

12  
**Электростатический спектрограф для заряженных частиц, образованный дискретным плоским и коробчатым электродами. II.**

© Т.Я. Фишкова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
 194021 Санкт-Петербург, Россия  
 e-mail: fishkova@mail.ru

(Поступило в Редакцию 1 июня 2014 г.)

Путем численного моделирования исследован спектрограф для быстрого анализа пучков заряженных частиц по энергии, предложенный автором ранее, но с иным законом подачи потенциалов на разрезной плоский электрод - пропорционально корню четвертой степени из соотношения расстояний каждой части разрезного электрода к расстоянию его первой части от переднего торца спектрографа. Полученная при таком питании величина одновременно регистрируемых на одной линии энергий сфокусированных пучков заряженных частиц равна 200. Такая величина является наибольшей из достигнутых во всех известных электростатических спектрографах.

**Введение**

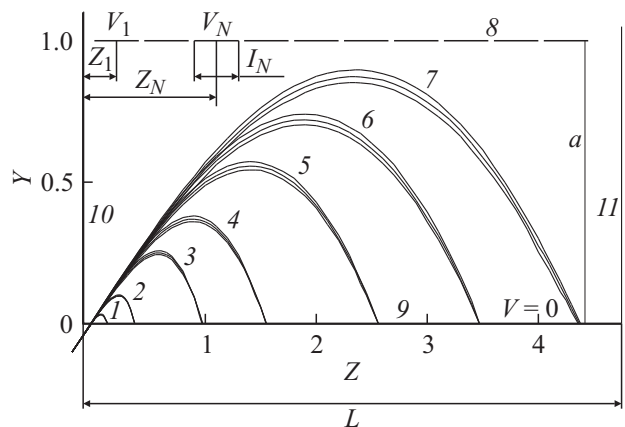
Ранее автором предложен [1] и рассчитан [2] электростатический спектрограф со стократным диапазоном одновременно (параллельно) регистрируемых энергий. Он состоит из двух электродов — полезадающего разрезанного на части плоского и электрода в виде заземленной коробки. При этом потенциалы на частях плоского электрода меняются пропорционально квадратному корню из отношения расстояний середины каждой части к расстоянию середины первой части от переднего торца спектрографа.

В настоящей работе с целью увеличения диапазона на одновременно регистрируемых энергий исследован спектрограф той же конструкции, но с другим законом изменения потенциалов на частях дискретного плоского электрода. Известно, что идеальным спектрографом является плоский конденсатор, длина пластин которого много больше расстояния между ними, при этом на одну из пластин подается постоянный рабочий потенциал, а другая заземлена. В строго однородном поле плоского конденсатора существует режим работы, в котором пучки заряженных частиц различных энергий фокусируются на одну и ту же линию. Однако при возрастании энергии частиц база такого анализатора (расстояние между источником и приемником пучков заряженных частиц) растет по линейному закону, поэтому с конструктивной точки зрения нереально одновременно анализировать пучки с разбросом по энергии более чем на порядок. Ранее в работе [3] для радиочастотных времяпролетных масс-анализаторов с целью создания поля квадрупольного типа предложена конструкция не в виде использующихся обычно гиперболических либо цилиндрических электродов, а в виде двух дискретных плоских электродов с линейным распределением высокочастотного потенциала на одном из них. В электростатическом спектрографе с разрезным плоским электродом при линейном распределении потенциалов на его частях удалось повысить диапазон

одновременно анализируемых энергий до 25 всего при пятикратном превышении его длины по сравнению с размером апертуры [4]. Следует ожидать, что диапазон можно еще расширить за счет меньшего роста потенциалов на отдельных частях разрезного плоского электрода. Поэтому автором исследованы случаи изменения потенциала на частях разрезанного плоского электрода, сначала возрастающего по закону квадратного корня [2], а в настоящей работе — по закону корня четвертой степени.

