

12; 01

ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ИММЕРСИОННОЙ АСТИГМАТИЧНОЙ ЛИНЗЫ ИЗ ДВУХ КОАКСИАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРОВ С ВЫРЕЗАМИ

Т. Я. Фишкова, Е. В. Шпак

С помощью аналитико-численного метода рассчитаны кардинальные элементы иммерсионной осесимметрично-квадрупольной (ОК) линзы, образованной двумя коаксиальными цилиндрами с двумя симметричными вырезами во внутреннем. Распределение потенциала на оси такой линзы получено в виде простой эмпирической формулы, которая с хорошей точностью аппроксимирует результаты измерений на электролитической ванне. Расчет электронно-оптических свойств первого порядка ОК линзы проведен на ЭВМ путем численного интегрирования парааксиальных уравнений движения. Исследованы зависимости фокусных расстояний и положений фокусов в широком диапазоне изменения потенциалов на электродах при различных длине и ширине вырезов во внутреннем электроде.

Рассмотренная ОК линза простой конструкции может формировать астигматичные пучки и использоваться в различных электронных и ионных приборах и установках, в тракте которых имеются элементы с некруглой апертурой.

Астигматичная осесимметрично-квадрупольная линза, образованная цилиндрическими электродами с двумя симметричными вырезами в одном из них, была применена для предфокусировки пучка в ускорителе, что позволило повысить интенсивность ионного пучка [1]. С целью нахождения формируемого такой линзой кроссовера в работе [2] были рассчитаны огибающие траекторий заряженных частиц для некоторых видов граничных фазовых контуров на входе. В отличие от квадрупольной осесимметрично-квадрупольная (ОК) линза обладает более гибкими функциональными возможностями. С помощью такой линзы можно получать пучки, сходящиеся в горизонтальном и вертикальном направлениях (эллиптические пучки), параллельные в одном направлении и сходящиеся в другом (клиновидные пучки), что необходимо для улучшения токопрохождения через щелевые и прямоугольные диафрагмы, используемые в ряде приборов, таких как энерго- и масс-анализаторы. С помощью ОК линзы можно получать также пучки в виде «штрих-фокуса», необходимые для формирования изображения на экране некоторых типов электронно-лучевых приборов.

В работе [3] экспериментально исследована пятиэлектродная квадрупольно-октупольная линза с осесимметричной составляющей, образующейся за счет подачи дополнительного потенциала на все пять электродов линзы. Расчеты фокусирующих свойств систем осесимметрично-квадрупольных линз, состоящих из цилиндрических электродов, часть из которых разрезана по образующим на четыре равные части, проведены в [4]. Исследуемая в данной работе иммерсионная линза из двух коаксиальных цилиндров с вырезами во внутреннем обладает по сравнению с линзами, рассмотренными в [3, 4], большей конструктивной простотой и меньшим количеством питающих напряжений, что позволяет упростить изготовление, юстировку и настройку фокусирующей системы.

Для нахождения электронно-оптических свойств ОК линзы необходимо знать распределение потенциала на ее оси. Для решения этой задачи рассмотрим распределение потенциала на оси двух коаксиальных цилиндров без вырезов

(рис. 1). Точное решение последней получено в работе [5] в виде сложного выражения, включающего специальные функции. Эта задача решена также численно, а результаты приведены в виде графиков для некоторых соотношений диаметров цилиндров в монографии [6].

Нами получена простая эмпирическая формула для распределения потенциала на оси двух коаксиальных цилиндров

$$\Phi(z) = \frac{V_2 + V_1}{2} + \frac{V_2 - V_1}{2} \operatorname{th} \left(\lambda \frac{z + z_0}{d} \right), \quad (1)$$

где $\frac{z_0}{d} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \right)$; $\lambda = \lambda_0 \left(\frac{2}{1 + D/d} \right)$; $\lambda_0 = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{dx}{J_0(x)} = 2.637$; V_1 , V_2 и D , d — потенциалы и диаметры внешнего и внутреннего цилиндров соответственно.

