

Компенсация влияния краевого поля в энергоанализаторе типа цилиндрического зеркала. Хрущев А.В. // Научное приборостроение. Электронно-ионная оптика. Л.: Наука, 1989, с. 54 - 60.

Исследуются свойства энергоанализатора типа цилиндрического зеркала с учетом влияния краевых эффектов, связанных с конечностью длины цилиндров и наличием вблизи торца заземленных элементов, даны оценки искажений поля у края системы при наличии корректирующих электродов и без них, получены зависимости положения кроссовера широкого пучка (с раствором до 10°) от энергии частиц, угла наклона осевой траектории и потенциалов на кольцевых вставках, рассмотрен вопрос об устойчивости режима работы анализаторов к небольшим (до 3 %) возмущениям потенциалов на кольцах; обнаружено, что для реализации этих режимов следует подавать завышенные (на 10-30 %) по абсолютной величине напряжения на корректирующие электроды, показано, что в случае вынесенного за пределы цилиндров источника влиянием краевого эффекта на фокусирующие и дисперсионные характеристики прибора пренебречь нельзя. Лит. - 10 назв., ил. - 4.

КОМПЕНСАЦИЯ ВЛИЯНИЯ КРАЕВОГО ПОЛЯ
В ЭНЕРГОАНАЛИЗАТОРЕ ТИПА ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА

Энергоанализатор на основе цилиндрического зеркала благодаря своим несомненным достоинствам (высокая разрешающая способность, большой входной аксептанс, простота реализации и т.д.) получил признание и широкое распространение в научном приборостроении. Его теории посвящено большое количество работ [1-7], в большинстве которых рассматриваются свойства энергоанализатора с идеальным полем бесконечного заряженного цилиндра. Однако поле в реальном приборе отличается от идеального в силу конечности длины цилиндров, наличия входного и выходного отверстий на внутреннем электроде, неточностей изготовления и ряда других причин. Возникающими искажениями поля в первом приближении пренебрегают в связи с резко возрастающими аналитическими трудностями при попытке их учета, а также вследствие часто существующей возможности их устранения. Среди источников возмущения поля самыми существенными являются краевые эффекты, причем влияние краевого поля у входной и выходной щелей анализатора удалось учесть в замкнутой аналитической форме [2]. Что же касается краевого поля у торцов цилиндров, то, несмотря на то, что эмпирически компенсировать его стали довольно давно (с помощью введения дополнительных кольцевых электродов [5]), теоретических исследований его влияния на разрешение и пропускание прибора практически не проводилось.

Оценки искажений поля,
вносимых краевыми эффектами

Оценим расстояния, на которых следует учитывать влияние краевого поля. Поскольку при этом к большой точности мы не стремимся, в качестве модели будем рассматривать не осесимметричную систему, а плоскую, что существенно облегчает анализ. Обоснование правомерности такого подхода можно найти в работе [8].

Итак, пусть дан плоский полубесконечный конденсатор, на пластины которого подан единичный потенциал, а в торце его помещена пластина под нулевым потенциалом (рис.1, а). Отобразив конформно область внутри конденсатора на верхнюю полуплоскость, после ряда преобразований получим распределение потенциала в системе:

$$\varphi(z) = 1 + \Delta(\xi, \eta), \quad z = \xi + i\eta.$$

$$\Delta(\xi, \eta) = \frac{1}{\pi} \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{\sin(\xi) \operatorname{ch}(\eta) - 1}{\cos(\xi) \operatorname{sh}(\eta)} \right) - \operatorname{arctg} \left(\frac{\sin(\xi) \operatorname{ch}(\eta) + 1}{\cos(\xi) \operatorname{sh}(\eta)} \right) \right],$$

где $\xi = \frac{\pi}{a} y$, $\eta = \frac{\pi}{a} x$ — безразмерные координаты; a — размер зазора.

