

УДК 537.533.32

КОРПУСКУЛЯРНО-ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТРЕХЭЛЕКТРОДНЫХ ТРАНСАКСИАЛЬНЫХ ЗЕРКАЛ

Л. Г. Бейзина, С. П. Карецкая

Исследуются диспергирующие и фокусирующие свойства электростатических трансаксиальных трехэлектродных зеркал с двухпластинными электродами. Вычисляются значения радиуса эффективной поверхности отражения, фокусных расстояний горизонтального и вертикального направлений, астигматической разности, угловой дисперсии по энергии, коэффициентов сферической аберрации. Анализируется влияние ширины промежуточного электрода и его потенциала на корпускулярно-оптические параметры зеркал.

В работах [1-4] приведены результаты выполненных ранее исследований корпускулярно-оптических свойств двухэлектродных трансаксиальных зеркал. Речь идет о зеркалах, каждый из двух электродов которых образован двумя идентичными параллельными пластинами, расположенными на расстоянии $d/2$ от средней плоскости. Пластины соседних электродов разделены щелями, имеющими вид частей соосных колец, ширина которых не превышает $0.25 d$. Рассматривается случай криволинейной осевой траектории пучка заряженных частиц, входящих в поле зеркала под большим углом к радиальному направлению. Эти исследования показали, что двухэлектродное трансаксиальное зеркало с плоскими электродами легко справляется со многими задачами преобразования пучков заряженных частиц. В широких пределах изменяются фокусное расстояние f и угловая дисперсия D'_1 таких зеркал, может быть обеспечена объемная стигматическая фокусировка и скомпенсирована сферическая аберрация второго порядка при отклонении заряженных частиц без разделения их по энергии. Однако в ряде важных для практических приложений случаев качество фокусировки оставляет желать лучшего. Так, в двухэлектродном зеркале с достаточно большой угловой дисперсией невозможно сфокусировать объемный параллельный пучок в точку и одновременно скомпенсировать сферическую аберрацию второго порядка; невозможным оказывается также и создание на их основе светосильных энергоанализаторов. Стремление уйти от названных ограничений побудило авторов продолжить исследования и рассмотреть корпускулярно-оптические свойства трехэлектродных трансаксиальных зеркал.

На рис. 1 даны аксонометрические изображения электродных систем, а также показаны осевые траектории и положение кардинальных элементов в средней плоскости рассматриваемых здесь трехэлектродных вогнутых и выпуклых зеркал. В вогнутом зеркале (рис. 1, а, а') заряженные частицы входят в поле с той стороны, где находится центр зеркала O . Последний представляет собой точку пересечения оси симметрии с плоскостью симметрии электрического поля, которая совпадает со средней плоскостью зеркала. В выпуклом зеркале (рис. 1, б, б') частицы входят в поле с противоположной стороны. Как в вогнутом, так и в выпуклом зеркалах потенциал первого по ходу пучка электрода обозначен через φ_1 , второго — φ_2 , третьего — φ_3 ; средние радиусы щелей, разделяющих соседние электроды, обозначены через R_1 и R_2 , причем в вогнутом зеркале $R_1 < R_2$, в выпуклом $R_1 > R_2$. Используется система естественных координат x, y, s , ось s которой совпадает с осевой траекторией пучка, ось x

направлена по нормали к ней, y — по бинормали. Сохранены принятые в [1-4] обозначения. Главная плоскость $s=\mathcal{H}_0$ и совпадающая с ней узловая плоскость $s=N_0$ предметного пространства проходят через центр зеркала O перпендикулярно к начальному участку осевой траектории, главная $s=\mathcal{H}_1$ и узловая $s=N_1$ плоскости пространства изображений проходят через центр O перпендикулярно к конечному участку осевой траектории. $s=F_0$ и $s=F_1$ — фокальные плоскости предметного пространства и пространства изображений, f — фокусные расстояния. И в вогнутых, и в выпуклых зеркалах считается, что $f > 0$, если фокусы F_0 и F_1 расположены левее соответствующих главных плоскостей \mathcal{H}_0 и \mathcal{H}_1 ; если же F_0 и F_1 лежат правее \mathcal{H}_0 и \mathcal{H}_1 , то $f < 0$. α — угол отклонения осевой траектории, $R_{эф}$ — радиус эффективной поверхности отражения, $R_{эф} = |a|/\cos(\alpha/2)$. Постоянная a по величине равна длине перпендикуляров,