Формула (1) при $d/D=1$ переходит в широко известное выражение для распределения потенциала двух цилиндров равного диаметра с бесконечно малыми зазорами между ними. На рис. 1 сплошной кривой показано распределение $\Phi(z)$, рассчитанное по формуле (1) при $d/D=2/3$. Для сравнения кружками обозначены результаты работы [5], а крестиками — [6]. При увеличении d/D различие потенциалов, полученных с помощью эмпирической формулы и данных работ [5, 6], становится еще меньшим. При уменьшении d/D расхождение этих величин несколько увеличивается, однако не превышает 5—10 % для $d/D=0.4$.

Распределение осевого потенциала в ОК лизе было измерено на электролитической ванне для следующих геометрических параметров системы: $l=0.5d$ (1, 3), d (2, 4); $2\alpha=60$ (1, 2) и 105° (3, 4), где l — длина вырезов, 2α — угловой размер выреза (рис. 3). Расстояние от торца внутреннего электрода до начала выреза во всех случаях было равно $b=0.2d$, отношение диаметров $d/D=0.8$ (рис. 2). Электроды модели были изготовлены из латуни, диаметр наружного электрода $D=80$ мм, длина системы 300 мм. На рис. 2, а, б крестики — результаты измерений распределения потенциала на оси для варианта 1, кружки — для варианта 2. Сплошные линии — расчет по эмпирическим формулам, начало координат в этом случае совмещено с началом выреза, поэтому нужно в (1) заменить z на $(z+b)$. Для варианта 1 ($l=0.5d$, $2\alpha=60^\circ$) измеренное на ванне распределение потенциала хорошо аппроксимируется кривой, рассчитанной по формуле (1), так как уменьшение потенциала на оси в области вырезов в этом случае не превышает 6 %. Следует отметить, что на небольшое влияние провисания осесимметричного поля при малой длине вырезов было указано также в работе [1].

При увеличении длины вырезов отличие величины потенциала на оси от потенциала в системе без вырезов становится значительным. Это учитывалось путем введения в области вырезов эффективного потенциала \bar{V} , равного $\bar{V} = V_1 + (V_2 - V_1) K_0$, где K_0 — константа, определяемая геометрией квадрупольной линзы (рис. 3, кривая 1). Тогда в области вырезов распределение осевого потенциала имеет вид

$$\Phi(z) = \frac{V_1 + V_2}{2} + \frac{V_2 - V_1}{2} \left[K_0 + (1 - K_0) \operatorname{th} \left(\lambda_0 \frac{z-l}{d} \right) \right]. \quad (2)$$

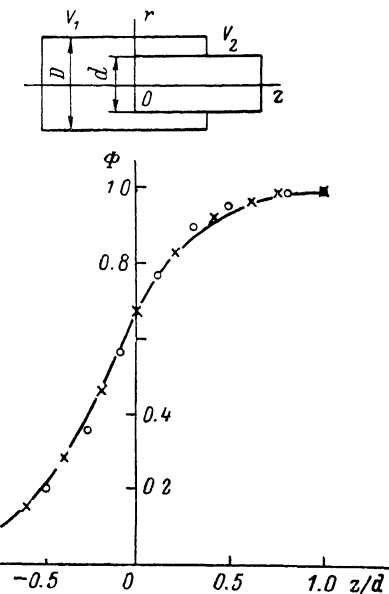


Рис. 1. Распределение потенциала на оси осесимметричной иммерсионной линзы из двух коаксиальных цилиндров, рассчитанное по эмпирической формуле (сплошные кривые) для $d/D=2/3$.

При $d/D=0.8$ и $2\alpha=60^\circ$ $K_0=0.82$, для такой линзы при $l=d$ расчет распределения осевого потенциала на первом участке $z < 0$ проводился по формуле (1), а на втором при $z > 0$ — по формуле (2). Результаты даны сплошной кривой на рис. 2, б, которая хорошо аппроксимирует экспериментальные результаты.