Величина Δ есть отклонение возмущенного поля от однородного. Максимум Δ достигается при $\xi = 0$:

$$\max(\Delta(\xi, \eta)) = -\frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \left[\frac{1}{\operatorname{sh}(\eta)} \right] = -\Delta(\eta).$$

Ниже показано, что искажения поля становятся достаточно малыми (порядка 10^{-4}) лишь на расстоянии от края порядка трех зазоров:

y/a	1	2	3	4	5
$ \Delta_{\max} $	$6 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	10^{-4}	$5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-7}$

Если в систему добавить пять плоских электродов длиной $\frac{2}{3}a$ (рис.1, б), подав на них единичный потенциал, то за их пределами искажениями поля в большинстве случаев можно пренебречь.

Рассмотрим теперь аналогичную систему, но с корректирующими электродами, лежащими в плоскости торца (рис.1, в). Размеры их одинаковы и равны a , а центры расположены так, что при $d=0,25a$ электроды касаются друг друга. Потенциалы на них меняются в соответствии с полем бесконечного плоского конденсатора. Существенно, что между корректирующими вставками расположены электроды, на которых поддерживается нулевой потенциал, ибо в реальной ситуации у торцов прибора всегда находится заземленная поверхность (магнитный экран, элементы конструкции и др.), что вызывает дополнительные возмущения поля. Это обстоятельство не всегда принимается в расчет при проведении подобных оценок [8].

Проделав преобразования, аналогичные приведенным в работе [8], получаем распределение потенциала в нашей системе в виде суперпозиции однородного поля и возмущения $\Delta(\xi, \eta)$:

$$\varphi(\xi, \eta) = \frac{3}{\pi} + \frac{\Delta(\xi, \eta)}{\pi},$$

где $\Delta(\xi, \eta)$ есть быстро сходящийся ряд по степеням малого параметра $\tau = e^{-2\eta}$ (ξ и η — по-прежнему безразмерные координаты):

$$\begin{aligned} \Delta(\xi, \eta) = & C_1(\xi) \tau(\eta)^1 + \\ & + C_2(\xi) \tau(\eta)^2 + \\ & + C_3(\xi) \tau(\eta)^3 + \dots \end{aligned} \quad (1)$$

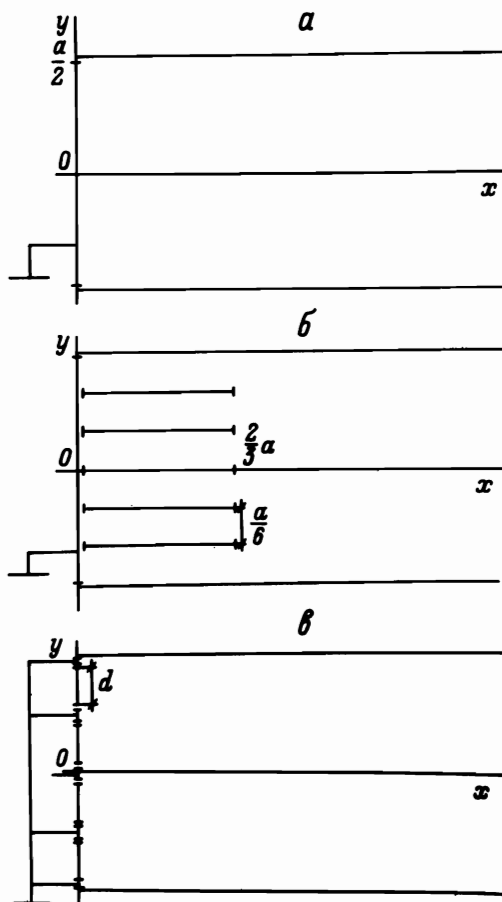


Рис.1. Полубесконечный плоский конденсатор: а — с заземленным торцевым электродом, б — с заземленным торцевым электродом и пятью продольными корректирующими электродами; в — с четырьмя поперечными корректирующими электродами, между которыми расположены заземленные электроды

Коэффициенты ряда в силу их громоздкости не приводятся. В случае, когда нет заземленных частей между электродами, можно найти такое d , при котором первый коэффициент ряда (1) обращается в ноль (это показано в работе [8]). В нашей ситуации это невозможно. Поэтому остается лишь минимизировать первый член. Анализ показал, что C_1 принимает наименьшее значение при максимально возможном размере компенсирующих электродов, т.е. при $d = \frac{1}{4}a$. Тогда $|C_1| \leq 0,2$.

