

01;02

## **Многоканальный энергофильтр в виде цилиндра с закрытыми торцами и осевым нитевидным электродом**

© Л.П. Овсянникова, Т.Я. Фишкова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

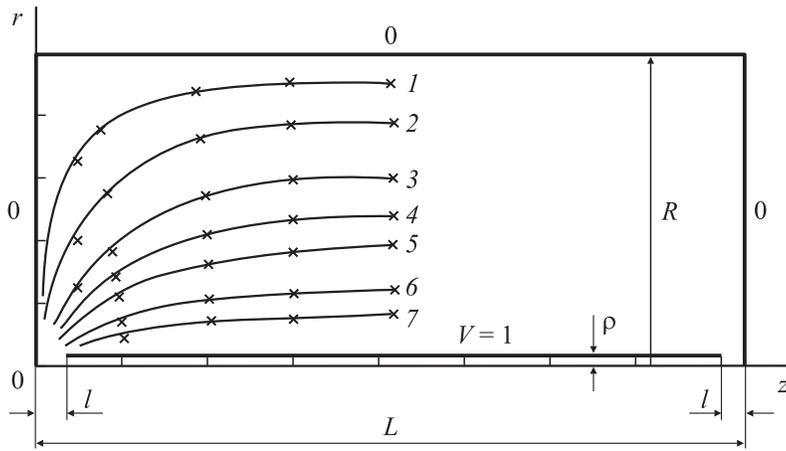
E-mail: L.Ovsyannikova@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 28 апреля 2004 г.

Предложен электростатический многоканальный дефлектор с фильтрацией заряженных частиц по энергии, образованный цилиндром с закрытыми торцами, на продольной оси которого расположен нитевидный электрод. Найдено распределение потенциала такой системы в аналитическом виде. Рассчитаны параметры системы при впуске и выводе пучка через ее заземленные торцы. Благодаря малому по сравнению с длиной окружности цилиндра размеру пучка в азимутальном направлении предлагаемая система хорошо сочетается с 1–4 канальным динамическим монополюсным масс-спектрометром для отклонения пучка в его регистрирующее устройство.

Цилиндрический конденсатор с малым радиусом внутреннего электрода и заземленными плоскими торцевыми электродами, через которые происходит вход и выход пучка заряженных частиц, был исследован в нашей работе [1]. В другой нашей работе [2] рассчитан цилиндрический зеркальный энергоанализатор с заземленными торцевыми пластинами, электронно-оптические параметры которого близки к параметрам классического цилиндрического зеркала с фокусировкой второго порядка при угле впуска  $42.3^\circ$  для источника и приемника, расположенных на оси вращательной симметрии системы. Из этих работ следует, что торцевые электроды не только не ухудшают свойств цилиндрических систем с открытыми торцами, но к тому же препятствуют проникновению в них посторонних полей.

Целью настоящей работы является теоретическое исследование электростатической цилиндрической системы с торцевым впуском пучка заряженных частиц, отклоняющей его в сторону внешнего цилиндра. Это открывает возможности для использования такой системы с несколькими источниками пучков заряженных частиц, расположенными



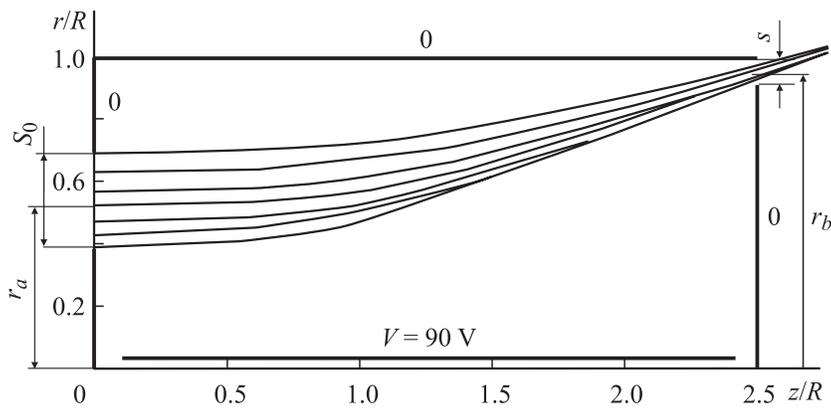
**Рис. 1.** Картина распределения потенциала в цилиндрической системе с нитевидным осевым электродом при соотношении радиусов  $R/\rho = 100$  и длине  $L = 2.5R$ . Сплошные кривые — численный расчет, крестики — расчет по аналитической формуле. 1 —  $\Phi(r, z)/V = 0.02$ , 2 — 0.05, 3 — 0.1, 4 — 0.15, 5 — 0.2, 6 — 0.3, 7 — 0.4.