Квадрупольная составляющая ОК линзы образуется за счет провисания потенциала в два симметрично расположенные выреза, так же как в линзе [7], и характеризуется коэффициентами в разложении потенциала, приведенного в [8]. Для геометрии $d/D=0.8$ в двумерном случае величины этих коэффициентов даны на рис. 3 в зависимости от величины углового размера вырезов, K_0 характеризует осесимметричную составляющую, K_2 — квадрупольную, K_4 — октупольную. Эти коэффициенты получены нами на основе измерений распределения потенциала на электроинтеграторе, описанном в работе [8]. Особый интерес представляют два значения величин углов выреза $2\alpha=60^\circ$, при кото-

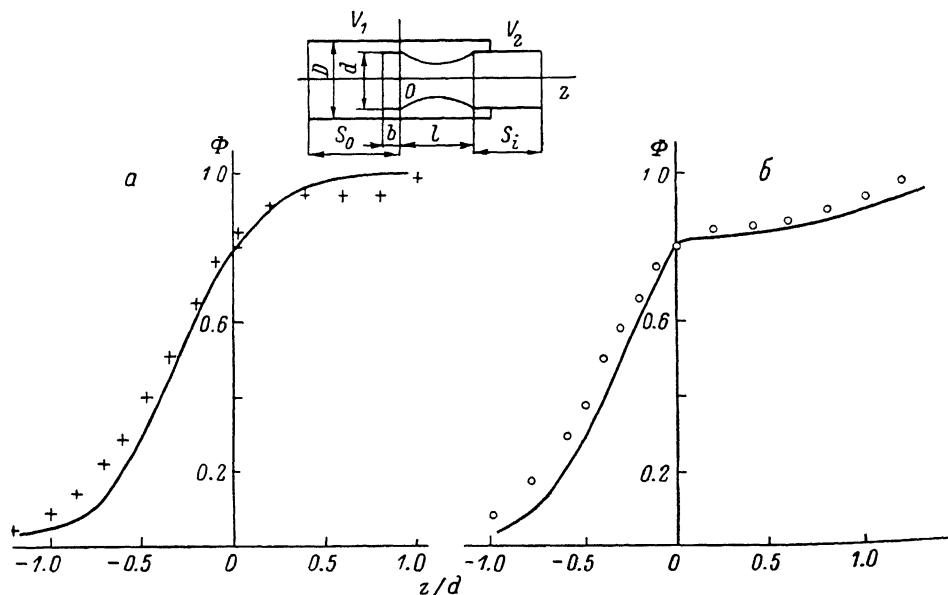


Рис. 2. Распределение потенциала на оси ОК линзы с $d/D=0.8$ при угловых размерах вырезов $2\alpha=60^\circ$ и длинах вырезов $l=0.5d$ (а) и $l=d$ (б).

ром коэффициент K_4 имеет максимальную отрицательную величину ($K_4=-0.40$) и $2\alpha=105^\circ$, когда $K_4=0$, что соответствует максимальной величине K_2 при наибольшей линейности квадрупольной составляющей поля в рассматриваемой конструкции линзы.

Уравнение движения заряженных частиц в ОК линзе в параксиальном приближении имеет вид [4]

$$\Phi(z)x'' + \frac{1}{2}\Phi'(z)x' + \left[\frac{1}{4}\Phi''(z) - \kappa(z)\right]x = 0, \quad (3)$$

уравнение движения в плоскости yz получается из (3) заменой $x \rightarrow y$ и $\kappa \rightarrow -\kappa$, где $\kappa(z)$ характеризует квадрупольную составляющую ОК линзы.