Итак,

$$|\Delta_{max}| \leq 0,2 e^{-2\frac{1}{2}}$$

Ниже приведены значения $|\Delta_{max}|$ для некоторых значений расстояния до торца:

у/а	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
$ \Delta_{max} $	$5 \cdot 10^{-2}$	10^{-2}	$5 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	$5 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}

Даже при наличии компенсирующих вставок возмущение поля превышает 10^{-4} на расстояниях меньших, чем размер зазора. Как известно [1], чтобы вычислять траектории частиц с точностью до 0,05 % (при ожидаемом разрешении 1...0,1 %), нужно знать потенциал с погрешностью до 10^{-4} .

Эти результаты можно с некоторыми оговорками распространить на осесимметричную систему. Таким образом, если конструкция энергоанализатора такова, что область движения заряженных частиц менее, чем на $\frac{r_2 - r_1}{r_1}$ (r_1, r_2 - радиусы внутреннего и наружного цилиндров) удалена от заземленных частей, то влиянием краевого поля на свойства прибора несмотря на наличие компенсирующих электродов пренебречь нельзя.

Численный расчет параметров
энергоанализатора на основе
цилиндрического зеркала
с торцевыми корректирующими электродами

Перейдем теперь к цилиндрическому зеркалу. Целью настоящей статьи было отыскание такого режима работы энергоанализатора (энергии настройки, положений источника и детектора, потенциалов на корректирующих кольцах и т.д.), который обеспечивает разрешение по основанию не хуже 0,6 % при следующих условиях:

точечный изотропный источник частиц расположен на оси симметрии и удален от плоскости ближнего торца внутреннего цилиндра не менее, чем на 0,6 (здесь и далее все линейные размеры измеряются в единицах радиуса внутреннего цилиндра);
раствор входного пучка равен $\pm 5^\circ$;

найденный режим работы прибора должен быть устойчив к небольшим (в пределах 3 %) возмущениям потенциалов на кольцевых вставках.

В работе [1] исследовалось влияние краевого поля на фокусирующие свойства цилиндрического зеркала. В ней же рассмотрена динамика фокальных точек выходного пучка при введении компенсирующих электродов. При этом предполагалось, что нулевая эквипотенциаль замыкается на заземленный прямоугольный в сечении магнитный экран, торец которого находится на расстоянии 2,5 от входной щели. Для анализатора, состоящего из двух полуцилиндров [4,5], это условие действительно выполнимо, так как размеры прибора не ограничивают положение источника по оси OZ . Если же анализатор состоит из полных цилиндров, что значительно увеличивает его входной аксептанс, а источник находится на оси OZ , то увеличение не-

рабочей части цилиндров затрудняет манипуляции с объектом. В результате в таких системах заземленные элементы конструкции, поддерживающие корректирующие кольца, оказываются на расстояниях порядка 0,3...0,7 от входной щели, что существенно отличается от ситуации, рассмотренной в работе [1]. Поэтому наша модель соответствовала структуре электродов, изображенной на рис.2. Ось симметрии системы совпадает с осью Oz . Торец образован коническим заземленным электродом.