**Численные результаты**

Исследуемый электростатический спектрограф для заряженных частиц схематически представлен на рис. 1.



**Рис. 1.** Траектории пучков заряженных частиц 1–7 в широком диапазоне энергий в спектрографе из дискретного плоского электрода 8 и коробчатого электрода, образованного пластинами 9, 10, 11. Кривая 1 соответствует минимальной энергии пучка  $e_1$ , 2 — соответствует энергии  $e_2/e_1 = 5$ , 3 —  $e_3/e_1$ , 4 —  $e_4/e_1 = 50$ , 5 —  $e_5/e_1 = 100$ , 6 —  $e_6/e_1 = 150$ , 7 —  $e_7/e_1 = 200$ .

Электронно-оптические параметры спектрографа в режиме I

$e/e_1$	1	5	10	25	37.5	50	75	100	125	150	175	200
$z_f/a$	0.17	0.43	0.62	1.06	1.38	1.67	2.21	2.72	3.21	3.69	4.15	4.64
$D/a$	0.11	0.23	0.35	0.65	0.90	1.12	1.50	2.00	2.45	2.80	3.30	3.90
$\rho$	0.018	0.014	0.013	0.012	0.007	0.003	0.004	0.007	0.010	0.012	0.013	0.014

Он выполнен из двух плоско-параллельных пластин 8 и 9, перпендикулярно которым по их торцам на расстоянии  $L = 4.8a$  установлены плоские электроды 10, 11, соединенные в единое целое с пластиной 9. Пластина 8 разрезана на части, на которые подаются потенциалы  $V_N$ , изменяющиеся по закону, пропорциональному корню четвертой степени из отношения расстояний от переднего торцевого электрода до середины соответствующих частей разрезного электрода  $z_N$  к расстоянию до середины первой части  $z_1$ :  $V_N = V_1 \sqrt[4]{z_N/z_1}$ , где  $V_1$  — потенциал на первом по ходу пучка электроде. Коробчатый электрод заземлен.

Потенциалы на электродах разрезанной пластины определяются численно из условий фокусировки на одну и ту же линию пучков заряженных частиц, имеющих значительный разброс по энергии. Для выбранных автором ранее габаритных размеров спектрографа фокусировка находилась по четырем независимым параметрам: количеству частей разрезного электрода, положению объекта (источник заряженных частиц), положению линии фокусов, а также по углу наклона центральной траектории пучка на входе к продольной оси системы  $z$ .

При максимально возможном разбросе частиц по энергии найдены режимы работы спектрографа с приведенным выше законом подачи потенциалов на плоский электрод, разрезанный на десять равных частей, длина которых  $l_N = 0.4a$  при расстояниях между ними  $s_N = 0.05a$  ( $a$  — расстояние между плоско-параллельными пластинами 8, 9). Эти режимы соответствуют двум случаям, когда источник заряженных частиц расположен на нижней пластине 9 (режим I), либо вынесен за пределы поля (режим II). В обоих режимах фокусировка пучков осуществляется на нижнюю пластину. В таблице приведены основные параметры спектрографа, если источник расположен в точке с координатами  $y_i = 0, z_i = 0.05a$ , в зависимости от диапазона одновременно регистрируемых энергий  $E/E_1$ , где  $E_1$  — минимальная энергия частиц. Фокусировка пучков на пластину 9 имеет место при угле входа центральной траектории пучка  $\theta = 31^\circ$  и угле раствора пучка  $\alpha = \pm 1^\circ$  при  $eV_1 = 50E_1$  и  $V_N = V_1 \sqrt[4]{1 + 1.8(N - 1)}$ , где  $N$  — порядковый номер части плоского разрезного электрода. В таблице приведены основные параметры спектрографа:  $z_f$  — положение приемных щелей на линии фокусов,  $d$  — линейная дисперсия по энергии,  $\rho = \Delta e/e$  — разрешение по энергии.