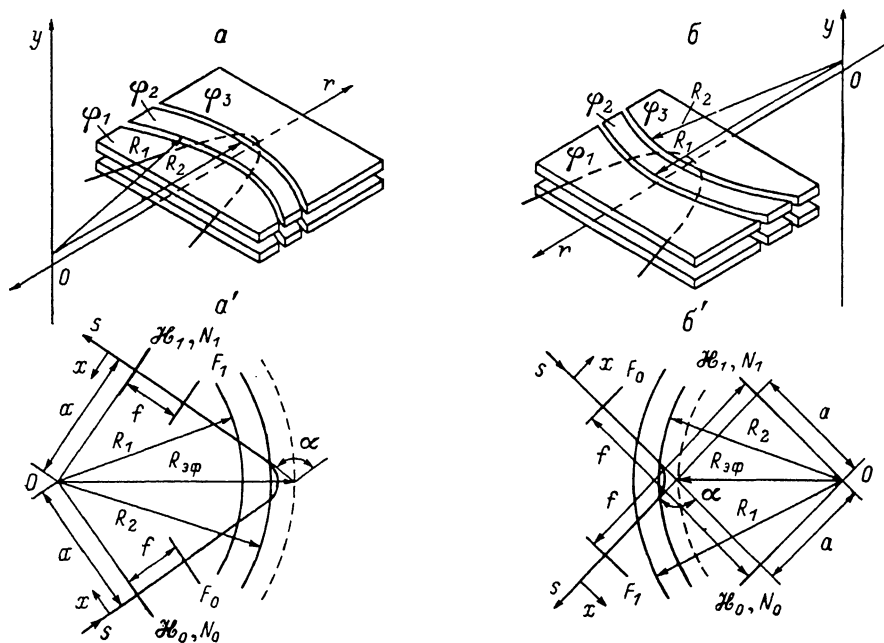


Рис. 1. Трехэлектродные трансаксиальные зеркала с плоскими электродами.

a' , $б'$: само зеркало изображено схематически в виде дуг окружностей с радиусами R_1 и R_2 .

опущенных из центра на прямолинейные участки осевой траектории до входа в поле зеркала и после выхода из него. Знак постоянной a определяет направление движения: при положительных a в вогнутом зеркале движение происходит против часовой стрелки, в выпуклом — по часовой стрелке. Вычисления проводились для $a > 0$. За единицу длины принято расстояние d между пластинами, образующими электрод, за единицу потенциала — потенциал φ_1 первого по ходу пучка электрода. Нормировка потенциала определяется условием, что у частиц, движущихся по осевой траектории, в точке с потенциалом Φ кинетическая энергия $W = -e\Phi$.

Корпускулярно-оптические параметры зеркал рассчитывались по формулам, приведенным в [1, 5]. Потенциал в текущей точке осевой траектории, удаленной от центра O на расстояние r , вычислялся по следующим формулам для вогнутого и выпуклого зеркал соответственно:

$$\Phi(r) = \frac{\varphi_1 + \varphi_3}{2} + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\pi} \operatorname{arc\,tg\,sh} \frac{\pi(r - R_1)}{d} + \frac{\varphi_3 - \varphi_2}{\pi} \operatorname{arc\,tg\,sh} \frac{\pi(r - R_2)}{d},$$

$$\Phi(r) = \frac{\varphi_1 + \varphi_3}{2} + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\pi} \operatorname{arc\,tg\,sh} \frac{\pi(r - R_2)}{d} + \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{\pi} \operatorname{arc\,tg\,sh} \frac{\pi(r - R_1)}{d}. \quad (1)$$

