

# Спектрограф заряженных частиц из дискретного плоского электрода с различным законом распределения потенциала и заземленного коробчатого электрода

© Т.Я. Фишкова

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

(Поступило в Редакцию 27 октября 2014 г.)

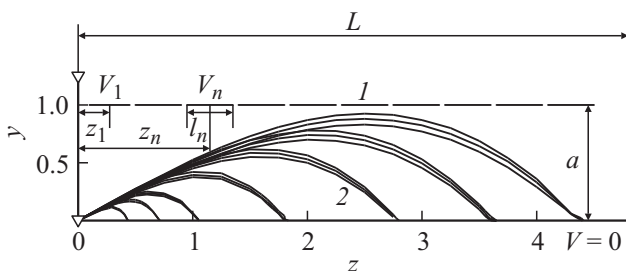
Теоретически исследован двухэлектродный спектрограф простой конструкции для быстрого анализа пучков заряженных частиц по энергии, предложенный автором ранее. Особенностью конструкции такого спектрографа является возможность подачи величин потенциалов на отдельные части разрезанного плоского электрода, меняющихся по различным законам. С помощью компьютерного моделирования найдены оптимальные режимы работы спектрографа, при которых диапазон одновременно регистрируемых энергий сфокусированных на одной линии пучков увеличивается по мере уменьшения степени роста потенциалов на дискретном плоском электроде и достигает наибольшей к настоящему времени величины, составляющей два порядка.

## Введение

Работа относится к области определения состава и свойств различных материалов, а также к корпускулярной диагностике плазмы путем энергетического анализа исходящих из них пучков заряженных частиц в широком диапазоне энергий. Целью работы является нахождение оптимально возможного диапазона одновременно (параллельно) регистрируемых энергий пучков заряженных частиц, сфокусированных на плоском позиционно-чувствительном детекторе (ПЧД), при различных законах распределения питающих напряжений, подаваемых на отдельные части разрезанного плоского электрода. Такое исследование проведено на базе предложенного автором ранее двухэлектродного спектрографа простой конструкции [1].

## Численные результаты

Конструкция исследуемого спектрографа подробно описана в работе [2] и схематически представлена на рис. 1. В соответствии с результатом работы [3], в



**Рис. 1.** Схема предлагаемого спектрографа с широким диапазоном одновременно регистрируемых энергий и траектории пучков заряженных частиц различных энергий.

которой получен максимальный диапазон одновременно регистрируемых энергий, длина системы по отношению к апертуре выбрана  $L/a = 4.8$  при количестве частей разрезного электрода  $n = 10$ , расположенных на расстоянии друг от друга  $s_n = 0.1a$ , и длине каждой части  $l_n = 0.4a$ .

Потенциалы на электродах разрезанной на  $n$  частей пластины определяются по эмпирической формуле

$$V_n = V_1(z_n/z_1)^k, \quad (1)$$

где  $V_1$  — потенциал первой по ходу пучка части дискретного электрода,  $z_1$  — расстояние от ее середины до переднего торца системы,  $z_n$  — расстояния от середины каждой последующей части разрезного электрода также до переднего торца системы. Следует указать на особенность предлагаемого питания спектрографа, связанную с тем, что степень роста потенциала  $k$  на частях дискретного электрода совпадает с показателем роста напряженности поля многоэлектродных систем с поперечными полями: так,  $k = 0$  соответствует однородному полю плоского конденсатора,  $k = 1$  — линейному полю квадрупольной линзы с гиперболической формой электродов,  $k = 2$  — квадратичному полю секступоля,  $k = 3$  — кубическому полю октуполя.

Потенциалы на дискретном плоском электроде  $l$  определяются из условий фокусировки на одну и ту же линию пучков заряженных частиц, имеющих значительный разброс по энергиям при заземленном коробчатом электроде 2. При выбранной геометрии устройства поиск условий фокусировки производится по положению объекта (источнику заряженных частиц), положению ПЧД (линии фокусов), а также по углу наклона центральной траектории пучка на входе к продольной оси системы.

