K_6$
40	440.0	1.278	0.2336	0.1225	0.1975	0.472	10.06	7.787	7.13	18.8	1.64	7.5	22	1.7	7.6	
	99.9	1.280	0.2910	0.1823	0.2569	5.407	10.08	7.937	8.45	24.5	3.00	3.2	18	5.7	14	
	89.9	1.294	0.3503	0.2499	0.3194	5.699	10.08	8.054	10.9	27.3	5.67	4.4	12	-2.4	10	
	79.9	1.319	0.4405	0.3229	0.3837	6.280	10.09	8.153	17.0	42.2	11.7	9.5	5.3	2.1	5.9	
5	89.7	1.359	0.2716	0.1593	0.2351	2.460	5.074	3.472	6.41	23.0	3.07	-0.12	15	-0.10	10	
	79.7	1.383	0.3244	0.2242	0.2915	2.745	5.083	3.575	10.3	34.1	6.82	-3.9	6.5	2.1	7.8	
3.5	79.5	1.428	0.2778	0.1639	0.2407	1.756	3.579	2.284	6.64	25.8	3.89	7.9	9.9	-7.5	8.3	

Координата  $x_F$  определена с учетом геометрических aberrаций второго порядка, координата  $y_F$  — в параксиальном приближении. Напомним, что  $x_a$ ,  $x_F$  — отклонения от осевой траектории в направлении нормали к ней,  $y_a$ ,  $y_F$  — бинормали.

Трехэлектродные трансаксиальные зеркала из табл. 1, 2 образуют множество зеркальных объективов с дисперсией по энергии, пригодных для использования в коллиматорах и камерах спектрометров различного назначения. В этом множестве широк диапазон изменения значений  $\alpha$ ,  $f$  и  $D_1$ , вогнутые и выпуклые зеркала взаимно дополняют друг друга. При одинаковых значениях  $D_1$  фокусное расстояние  $f$  в вогнутом зеркале всегда меньше, чем в выпуклом, причем это отличие может быть весьма значительным. Все вогнутые зеркала из табл. 1 отклоняют частицы с большей энергией на больший угол, выпуклые из табл. 2 — на меньший. Иллюстрацией сказанного служит рис. 1, на котором показаны электродные системы вогнутого и выпуклого зеркал в двух проекциях, а также траектории частиц с различной энергией. Эти зеркала имеют близкие по величине угловые дисперсии, но сильно отличающиеся фокусные расстояния (при одинаковом  $d$ ), в выпуклом зеркале  $|f|$  в 4.3 раза больше, чем в вогнутом. Интересно, что при большем фокусном расстоянии фокальные плоскости в выпуклом зеркале расположены ближе к электродам, чем в вогнутом. Это важно как для уменьшения габаритов, так и для увеличения светосилы приборов, в которых могут быть использованы такие зеркала.

Второй задачей данного исследования был поиск геометрических и электрических параметров трехэлектродных трансаксиальных зеркал с большой линейной дисперсией, которые обеспечивают стигматическую фокусировку высокого качества для объемного расходящегося гомоцентрического пучка заряженных частиц. Рассматривался случай, когда предмет и его изображение расположены на расстояниях  $2f$  от соответствующих главных плоскостей зеркала, в так называемых антиглавных плоскостях. При таком расположении предмета и изображения линейное увеличение в средней плоскости равно 1. Параметры зеркал с требуемыми свойствами приведены в табл. 3—5. С помощью БЭСМ-6 для заданных  $R_1$ ,  $R_2$  и  $\alpha$  (в табл. 5 — для заданных  $R_2$ ,  $\alpha$ ) подбирались такие значения  $l$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$ , при которых изображение становится стигматическим, а коэффициенты сферической aberrации  $K_1$  и  $K_4$  достаточно малыми.

Координаты  $x_1$ ,  $y_1$  точки, в которой

близкая к осевой траектория пучка пересекает плоскость изображения, для зеркал из табл. 3—5 определяются формулами

$$x_1 = -x_0 + D_1 \frac{\varepsilon}{r_1} + K_1 x_0'^2 + K_2 x_0' x_0 + K_3 x_0^2 + K_4 y_0'^2 + K_5 y_0' y_0 + K_6 y_0^2,$$

$$y_1 = y_0 H_1.$$

Координата  $x_1$  определена здесь с точностью до геометрических aberrаций второго порядка, координата  $y_1$  — в паракиральном приближении. Величина  $\varepsilon$  задает отклонение кинетической энергии частицы, движущейся по этой траектории, от основной энергии;  $x_0, y_0, x_0', y_0'$  — линейные и угловые координаты траектории в предметной плоскости. Для всех зеркал из табл. 3—5 линейное увеличение в  $y$ -направлении  $H_1=1$ , т. е. при достижении стигматичности антиглавные плоскости  $x$ -направления оказываются совмещенными с главными пло-