Формулы (1) определяют значения $\Phi(r)$ приближенно. Для некоторых значений потенциалов на электродах зеркала с целью проверки достоверности такой аппроксимации $\Phi(r)$ определялось по точным формулам [6] для вогнутого и выпуклого зеркал соответственно

$$\Phi(r) = \varphi_3 + (\varphi_1 - \varphi_2) R_1 \int_0^{\infty} \frac{I_1(\lambda R_1)}{\operatorname{ch} \frac{\lambda d}{2}} I_0(\lambda r) d\lambda + (\varphi_2 - \varphi_3) R_2 \int_0^{\infty} \frac{I_1(\lambda R_2)}{\operatorname{ch} \frac{\lambda d}{2}} I_0(\lambda r) d\lambda,$$

$$\Phi(r) = \varphi_1 + (\varphi_3 - \varphi_2) R_1 \int_0^{\infty} \frac{I_1(\lambda R_1)}{\operatorname{ch} \frac{\lambda d}{2}} I_0(\lambda r) d\lambda + (\varphi_2 - \varphi_1) R_2 \int_0^{\infty} \frac{I_1(\lambda R_2)}{\operatorname{ch} \frac{\lambda d}{2}} I_0(\lambda r) d\lambda, \quad (2)$$

где I_0, I_1 — функции Бесселя 1-го рода нулевого и первого порядков. Расхождение между результатами, полученными с применением формул (1) и (2) для рассматриваемых здесь зеркал, не выходит за пределы 1%. Следует помнить, что при выводе как (1), так и (2) было сделано допущение, что ширина щелей между пластинами соседних электродов $\delta=0$.

С помощью БЭСМ-6 фокусирующие и диспергирующие свойства вогнутых и выпуклых трехэлектродных зеркал исследованы в широком интервале изменения их геометрических и электрических параметров: $R_1, l=|R_2-R_1|, \alpha, \varphi_2, \varphi_3$. Часть этого материала, ограниченная допустимыми размерами статьи, приведена на последующих рисунках и в таблицах. Они дают представление только о влиянии ширины промежуточного электрода и потенциала на нем на корпускулярно-оптические свойства зеркала. Однако делаемые в статье выводы учитывают весь полученный материал.

В табл. 1, 2 и на рис. 2—4 приведены результаты расчетов вогнутых и выпуклых зеркал с $R_1=20, a/R_1=0.6$ и $\varphi_3=0.25$ для трех значений ширины промежуточного электрода $l=1.2, 1.5$ и 2.0 при изменении φ_2 в диапазоне от 0.16 до 0.50 для вогнутых и от 0.21 до 0.55 для выпуклых зеркал. В табл. 1, 2 даны значения $R_{эф}, \alpha$ и величины, характеризующей глубину проникновения частиц в поле зеркала, — координаты вершины осевой траектории относительно

Т а б л и ц а 1

Вогнутое зеркало. Параметры осевой траектории. $R_1=20, a/R_1=0.6, \varphi_3=0.25$

φ_2	$l=1.2$			$l=1.5$			$l=2.0$		
	$R_{эф}$	r_{\max}	α , град	$R_{эф}$	r_{\max}	α , град	$R_{эф}$	r_{\max}	α , град
0.16	21.51	20.32	112.2	21.49	20.32	112.1	21.49	20.32	112.1
0.18	21.66	20.36	112.7	21.63	20.35	112.6	21.60	20.35	112.5
0.20	21.80	20.39	113.2	21.77	20.39	113.1	21.77	20.39	113.1
0.22	22.00	20.44	113.9	21.97	20.43	113.8	21.97	20.43	113.8
0.24	22.27	20.49	114.8	22.27	20.49	114.8	22.27	20.49	114.8
0.26	22.66	20.55	116.1	22.68	20.56	116.1	22.71	20.56	116.2
0.28	23.23	20.64	117.8	23.37	20.65	118.2	23.47	20.66	118.5
0.30	24.15	20.75	120.4	24.83	20.80	122.2	25.48	20.83	123.8
0.31	24.71	20.82	121.9	26.30	20.91	125.7	30.21	21.03	133.2
0.32	25.31	20.89	123.4	28.39	21.06	130.1	37.44	21.69	159.5
0.33	25.77	20.97	124.5	29.91	21.21	132.7	45.19	21.88	149.2
0.34	26.08	21.04	125.2	29.91	21.32	132.7	39.69	21.97	144.8
0.35	26.21	21.09	125.5	29.56	21.41	132.1	36.86	22.04	142.0
0.36	26.25	21.15	125.6	29.16	21.47	131.4	35.25	22.10	140.2
0.37	26.21	21.19	125.5	28.83	21.52	130.8	34.19	22.15	138.9
0.38	26.16	21.23	125.4	28.50	21.56	130.2	33.33	22.19	137.8
0.40	26.03	21.29	125.1	28.08	21.63	129.4	32.24	20.25	136.3
0.42	25.94	21.35	124.9	27.72	21.69	128.7	31.56	20.31	135.3
0.44	25.86	21.39	124.7	27.47	21.74	128.2	31.03	20.36	134.5
0.46	25.77	21.43	124.5	27.28	21.78	127.8	30.65	20.40	133.9
0.48	25.69	21.47	124.3	27.13	21.82	127.5	30.34	20.44	133.4
0.50	25.60	21.50	124.1	26.99	21.85	127.2	30.09	20.48	133.0