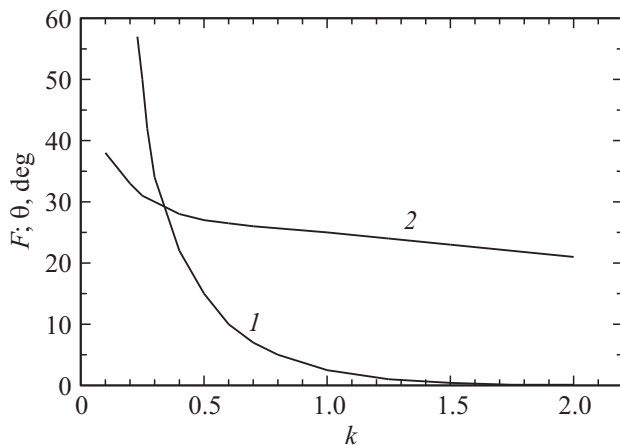
Расчеты проведены численно по программе автора ТЕО для пяти различных случаев питания дискретного

Основные параметры спектрографа с различного рода питанием дискретного электрода

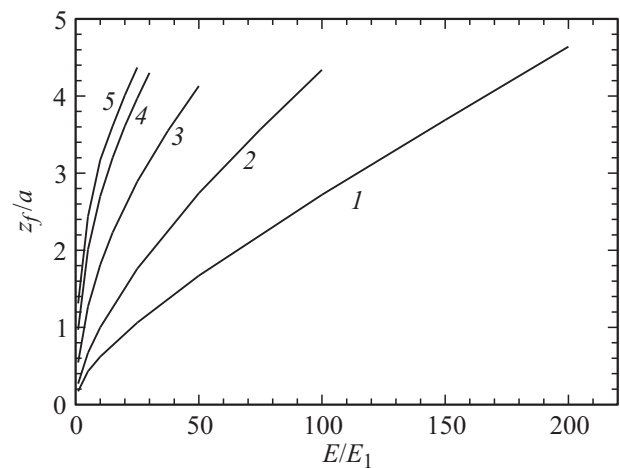
$k$	0.25		0.50		1.0		1.5		2.0	
	$E/E_1$	$D/a$	$\rho$	$D/a$	$\rho$	$D/a$	$\rho$	$D/a$	$\rho$	$D/a$
1	0.11	0.018	0.15	0.020	0.29	0.0034	0.45	0.015	0.55	0.026
5	0.23	0.015	0.40	0.018	0.66	0.0030	0.90	0.0033	0.95	0.0071
10	0.35	0.014	0.60	0.012	0.95	0.0021	1.15	0.0070	1.15	0.0087
15	0.40	0.013	0.80	0.005	1.15	0.0026	1.30	0.011	1.35	0.014
20	0.50	0.013	0.93	0.003	1.27	0.0032	1.50	0.014	1.50	0.018
25	0.65	0.012	1.05	0.001	1.50	0.0040	1.75	0.015	—	—
50	1.12	0.003	1.80	0.008	2.20	0.0045	—	—	—	—
100	2.00	0.007	2.80	0.014	—	—	—	—	—	—
150	2.80	0.012	—	—	—	—	—	—	—	—
200	3.90	0.014	—	—	—	—	—	—	—	—

плоского электрода в соответствии с формулой (1) при  $k = 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ . Для наглядности результатов выбран наименее трудоемкий для расчета режим работы спектрографа с источником и ПЧД, расположенными на плоском дне коробки 2. При этом с целью использования всего рабочего пространства спектрографа источник расположен вблизи переднего торца системы с координатами  $y_i = 0, z_i = 0.05a$ . Расстояние между плоскопараллельными пластинами 1, 2 принято за  $a = 1$ , все геометрические параметры выражены в единицах  $a$ , что дает возможность применять метод геометрического подобия для требуемой геометрии спектрографа. За единицу принята также минимальная величина регистрируемой энергии ( $E_1 = 1$ ).