по ее азимуту, в частности, — в 1–4-канальных динамических монополюсных пространственно совмещенных масс-спектрометрах, каждый канал которого образован двумя электродами в виде  $90^\circ$ -ного двугранного угла и цилиндрического электрода, расположенного напротив его вершины. Предлагаемая система, располагаемая на выходе масс-спектрометров, осуществляет фильтрацию пучка по энергии и одновременно предотвращает попадание в детекторы быстрых заряженных частиц, фотонов и нейтралей, тем самым повышая порог чувствительности приборов.

Для системы из двух коаксиальных цилиндров с заземленными внешним цилиндром радиуса  $R$  и торцевыми электродами при условии бесконечно малых зазоров между ползающим электродом радиуса  $\rho$  и торцами выражение для распределения потенциала имеет следующий вид:

$$\Phi(r, z) = 4 \frac{V}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{[K_0(\xi_2)I_0(\xi) - I_0(\xi_2)K_0(\xi)] \sin(\xi)}{K_0(\xi)I_0(\xi_1) - I_0(\xi_2)K_0(\xi_1)} \frac{1}{(2n+1)}.$$

Здесь  $V$  — потенциал нитевидного электрода,  $\xi = (2n+1)\pi r/L$  и  $\xi = (2n+1)\pi z/L$  ( $L$  — расстояние между торцами),  $\xi_1$  и  $\xi_2$  —



**Рис. 2.** Отклоняющая цилиндрическая система с фильтрацией по энергии и траектории положительно заряженных частиц с энергией настройки 100 эВ.

значения аргумента  $\xi$  при  $r = \rho$  и  $r = R$  соответственно,  $I_0$  и  $K_0$  — модифицированные функции Бесселя нулевого порядка. Нами показано, что в случае нитевидного внутреннего электрода, когда  $R/\rho = 20 \div 200$  при длине системы  $L/R = 1 \div 4$ , ряд сходится достаточно быстро и для определения потенциала с точностью до трех знаков достаточно двух членов ряда. Значения потенциалов, полученные по этой формуле, сравнивались с результатами расчета по программе авторов ТЕО. На рис. 1 представлено распределение потенциала в системе с соотношением радиусов  $R/\rho = 100$  и длине  $L = 2.5R$  (продольная ось  $z$  является осью вращательной симметрии). В рабочей области, где проходит пучок заряженных частиц ( $r \geq 0.4R$ ), отличие аналитических расчетов от численных не превышает 5%.

На рис. 2 приведен ход траекторий пучка, входящего параллельно оси вращательной симметрии исследуемой системы. Такой ход имеет место за счет тормозящего потенциала, подаваемого на нитевидный электрод при заземленных торцевых электродах и охватывающем цилиндре. Геометрические параметры системы выбирались, исходя из наиболее острой фокусировки на заднем торце вблизи цилиндрического электрода. Для этого отношение радиусов цилиндрического и нитевидного электродов должно быть большим ( $R/\rho = 50-200$ ), а расстояния от торцов до осевого электрода — малым (выбрано  $l = 0.1R$ ). Ранее нами было показано, что при  $l \approx (R - \rho)$  фокусировка пропадает. Длина системы варьировалась.