Выпуклое зеркало. Параметры осевой траектории. $R_1 = 20$, $a/R_1 = 0.6$, $\varphi_3 = 0.25$

φ_2	$l = 1.2$			$l = 1.5$			$l = 2.0$		
	$R_{\varphi\phi}$	r_{\min}	$-\alpha$, град	$R_{\varphi\phi}$	r_{\min}	$-\alpha$, град	$R_{\varphi\phi}$	r_{\min}	$-\alpha$, град
0.21	18.68	19.65	100.1	18.62	19.65	100.1	18.70	19.65	100.1
0.22	18.64	19.63	99.86	18.65	19.64	99.89	18.65	19.64	99.91
0.24	18.54	19.60	99.33	18.55	19.60	99.37	18.55	19.60	99.38
0.26	18.43	19.56	98.75	18.43	19.56	98.75	18.43	19.56	98.74
0.28	18.30	19.52	98.07	18.29	19.52	97.98	18.28	19.51	97.94
0.30	18.15	19.47	97.23	18.11	19.46	97.02	18.09	19.46	96.92
0.32	17.98	19.42	96.25	17.90	19.40	95.82	17.86	19.39	95.57
0.34	17.78	19.35	95.14	17.64	19.32	94.30	17.55	19.31	93.73
0.36	17.59	19.28	93.96	17.34	19.23	92.42	17.14	19.20	91.13
0.38	17.41	19.21	92.87	17.03	19.13	90.37	16.62	19.05	87.53
0.40	17.28	19.14	92.05	16.77	19.01	88.64	16.06	18.87	83.33
0.42	17.20	19.07	91.55	16.63	18.91	87.65	15.71	18.68	80.35
0.43	17.18	19.04	91.49	16.60	18.86	87.44	15.63	18.59	79.73
0.44	17.17	19.01	91.32	16.59	18.82	87.36	15.61	18.52	79.57
0.45	17.16	18.99	91.29	16.60	18.78	87.38	15.63	18.45	79.71
0.46	17.16	18.96	91.28	16.61	18.75	87.47	15.67	18.40	80.03
0.47	17.17	18.94	91.31	16.63	18.72	87.61	15.71	18.35	80.43
0.48	17.17	18.92	91.35	16.65	18.69	87.77	15.77	18.31	80.88
0.49	17.18	18.90	91.40	16.67	18.67	87.94	15.82	18.28	81.33
0.50	17.19	18.88	91.47	16.70	18.64	88.12	15.87	18.25	81.77
0.51	17.20	18.86	91.54	16.72	18.62	88.30	15.92	18.22	82.20
0.52	17.21	18.85	91.62	16.75	18.60	88.48	15.97	18.19	82.69
0.53	17.23	18.83	91.70	16.77	18.58	88.66	16.02	18.17	83.00
0.55	17.25	18.80	91.81	16.82	18.55	88.99	16.11	18.13	83.71