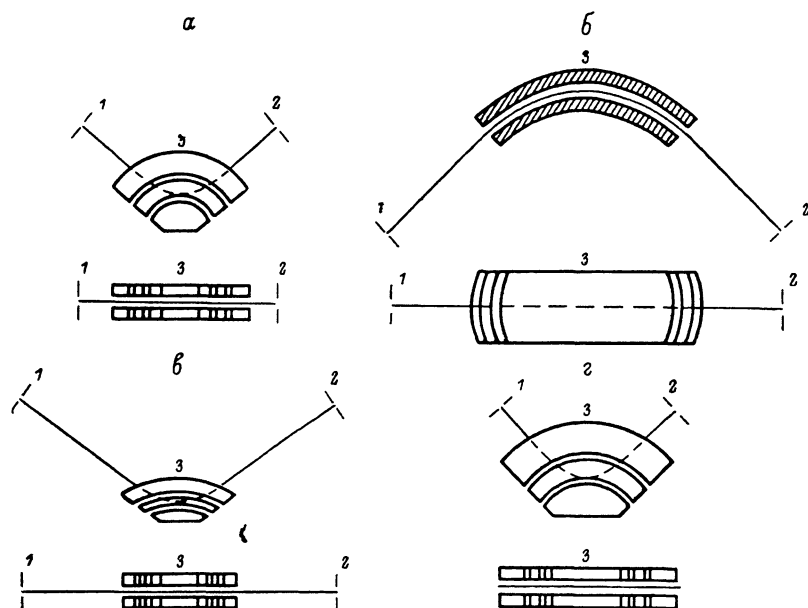


Рис. 2. Энергоанализаторы на основе выпуклых трансаксиальных зеркал (а, в, г) и сферический дефлектор (б).

1 — выходная щель источника, 2 — входная щель приемника, 3 — электродная система энергоанализатора. а:  $R_2=3.5$ ,  $\alpha=79.5^\circ$ ,  $D_1=-25.8d$ ; б:  $\psi_c=90^\circ$ ,  $D_1=2 \rho$ .  $\psi_c$  — угол сферического сектора,  $\rho$  — радиус осевой траектории в поле дефлектора; в:  $R_2=10$ ,  $\alpha=79.9^\circ$ ,  $D_1=-42.2d$ ; г:  $R_2=5$ ,  $\alpha=89.7^\circ$ ,  $D_1=-23.0d$ .

состями  $y$ -направления; коэффициенты сферической aberrации  $|K_1| \leq 5 \times 10^{-3}$ ,  $|K_4| \leq 8 \cdot 10^{-3}$ ; значения линейной дисперсии по энергии  $D_1=2D_1'f$  и aberrационных коэффициентов  $K_2, K_3, K_5, K_6$  в плоскости изображения приведены в табл. 3—5. Кроме того, даны значения параметров  $a, r_{\max} (r_{\min}), \varphi_u, R_{3\phi}, f, f_y$ , о смысле которых уже говорилось выше.

Результаты табл. 1—4 получены с применением при расчете распределения потенциала  $\Phi(r)$  в средней плоскости зеркала формул (1) работы [1], результаты табл. 5 — более точных формул (2) той же работы. Сравнение данных табл. 5 и 4 для  $R_2=10$  и одинаковых значений параметра  $a$  показывает, насколько изменяются значения  $\alpha, l, \varphi_2, \varphi_3$  и корпускулярно-оптические параметры зеркала при замене формул (2) на (1). Для больших значений  $R_2$  наблюдается лучшее совпадение результатов. Для  $R_2 < 10$  расхождение становится более значительным, поэтому для малых  $R_2$  следует пользоваться формулами (2). В табл. 5 приведены также параметры зеркал с  $R_2=5$  и 3.5.

Зеркала, параметры которых даны в табл. 3—5, могут быть использованы в качестве энергоанализаторов, а также в масс-спектрометрах с промежуточным изображением для осуществления фокусировки ионов по энергии. В последнем случае с их помощью можно компенсировать и сферическую aberrацию магнит-

ного анализатора — достаточно несколько изменить потенциалы на втором и третьем электродах зеркала. Привлекает разнообразие свойств найденных зеркал: можно выбрать угол отклонения пучка, габариты зеркала, расстояние от входной и выходной щелей до электродной системы. Линейная дисперсия по энергии особенно больших значений достигает в выпуклых зеркалах, для многих из них значения  $D_1$  лежат в интервале  $25d-42d$ . Зеркала просты конструктивно и технологичны в изготовлении. Требуемые корпускулярно-оптические свойства реализуются для них очень легко. Возможна электрическая регулировка параметров.

Для сравнения на рис. 2 показаны в двух проекциях три энергоанализатора на основе различных трехэлектродных трансаксиальных выпуклых зеркал (*a*, *в*, *г*) и энергоанализатор типа сферического дефлектора (*б*). Линейная дисперсия по энергии у всех этих анализаторов одинакова. Этот рисунок выполнен в масштабе и дает представление о габаритах различных систем. Сферическая абберрация второго порядка во всех зеркалах практически устранена, коэффициенты  $K_1 \leq 5 \cdot 10^{-3} d$ ,  $K_4 \leq 5 \cdot 10^{-3} d$ ; в сферическом дефлекторе  $K_1 = -6\rho$ ,  $K_4 = \rho$  [2].

#### Литература

- [1] Бейзина Л. Г., Карецкая С. П. ЖТФ, 1988, т. 58, в. 5, с. 877—883.  
[2] Афанасьев В. П., Явор С. Я. Электростатические энергоанализаторы для пучков заряженных частиц. М.: Наука, 1978, с. 124—143.

Институт ядерной физики  
АН КазССР  
Алма-Ата

Поступило в Редакцию  
25 марта 1987 г.