При расчете фокусирующих свойств использовалась прямоугольная модель распределения квадрупольного поля, т. е. внутри области с эффективной длиной $L \times (z) = \kappa = 2\xi K_2 (V_2 - V_1)/d^2$, вне ее $\kappa(z) = 0$. При больших длинах вырезов $l \gg d$ коэффициент $\xi \approx 1$, при уменьшении длины выреза сила квадрупольной составляющей уменьшается ($\xi < 1$). На основании работы [7] для конкретной геометрии ОК линзы $d/D=0.8$ и $l=d/2$ нами было найдено, что коэффициент $\xi=0.60$, а эффективная длина квадрупольного поля $L=0.55l$.

Расчет электронно-оптических свойств первого порядка был проведен на ЭВМ путем численного интегрирования параксиальных уравнений движения (3) с автоматическим выбором шага. Кардинальные элементы ОК линзы рассчиты-

вались по координатам и углом наклона траектории при прямом и обратном выпуске параллельного пучка заряженных частиц следующим образом:

$$f_{ix} = -\frac{x_0}{x'_i}, \quad F_{iv} = -\frac{x_i}{x'_i} + s_i + l,$$

$$f_{0x} = f_{ix} \sqrt{\frac{V_1}{V_2}}, \quad F_{0x} = -\frac{x_0}{x'_0} + s_0. \quad (4)$$

Здесь f_x и F_x — фокусные расстояния и положения фокусов в плоскости xoz , для плоскости yoz нужно заменить $x \rightarrow y$; s_0 и s_i — расстояния от начала и конца вырезов до торцов электродов. Индексы «0» и «i» относятся к пространству объекта и изображения соответственно. Сравнение величин фокусных расстояний и положений фокусов с данными работы [6] для частного случая линзы из двух коаксиальных цилиндров без вырезов ($x=0$) показало, что расхождение составляет 3–5 %.

Исследовались фокусирующие свойства ОК линзы в широком диапазоне изменения потенциалов на электродах с учетом влияния длины и ширины вырезов во внутреннем цилиндре. На рис. 4, 5 приведены фокусные расстояния и положения фокусов, выраженные в единицах внутреннего диаметра линзы d , в зависимости от отношения потенциалов V_2/V_1 для двух вырезов $l=0.5d$ и $l=d$ при угловых размерах последних $2\alpha=60^\circ$.

При $V_2/V_1 < 1$ линза является замедляющей, энергия частиц в области выреза мала, действие квадрупольной составляющей является преобладающим и ОК линза по своему действию близка к квадрупольной. Аналогичный эффект имеет место и при малых ускорениях $V_2/V_1 \ll 2$. С возрастанием V_2/V_1 сила осесимметричной линзы растет быстрее, чем квадрупольной, так как увеличивается осевой потенциал в области вырезов, и начиная с $V_2/V_1=4.3$ при меньшей длине вырезов ($l/d=0.5$) и с $V_2/V_1=7.5$ при большей длине ($l/d=1$) ОК линза становится собирающей в обеих плоскостях. Здесь начинается наиболее интересная область с точки зрения функциональных возможностей ОК линзы, а именно получения пучка с различной требуемой степенью сходимости. Эта область при малых длинах вырезов достигается при меньших соотношениях потенциалов. Фокусные расстояния в плоскостях zx и yz становятся равными при $V_2/V_1=17$ для $l=d$ и $V_2/V_1=33$ для $l=0.5d$. Следует отметить, что имеется область изменения потенциалов $0.5 < V_2/V_1 < 2$, в которой главные плоскости расположены вблизи начала вырезов, а их положение мало меняется, при этом сила линзы мала.