На рис. 2 даны аналогичные параметры спектрографа для вынесенного за пределы поля источника с координатами  $y_i = -0.1a, z_i = -0.15a$ . Траектории пучков заряженных частиц в этом режиме с диапазоном энергий  $e/e_1 = 1-200$  приведены на рис. 1 (кривые 1-7). При этом фокусировка пучков осуществляется при несколько больших потенциалах на частях разрезного электрода  $eV_1 = 52.5E_1, V_N = V_1 \sqrt[4]{1 + 1.8(N - 1)}$  при меньших углах впуска и раствора пучков  $\theta = 30.5^\circ \pm 0.5^\circ$ . По сравнению с первым режимом у спектрографа с вынесенным источником положение приемных щелей и линейная дисперсия по энергии практически не меняются, при этом улучшается разрешение по энергии за счет ухудшения светосилы.

Таким образом, достигнута основная цель работы: в спектрографе с предлагаемым в настоящей работе питанием диапазон одновременно регистрируемых на одной линии энергий достигает двухсот как при источнике, расположенном на нижней пластине, так и с вынесенным за пределы поля. При одинаковых габаритных размерах спектрографов ( $L \sim 5a$ ) эта величина вдвое превышает диапазон, достигнутый в спектрографе с законом распределения потенциала пропорционально квадратному корню [2], и в восемь раз больше, чем в спектрографе с линейным распределением потенциала на дискретном электроде [4].

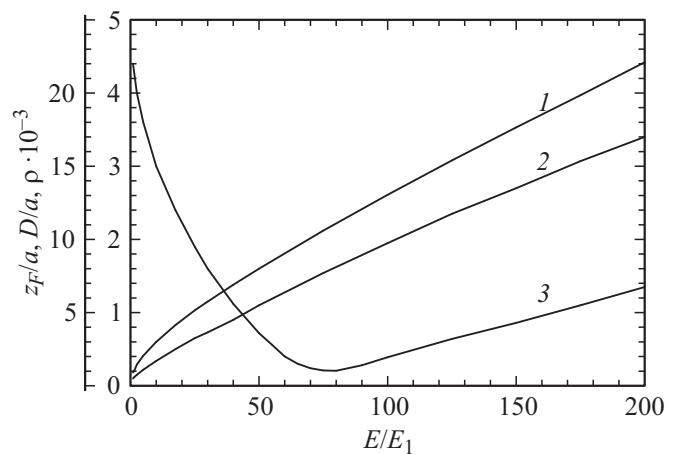


Рис. 2. Параметры спектрографа в зависимости от диапазона энергий пучков заряженных частиц для вынесенного за пределы поля источника: кривые 1 —  $z_f/a$ , 2 —  $D/a$ , 3 —  $\rho$ . Масштаб кривых 1, 2 обозначен слева от вертикальной оси, кривой 3 — справа.

## Заключение

Показано, что введение закона распределения потенциалов на частях дискретного плоского электрода пропорционально корню четвертой степени позволяет существенно расширить диапазон одновременно регистрируемых на линейном позиционно чувствительном детекторе энергий пучков заряженных частиц по сравнению с другими законами распределения потенциала на плоском разрезном электроде.

В дальнейшем с целью увеличения разрешающей способности по энергии в предложенном автором спектрографе из дискретного плоского и коробчатого электродов предполагается исследовать возможность комбинированного питания отдельных частей разрезанного электрода.

## Список литературы

- [1] Фишкова Т.Я. „Электростатический спектрограф для заряженных частиц“ Патент на полезную модель № 140365 зарегистрирован 08.04.2014, опубликован 10.05.2014 бюл. № 13.
- [2] Фишкова Т.Я. // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 7. С. 149–151.
- [3] Гуров В.С., Мамонтов Е.В., Дягилев А.А. // Масс-спектрометрия. 2007. Т. 4, № 2. С. 139–142.
- [4] Баранова Л.А. // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 2. С. 85–89.