центра O : $r = r_{\max}$ для вогнутых, $r = r_{\min}$ для выпуклых зеркал. На рис. 2 представлены в зависимости от φ_2 значения фокусного расстояния f , угловой дисперсии D'_1 в средней плоскости и фокусного расстояния f_y в направлении, перпендикулярном к средней плоскости, а на рис. 3 — значения величины $H [s(F_1)]$, которая определяет положение фокуса F_y относительно F_i ($i=0, 1$), т. е. астigmatическую разность

$$\Delta_F = s(F_{y1}) - s(F_1) = s(F_0) - s(F_{y0}) = f_y \cdot H [s(F_1)],$$

и значения коэффициентов сферической абберации K_3 и K_6 в плоскости $s = s(F_1)$. Последние дают возможность найти сферическую абберацию в фокальной плоскости по формуле

$$\Delta_{\phi}(F_1) = K_3 x_0^2 + K_6 y_0^2,$$

x_0 и y_0 — полуширина и полувысота падающего на зеркало параллельного пучка частиц. Рис. 2, $a-v$ и 3, $a-v$ относятся к вогнутым зеркалам, а рис. 2, $a'-v'$ и 3, $a'-v'$ к выпуклым; $l=1.2$ (1), 1.5 (2), 2.0 (3); штриховыми прямыми отмечены значения соответствующих корпускулярно-оптических параметров двухэлектродного вогнутого (на рис. 2, $a-v$ и 3, $a-v$) или выпуклого (на рис. 2, $a'-v'$ и 3, $a'-v'$) зеркала с $R_1 = 20$, $a/R_1 = 0.6$, $\varphi_2 = 0.25$.

Обратим внимание на рис. 4, демонстрирующий, как изменяется вид осевой траектории и перемещаются фокусы F_0 и F_1 по мере увеличения глубины проникновения частиц в поле трехэлектродного зеркала. Из рис. 4, b, z (вогнутое зеркало) и 4, b', z' (выпуклое зеркало) видно, что фокусы уходят на бесконечность, зеркало становится телескопической системой.

Проанализируем приведенные на рис. 2, 3 результаты. Отметим прежде всего, что ширина промежуточного электрода l и его потенциал φ_2 весьма эффективно влияют на корпускулярно-оптические параметры зеркала. С увеличением l от 1.2 до 2.0 диапазон их изменения заметно расширяется как в вогнутых, так и в выпуклых зеркалах. При l , больших некоторого значения, появляются телескопические системы: при двух значениях φ_2 фокусное расстояние f становится бесконечно большим. При других φ_2 f принимает очень малые

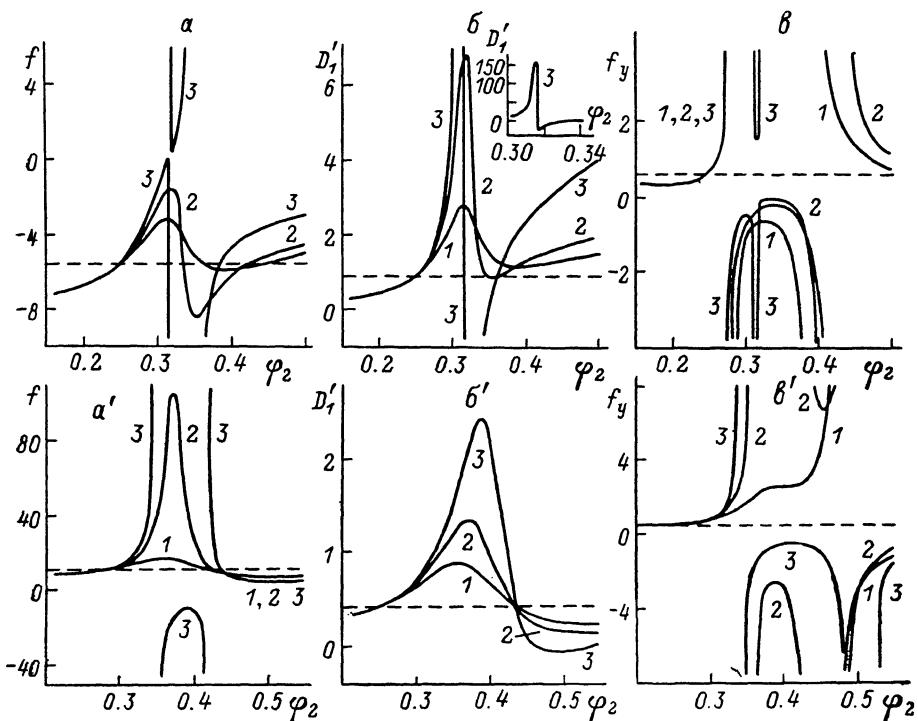


Рис. 2.