На рис. 2 представлены параметры, обеспечивающие фокусировку пучков заряженных частиц на ПЧД, в зависимости от показателя роста потенциала на дискретном электроде. Это, во-первых, сила спектрографа на первой части дискретного электрода —  $F = eV_1/E_1$ , так как на основании  $V_1$  определяются потенциалы на последующих частях дискретного электрода в соответствии с формулой (1), во-вторых, величина угла впуска центральной



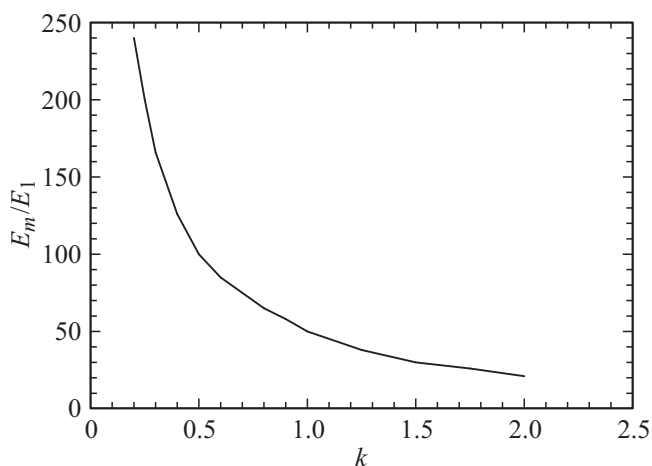
**Рис. 2.** Параметр  $F = eV_1/E_1$  (1) и угол впуска центральной траектории пучка  $\theta$  (2) в зависимости от показателя роста потенциала  $k$  на дискретном плоском электроде.



**Рис. 3.** Зависимость положения точек фокусировки  $z_f/a$  от диапазона одновременно регистрируемых энергий  $E/E_1$  при различных показателях роста потенциала на дискретном плоском электроде: 1 —  $k = 0.25$ , 2 — 0.5, 3 — 1, 4 — 1.5, 5 — 2.

траектории пучка  $\theta$ . При этих параметрах рассчитаны положения точек фокусировки пучков с углом раствора  $\alpha = \pm 1^\circ$  при различных способах питания дискретного электрода, при которых обеспечивается тот или иной диапазон одновременно регистрируемых энергий  $E/E_1$  (рис. 3). После чего найдены основные параметры спектрографа — линейная дисперсия и разрешение по энергии. Для исследуемого класса электростатических спектрографов с дискретным плоским электродом коэффициенты линейной дисперсии в единицах апертуры устройства  $D/a$  и разрешение по энергии  $\rho$  при угле раствора пучка  $\alpha = \pm 1^\circ$  представлены в таблице.

Из данных таблицы видно, что с уменьшением показателя роста потенциалов на частях разрезного плоского электрода линейная дисперсия по энергии падает. Поскольку габаритные размеры спектрографа остаются неизменными, максимальный диапазон одновременно регистрируемых энергий увеличивается. Наилучшее



**Рис. 4.** Максимально возможный диапазон одновременно регистрируемых энергий  $E_m/E_1$  при различных показателях роста потенциала на дискретном плоском электроде  $k$ .

разрешение по энергии имеет спектрограф с линейным распределением питающего потенциала, поэтому, если максимально требуемый диапазон энергий не превышает  $E_m/E_1 \leq 50$ , такое питание использовать предпочтительнее.

## Заключение

С использованием компьютерного моделирования исследован предложенный автором ранее электростатический спектрограф заряженных частиц простой конструкции из дискретного плоского электрода с различного рода питанием и заземленного коробчатого электрода. Предложена эмпирическая формула для потенциала, подаваемого на отдельные части дискретного плоского электрода. Численно найдены параметры спектрографа для пяти законов распределения потенциала на частях разрезанного электрода. Получено, что по мере уменьшения показателя степени роста питающего напряжения диапазон параллельно (одновременно) регистрируемых на линейном ПЧД энергий заряженных частиц увеличивается и достигает, как видно из итогового рис. 4, двух порядков, что является наибольшим диапазоном из полученных в известных ранее спектрографах заряженных частиц.

## Список литературы

- [1] Фишкова Т.Я. Электростатический спектрограф для заряженных частиц. Патент 140365.Б И 2014. № 13.
- [2] Фишкова Т.Я. // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 7. С. 149–151.
- [3] Фишкова Т.Я. // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 12. С. 156–158.