Исследовалось влияние на фокусирующие свойства линзы углового размера вырезов во внутреннем электроде. На рис. 6 в режиме, когда ОК линза действует на пучок в одном направлении ($f_{ix} \rightarrow \infty$), представлены зависимости потенциалов и кардинальных элементов от угла выреза в широком диапазоне его изменения. Кривая V_2/V_1 ведет себя аналогично зависимости $K_2 = \varphi(2\alpha)$ (рис. 3, кривая 2), а максимумы этих кривых при $2\alpha=115^\circ$ совпадают. При этом зависимости фокусного расстояния f_{iy} и положения фокуса F_{iy} от угла имеют минимум. При максимальном K_2 сила квадрупольной составляющей при одной и той же длине вырезов имеет наибольшую величину. Поэтому для получения фокусировки в одном направлении, когда действие квадрупольной составляющей в рассеивающей плоскости компенсируется действием осесимметричной состав-

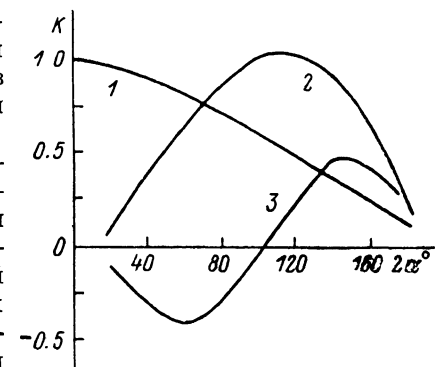
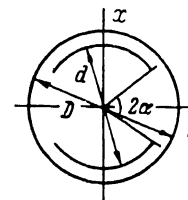


Рис. 3. Зависимости коэффициентов, характеризующих квадрупольную составляющую ОК линзы с $d/D=0.8$, от угловых размеров вырезов.

1 — K_0 , 2 — K_2 , 3 — K_3 .

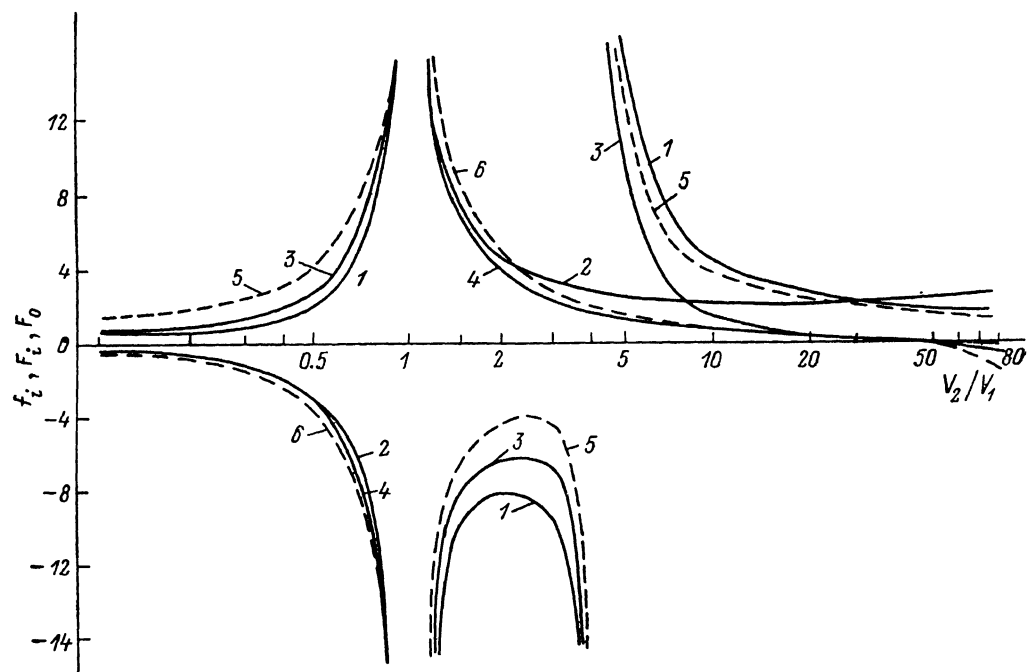


Рис. 4. Зависимости фокусных расстояний f_i и положений фокусов F_i пространства изображений (сплошные кривые) и положений фокусов F_0 пространства объекта (штриховые кривые) от соотношения потенциалов на электродах V_2/V_1 для ОК линзы, показанной на рис. 2, а.