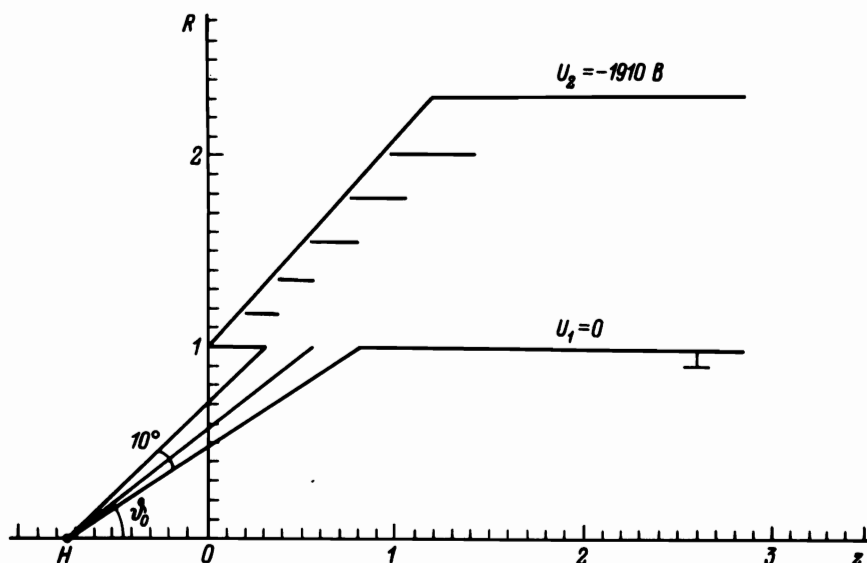


Рис.2. Схема левой половины энергоанализатора типа цилиндрического зеркала

Поле и траектории

Поле на сетке 11×56 (шаг по r — $h_r = 0,118$; по z — $h_z = 0,1$) создавалось следующим образом.

В левой половине при $z < 2,05$ потенциал вместе со своими частными производными до второго порядка включительно определялся методом интегральных уравнений [10]. Затем в промежутке $2,05 < z < 2,85$ поле считалось идеальным. В правой половине ($2,85 < z < 5,7$) распределение потенциала задавалось симметричным отображением левой области.

В качестве компенсирующих электродов использовались пять коаксиальных колец, расположенных так, чтобы при идеальном распределении поля разность потенциалов между соседними кольцами была постоянной. Размеры колец (соответственно 0,19; 0,22; 0,27; 0,34; 0,41) брались с тем расчетом, чтобы на их поверхность не попадали частицы, влетающие в пространство между цилиндрами под максимальным углом к оси симметрии (49°).

Расстояние от входной щели до левого торца равно 0,3. В результате при перемещении источника вдоль оси в пределах от $-\infty$ до $-0,6$ угол наклона осевой траектории меняется от 0 до 44° .

При расчете траекторий поле в пределах каждой ячейки раскладывалось в ряд

Тейлора до второго порядка включительно, что позволило решить аналитически уравнения движения частицы в данной ячейке. Влияние пространственного заряда не учитывалось.

Разрешение

Разрешение по основанию оценивалось следующим образом. Задавшись некоторой энергией E_0 и углом наклона осевой траектории ν_0 , находилось положение кроссовера пучка, состоящего из 100 частиц, имеющих энергию E_0 и угол вылета ν_j :

$$\nu_j = \nu_0 - 5^\circ \left(1 - \frac{2j}{99}\right),$$

где $j = 0 \dots 99$.

Затем рассматривались два таких же пучка, но с энергиями $E_1 = (1 + 0,006)E_0$ и $E_2 = (1 - 0,006)E_0$. Если хоть одна частица из этих пучков пересекала кроссовер исходного пучка, считалось, что требуемое разрешение (0,6 %) не достигнуто.

Угол наклона осевой траектории менялся в диапазоне от 36° до 44° . Кроме того, с целью "подстройки" анализатора варьировалась энергия E_0 .

Для определения устойчивости режима к вариации потенциалов на кольцах использовался следующий метод. На плоскости (R, z) строились кривые (аналог "фокальных кривых", рассматриваемых в работе [1]), образованные кроссовером пучка при изменении положения источника (a , следовательно, и угла ν_0) для различных энергий частиц при нормальных напряжениях на вставках. Затем строились такие же семейства для случая возмущенных потенциалов. В каждом семействе выделялись множества точек, в которых достигалось необходимое разрешение. Пересечение таких множеств из различных семейств образует множество, точки которого соответствуют устойчивым режимам. Действительно, если поместить детектор в одну из точек этого множества и создать соответствующий режим, то в случае изменения потенциалов на кольцах всегда можно, варьируя энергию и положение источника, вернуть кроссовер пучка в окно детектора, не потеряв при этом в разрешении.