$L/R$	$\beta$	$r_a/R$	$r_0/R$	$s_0/R$	$r_b/R$	$s/R$	$\lambda/R$	$D/R$	$\delta, \%$
1.5	3.0	0.61	0.56–0.66	0.1	0.933	$6.6 \cdot 10^{-3}$	0.15	0.34	1.9
			0.52–0.72	0.2		$2.3 \cdot 10^{-2}$	0.31		6.8
			0.48–0.78	0.3		$5.2 \cdot 10^{-2}$	0.46		15.3
2.0	1.5	0.56	0.51–0.61	0.1	0.939	$5.1 \cdot 10^{-3}$	0.17	0.39	1.3
			0.46–0.66	0.2		$2.2 \cdot 10^{-2}$	0.33		5.6
			0.43–0.73	0.3		$4.6 \cdot 10^{-2}$	0.50		11.8
2.5	0.9	0.52	0.47–0.57	0.1	0.937	$5.0 \cdot 10^{-3}$	0.18	0.42	1.2
			0.43–0.63	0.2		$2.0 \cdot 10^{-2}$	0.36		4.8
			0.39–0.69	0.3		$4.3 \cdot 10^{-2}$	0.54		10.4
3.0	0.6	0.50	0.45–0.55	0.1	0.934	$4.9 \cdot 10^{-3}$	0.19	0.43	1.2
			0.40–0.60	0.2		$1.8 \cdot 10^{-2}$	0.37		4.2
			0.36–0.66	0.3		$4.1 \cdot 10^{-2}$	0.56		9.5

Расчеты траекторий положительных однозарядных частиц в описанной цилиндрической системе проведены численно по программе ТЕО. В таблице представлены параметры системы с  $R/\rho = 100$  при различных ее длинах  $1.5 \leq L/R \leq 3.0$ : сила энергофильтра  $\beta = eV/\varepsilon$  ( $e$  — заряд частицы,  $\varepsilon$  — начальная энергия пучка),  $r_a$  и  $r_b$  — входная и выходная координаты основной траектории, вокруг которой происходит фокусировка,  $r_0$  — координаты крайних траекторий пучка при различной ширине входной щели  $s_0$ ,  $s$  — соответствующий ей размер выходной щели в меридианальной плоскости на заднем торцевом электроде. Азимутальный размер выходной щели равен  $\lambda = (s_0 r_b)/r_a$ . Приведены также величины дисперсии по энергии  $D$  и разрешающей способности  $\delta = \Delta\varepsilon/\varepsilon$ . Все линейные размеры отнесены к величине радиуса охватывающего цилиндра.

Из таблицы видно, что при увеличении длины системы сила, необходимая для фокусировки пучка вблизи внешнего цилиндра, сильно уменьшается, при этом несколько возрастают острота фокусировки и дисперсия, поэтому разрешающая способность по энергии увеличивается. Следует отметить, что отношение размеров входной и выходной щелей  $M$  значительно меньше единицы. При небольшом размере входной щели  $s_0 = 0.1R$   $M = (7-5) \cdot 10^{-2}$ , при  $s_0 = 0.2R$   $M = 0.12-0.09$ , а при широкой входной щели  $s_0 = 0.3R$   $M = 0.17-0.14$ .

В заключение отметим, что использование цилиндрической системы с осевым нитевидным электродом благодаря большой апертуре устройства позволяет проводить широкие пучки заряженных частиц. Это особенно важно при работе с монопольными масс-спектрометрами. Кроме того, изменение диаметра нити при одном и том же размере охватывающего цилиндра в пределах  $R/\rho \approx 50-200$  мало влияет на параметры системы. К тому же можно воспользоваться законом геометрического подобия, варьируя диаметр нити и получая требуемые габариты устройства. При этом все геометрические параметры меняются в соответствующее число раз, а электрические — остаются неизменными.

## Список литературы

- [1] Овсянникова Л.П., Пасовец С.В., Фишкова Т.Я. // ЖТФ. 1992. Т. 62. В. 12. С. 171–176.
- [2] Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я. // ЖТФ. 1994. Т. 64. В. 10. С. 174–177.