1 — f_{ix} , 2 — f_{iy} , 3 — F_{ix} , 4 — F_{iy} , 5 — F_{ox} , 6 — F_{oy} .

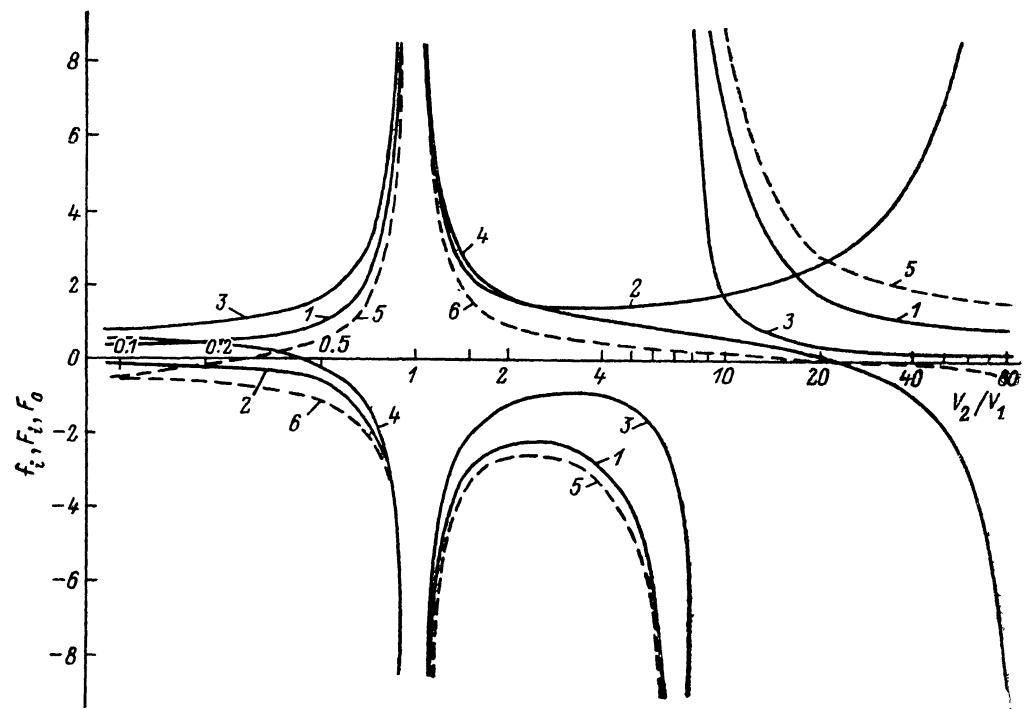


Рис. 5. Те же зависимости и обозначения, что и на рис. 4 для ОК линзы, показанной на рис. 2, б.

$\frac{V_2}{V_1}$	2α , град											
	60				80				105			
	f_{ix}	f_{iy}	F_{ix}	F_{iy}	f_{ix}	f_{iy}	F_{ix}	F_{iy}	f_{ix}	f_{iy}	F_{ix}	F_{iy}
0.5	1.95	-2.64	2.50	-2.77	1.58	-1.92	2.07	-1.94	1.27	-1.41	1.71	-1.36
2	-8.10	4.30	-6.27	3.71	-5.64	3.55	-4.29	3.10	-4.02	2.90	-2.99	2.58
5	23.2	2.46	11.9	1.47	-57.5	2.19	-28.7	1.33	-10.9	1.93	-5.22	1.20
8	5.54	2.21	2.16	0.989	7.36	2.04	2.79	0.930	13.0	1.87	4.74	0.867
10	4.07	2.14	1.35	0.810	4.78	2.01	1.55	0.773	6.20	1.88	1.94	0.732
20	2.37	2.09	0.402	0.362	2.42	2.06	0.409	0.357	2.50	2.03	0.418	0.351

Примечание. $l = 0.5d$.