Результаты

В результате проведенных расчетов выяснилось, что при подаче на корректирующие электроды потенциалов, соответствующих распределению в идеальной системе, и энергии частиц, отвечающей случаю фокусировки второго порядка типа ось-ось (в нашей модели при радиусе наружного цилиндра $r_2 = 2,3$ и напряжении на нем $U_2 = -1910$ В эта энергия равнялась $E_0 = 3000$ В), требуемое разрешение достигалось лишь для углов $\nu_0 \in [38^\circ, 40^\circ]$ (таблица). Кроссовер принимал минимальное значение

Таблица

Зависимость положения и размера кроссовера от угла наклона осевой траектории при потенциалах на кольцах, соответствующих полю идеального цилиндрического зеркала

Наклон осевой траектории	Координата источника	Координаты центра и размер кроссовера				Разрешение, %
ν	h	z	r	D	R	
36°	-0.85	5.14	0.16	0.019		> 0.6
37°	-0.81	5.24	0.41	0.017		> 0.6

Наклон осевой траектории	Координата источника	Координаты центра и размер кроссовера			Разрешение, %
ν	h	z	r	D	R
38°	-0.77	5.33	0.07	0.045	< 0.6
39°	-0.74	5.44	0.02	0.043	< 0.6
40°	-0.70	5.53	-0.03	0.041	< 0.6
41°	-0.67	5.39	0.13	0.039	> 0.6
42°	-0.63	5.37	0.17	0.055	> 0.6
43°	-0.60	5.36	0.21	0.061	> 0.6
44°	-0.57	5.35	0.27	0.067	> 0.6

Примечание. Энергия частиц $E_0=3000$ эВ. Все линейные размеры измеряются в единицах радиуса внутреннего цилиндра.

ние при наклоне осевой траектории $\nu_0=40^\circ$, однако расположен он несколько ниже оси OZ , что, как известно, существенно усложняет конструкцию детектора.

Из физических соображений понятно, что для перемещения кроссовера вверх следует уменьшить энергию частиц. Поэтому были проведены аналогичные расчеты для случаев с энергиями в интервале от 2900 до 3000 эВ. Оказалось, что при понижении энергии частиц кроссовер действительно "поднимается", но найденные режимы неустойчивы к вариациям потенциалов на кольцах.

Повышение же энергии частиц в пучке привело, как мы и ожидали, к дальнейшему "опусканию" кроссовера ниже оси. На рис.3 приведены соответствующие зависи-

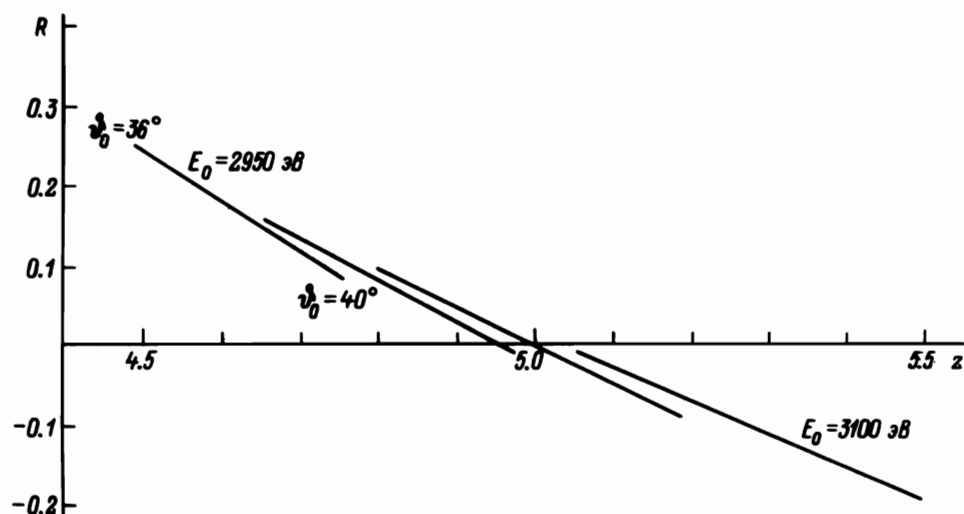


Рис.3. Положение кроссовера в анализаторе типа цилиндрического зеркала в зависимости от угла наклона осевой траектории ν_0 для различных энергий E_0 частиц в пучке при подаче на корректирующие кольца потенциалов, соответствующих идеальному распределению

мости положения кроссовера пучка от угла ν_0 (изменяемого от 36 до 40°) для энергий частиц, лежащих в интервале от 2950 до 3100 эВ.