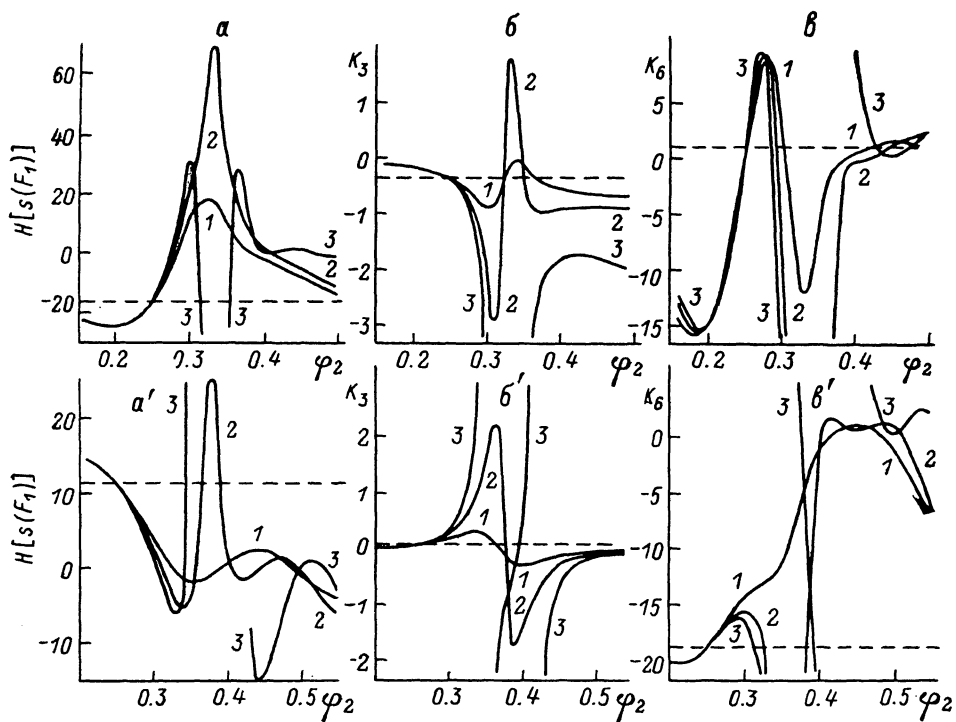


Рис. 3.

значения, может быть и положительным, и отрицательным. С уменьшением l кривые, описывающие поведение корпускулярно-оптических параметров, сглаживаются и в пределе стремятся к штриховым прямым, соответствующим двухэлектродному зеркалу. Отметим, что если $\varphi_2 \leq \varphi_3$, влияние ширины промежуточного электрода почти не проявляется. В то время как в двухэлектродных зеркалах угловая дисперсия D'_1 всегда строго определенного знака, так что в вогнутом зеркале частицы с большей энергией отклоняются на больший угол, а в выпуклом на меньший, в трехэлектродных выпуклых и вогнутых зеркалах при соответствующих l знак D'_1 может изменяться с изменением φ_2 . Интересны зеркала с $D'_1=0$. Они позволяют отклонять частицы, не разделяя их по энергии. Траектории частиц с различной энергией, совпадающие до входа в поле зеркала, совпадают в параксиальном приближении и после выхода из него, так как в трансаксиальном зеркале при $D'_1=0$ в пространстве изображений оказывается и линейная дисперсия D_1 , поскольку в главной плоскости последняя всегда равна нулю.