ляющей, требуется наибольшее значение V_2/V_1 . При этом силы квадрупольной составляющей в собирающей плоскости и осесимметричной составляющей суммируются, т. е. фокусное расстояние f_{iy} минимально. Отметим также, что в режиме $f_{ix} \rightarrow \infty$ при изменении угла выреза в широких пределах $80 < 2\alpha < 140^\circ$ величины фокусных расстояний и положений фокусов мало меняются.

Для ряда других режимов кардинальные элементы при нескольких углах вырезов, представляющих наибольший интерес, приведены в таблице. Здесь по-прежнему фокусные расстояния и положения фокусов выражены в единицах внутреннего диаметра d . Из таблицы видно, что при меньших угловых размерах

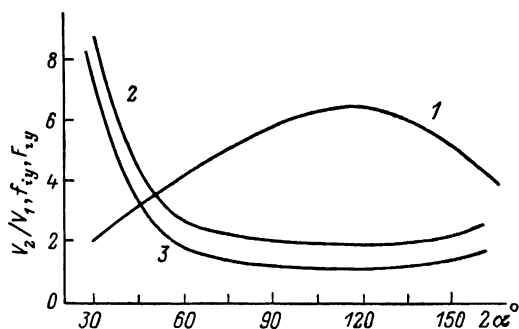


Рис. 6. Зависимости отношений потенциалов на электродах (1), фокусных расстояний (2) и положений фокусов (3) пространства изображений от угловых размеров вырезов.

вырезов область, в которой ОК линза собирает пучок в обоих направлениях, расширяется и сдвигается в сторону меньших V_2/V_1 .

Проведенные расчеты подтвердили перспективность применения ОК линзы простой конструкции и всего с двумя питающими напряжениями для получения сходящихся астигматичных пучков заряженных частиц. При этом предпочтительнее геометрия ОК линзы с малыми ($l \approx 0.5d$) длинами и сравнительно малыми углами вырезов ($2\alpha \approx 60^\circ$), так как нужные режимы достигаются в области ускорения при небольших напряжениях на электродах $V_2 = (3-10)V_1$. Такие линзы могут быть использованы для вытягивания и формирования пучков в различных электронных и ионных приборах и установках, в тракте которых имеются элементы с некруглой апертурой.

В области замедления ОК линза по своим электронно-оптическим свойствам близка к квадрупольной. Системы из таких линз, образованные двумя коаксиальными цилиндрами с несколькими парами вырезов во внутреннем электроде, повернутые относительно друг друга на 90° , могут представлять интерес для предзамедления, например, в энергоанализаторах.

Наряду с иммерсионной представляет интерес исследование одиночной ОК линзы, также образованной двумя коаксиальными цилиндрами с вырезами во внутреннем.

Литература

- [1] *Kiss I., Koltay E., Szalay A., Shpak E. V.* // Nucl. Instr. Meth. 1973. Vol. 107. P. 401—403.
- [2] *Шпак Е. В.* // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 2. С. 322—329.
- [3] *Петров И. А., Шпак Е. В., Явор С. Я.* // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1974. Т. 38. № 7. С. 1502—1504.
- [4] *Фишкова Т. Я., Шпак Е. В., Цаплина Н. А.* // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 6. С. 1179—1182.
- [5] *Лебедев Н. Н., Скальская И. П.* // ЖТФ. 1960. Т. 30. Вып. 5. С. 472—479.
- [6] *Harting E., Read F. H.* // Electrostatic Lenses. Amsterdam—Oxford—New York, 1976. P. 73—77.
- [7] *Gregory B. C., Sander K. F.* // J. Electr. Control. 1962. Vol. 13. N 2. P. 123—136.
- [8] *Фишкова Т. Я., Силади М., Явор С. Я.* // РиЭ. 1967. Т. 12. № 7. С. 1311—1312.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
8 апреля 1988 г.