Нетрудно убедиться, что переместить кроссовер вверх можно не только уменьшая энергию частиц, но также и увеличивая (по абсолютной величине) напряжение на компенсирующих вставках (этот вывод согласуется с результатами работ [1,9]). Поэтому рассмотрены ситуации, когда напряжение на кольцевых электродах превышало исходное на 5, 10, 20 и 30 %. Соответствующие кривые положения кроссоверов для углов ψ_0 от 36° до 41° для случая 10%-ного увеличения потенциалов на кольцах приведены на рис.4 (сплошные линии). Из него видно, что диапа-

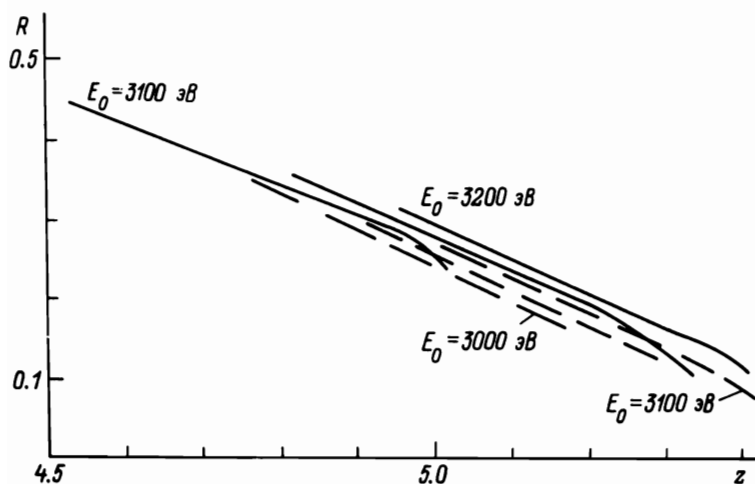


Рис.4. Положение кроссоверов в зависимости от угла ψ_0 и энергии E_0

зон энергий, при которых кроссовер находится выше оси, сместился в сторону увеличения. Кроме того, семейство, соответствующее возмущенным на 3 % потенциалам на кольцевых вставках (пунктирные линии), имеет общие точки с исходным "невозмущенным" семейством, следовательно, соответствующие режимы являются устойчивыми. Аналогичная картина наблюдалась и для повышения кор-

ректирующих напряжений на 20 и 30 % по отношению к исходному. Заметим, что во всех случаях положение кроссовера отличается от того, которое он должен занимать в идеальном поле бесконечного цилиндрического конденсатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Renfro G.M., Fishbeck H.J. // Rev.Sci.Instrum. 1975. V. 46, N 5. P. 620.
2. Бози//ПНИ. Вып. 3. 1972.-С.115.
3. Аксела, Каррас, Песса и Суонинен//ПНИ. Вып.41. 1970.-С.351.
4. Афанасьев В.П., Явор С.Я. Электростатические энергоанализаторы для пучков заряженных частиц. М.: Наука, 1978.
5. Зашквара В.В.//ЖТФ. Вып.7. 1981.-С.1450.
6. Зашквара В.В. и др. //ЖТФ. Вып.2. 1985.-С.372.
7. Горелик В.А., Машинский Ю.П., Протопопов О.Д.//ЭТ. Вып.7. 3(82). 1987.-С. 31.
8. Голиков Ю.К., Уткин К.Г., Чепарухин В.В.//Труды ЛПИ. Вып.371. 1980.-С.38.
9. Певзнер А.Е.//Аппаратура и методы рентгеновского анализа. Л.: Машиностроение. Вып.37. 1988.-С.117.
10. Иванов В.Я., Ильин В.П.//Решение смешанных краевых задач для уравнения Лапласа методом интегральных уравнений. Новосибирск, ВЦ АН СССР. 1975.-С.5.