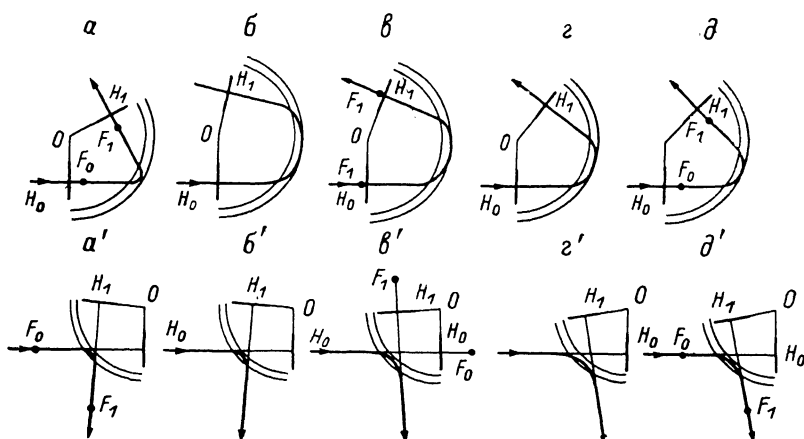


Рис. 4. Осевые траектории и положение главных плоскостей и фокусов в трехэлектродных вогнутых (а—д) и выпуклых (а'—д') зеркалах с $R_1=20$, $a/R_1=0.6$, $l=2.0$, $\varphi_3=0.25$.

φ_2 , α (град): а — 0.280, 118.5; б — 0.316, 168.4; в — 0.320, 159.5; г — 0.348, 142.5; д — 0.400, 136.3; а' — 0.330, —94.7; б' — 0.347, —92.9; в' — 0.390, —85.4; г' — 0.417, —80.6; д' — 0.424, —80.0.

Подобные результаты получаются и в случае, когда при закрепленной ширине промежуточного электрода, например $l=1.5$, варьируются значения φ_3 в интервале от 0.15 до 0.35: при $\varphi_2 \leq 0.25$ влияния φ_3 на корпускулярно-оптические свойства не наблюдается; при малых φ_3 кривые, характеризующие поведение корпускулярно-оптических параметров, сглажены, увеличение φ_3 приводит к заметному расширению диапазона этих параметров, появляются телескопические системы, системы с отрицательной, положительной и равной нулю угловой дисперсией.

По сравнению с двухэлектродными зеркалами значительно увеличивается число случаев, когда зеркало дает стигматическую ($H[s(F_1)]=0$) фокусировку: для каждого значения φ_3 имеется от двух до пяти (в зависимости от l) значений φ_2 , обеспечивающих этот режим работы. Более благоприятным оказывается и поведение коэффициентов сферической аберрации K_3 , K_6 в области этих значений φ_2 . Существенно здесь то, что в трехэлектродных зеркалах с достаточно большой угловой дисперсией по энергии представляется возможным, варьируя φ_2 , φ_3 и l , найти те их значения, при которых $H[s(F_1)]$, K_3 и K_6 одновременно обращаются в нуль, другими словами, осуществляется стигматическая фокусировка объемного параллельного пучка заряженных частиц без сферической аберрации второго порядка. Выделение множества таких зеркал — задача дальнейшего исследования.

Отметим также, что на f и D'_1 , как и в двухэлектродных зеркалах, можно

эффективно влиять величиной радиусов межэлектродных зазоров. С ростом R_1 , R_2 фокусное расстояние f увеличивается, угловая дисперсия D'_1 уменьшается. Отношение a/R_1 определяет угол отклонения пучка.

Литература

- [1] Бейзина Л. Г., Карецкая С. П., Кельман В. М. ЖТФ, 1985, т. 55, № 9, с. 1681—1689.
- [2] Бейзина Л. Г., Карецкая С. П., Кельман В. М. ЖТФ, 1986, т. 56, № 7, с. 1249—1255.
- [3] Бейзина Л. Г., Карецкая С. П., Кельман В. М. ЖТФ, 1987, т. 57, № 3, с. 434—439.
- [4] Бейзина Л. Г., Карецкая С. П. ЖТФ, 1987, т. 57, № 10, с. 1972—1977.
- [5] Карецкая С. П., Федулina Л. В. ЖТФ, 1982, т. 52, № 4, с. 740—745.

Институт ядерной физики
АН КазССР
Алма-Ата

Поступило в Редакцию
25 марта 1987 г.