

Электростатический спектрограф для заряженных частиц, образованный дискретным плоским и коробчатым электродами

© Т.Я. Фишкова

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

(Поступило в Редакцию 19 декабря 2013 г.)

Предложен спектрограф простой конструкции для быстрого анализа пучков заряженных частиц по энергии, защищенный от проникновения собственных полей рассеяния, а также посторонних полей в рабочую область устройства. Его отличительной особенностью являются величины потенциалов, подаваемых на отдельные части разрезанного плоского электрода, которые меняются по закону квадратного корня расстояния от переднего торцевого электрода до середины соответствующей части. С помощью компьютерного моделирования найдены оптимальные режимы работы предлагаемого спектрографа, в которых диапазон одновременно регистрируемых энергий пучков заряженных частиц достигает двух порядков, что в несколько раз превышает наибольший диапазон известных до настоящего времени спектрографов.

Введение

Работа относится к области определения состава и свойств различных веществ, а также к корпускулярной диагностике плазмы путем энергетического анализа исходящих из них пучков заряженных частиц, имеющих широкий диапазон энергий. Для этой цели чаще всего используются электростатические спектрометры, в которых заряженные частицы различных энергий движутся по одной и той же траектории, а спектр по энергии снимается путем изменения разности потенциалов между электродами системы. Этот процесс занимает много времени, поэтому возникает необходимость одновременного (параллельного) детектирования пучков заряженных частиц различных энергий. Для обеспечения экспресс анализа состава различных материалов в последнее время используются электростатические многоканальные анализаторы (спектрографы) различных типов. Это — спектрографы с простой формой электродов плоского [1] и цилиндрического [2] типов зеркал с линейным распределением потенциала на одном из электродов, усеченного цилиндра [3], а также степенные с плоскостью симметрии, но со сложной формой электродов [4]. Наибольший диапазон параллельно регистрируемых энергий достигнут в электростатическом спектрографе для вторичных электронов с поверхности твердого тела на базе двумерного поля квадрупольного (авторы называют его гиперболическим), в котором осуществляется фокусировка по углу пучков электронов независимо от их энергии [5]. Авторы схематично приводят конструкцию спектрографа, который способен анализировать кинетическую энергию частиц, различающуюся приблизительно в 50 раз. Он состоит из трех плоских электродов, расположенных под углами друг к другу в виде треугольника, причем один из электродов разрезан на пять частей. Напряжения на электродах подобраны таким образом, чтобы обеспечить

удовлетворительную аппроксимацию гиперболического поля. Значительно проще конструкция, в которой осуществляется гиперболическое поле, предложена в работе [1]. Она представляет собой плоский конденсатор с передним торцевым электродом и линейным распределением потенциала на одном из плоских электродов (либо этот электрод разрезан на части, потенциалы на которых меняются по линейному закону). Устройство работает в зеркальном режиме при запуске и выводе пучков через нижний заземленный электрод. Фокусировка вне зависимости от энергии осуществляется на одну линию, поэтому для регистрации спектра используется ПЧД (позиционно чувствительный детектор). При длине системы, в пять раз превышающей величину апертуры конденсатора, диапазон одновременно регистрируемых энергий равен 25. Недостатком такого спектрографа является то, что его конструкция усложнена в связи с наличием у плоского конденсатора открытого заднего торца, поэтому для обеспечения требуемого при работе гиперболического поля на краях по периметру спектрографа размещены прямоугольные рамки.

Целью настоящей работы является улучшение основного эксплуатационного параметра спектрографа — увеличение диапазона одновременно регистрируемых энергий, а также упрощение его конструкции.

Численные результаты

Достижение указанной цели обеспечивается в предложенном автором электростатическом спектрографе для заряженных частиц [6], схематически приведенном на рис. 1. Он выполнен из двух плоскопараллельных пластин 8 и 9, перпендикулярно которым по их торцам установлены плоские электроды 10, 11, соединенные в единое целое с пластиной 9. Таким образом, конструкция представляет собой коробку с крышкой, которой служит пластина 8. Она отстоит от торцевых электродов на

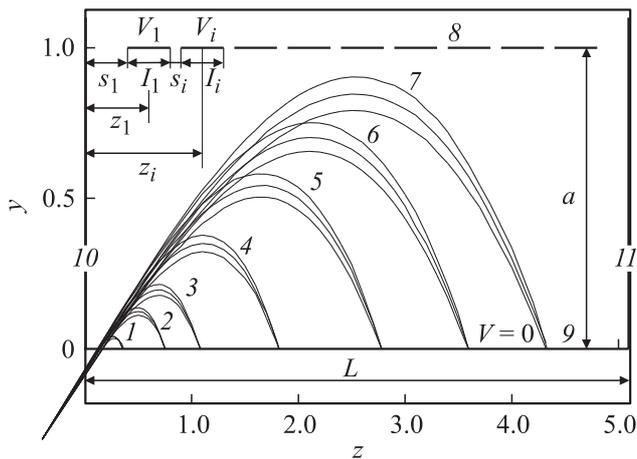


Рис. 1. Траектории пучков заряженных частиц 1–7 с диапазоном изменения энергии $E_7/E_1 = 100$ в предлагаемом электростатическом спектрографе, состоящем из разрезанного на части плоского электрода 8 и коробчатого электрода, образованного пластинами 9–11.

расстояние, зависящее от режима работы спектрографа, и должно быть значительно меньше расстояния до его рабочей области, чтобы предотвратить проникновение собственных полей рассеяния, а также посторонних полей в область прохождения пучков 1–7. Пластина 8 разрезана на части, длина которых не превышает половины апертуры $l_i \leq 0.5a$, где a — расстояние между плоскопараллельными пластинами 8, 9. Расстояния между соседними электродами разрезанной пластины не превышает $s_i \leq 0.1a$. На них подаются потенциалы V_i , изменяющиеся по закону, пропорциональному квадратному корню расстояния z_i от переднего торцевого электрода до середины соответствующей части разрезного электрода $V_i = V_1 k \sqrt{z_i/a}$, где V_1 — потенциал на первом по ходу пучка электроде. Коэффициент k определяется величиной $k = \sqrt{a/z_1}$, где z_1 — расстояние от передней торцевой стенки до середины первого электрода. Коробчатый электрод заземлен.

Потенциалы на электродах разрезанной пластины задаются из условий фокусировки на одну и ту же линию пучков заряженных частиц, имеющих значительный разброс по энергиям. Поиск условий фокусировки производится по пяти независимым параметрам: соотношению между длиной и апертурой устройства, положению объекта (источника заряженных частиц) и положению линии фокусов, по количеству частей разрезанной пластины и их длине, а также по углу наклона центральной траектории пучка на входе к продольной оси системы.

Расчеты, проведенные численно по программе автора ТЕО, показали, что в предлагаемом спектрографе, длина которого приблизительно равна пяти апертурам устройства, одновременно могут быть сфокусированы на одной линии и зафиксированы с помощью ПЧД частицы в диапазоне энергий, меняющихся в 50–100 раз. В зависимости от поставленной задачи диапазон одновременно

регистрируемых энергий может быть расширен. Для этого следует увеличить количество частей, на которое разрезана верхняя пластина конденсатора, что связано лишь с увеличением длины системы.

Найдены два режима работы предлагаемого электростатического спектрографа в случае, когда источник заряженных частиц расположен на нижней пластине конденсатора, а также вынесен за пределы поля. Эти режимы обладают оптимальной фокусировкой на одну линию частиц со стократным разбросом по энергии ($E_7/E_1 = 100$). Расстояние между плоскопараллельными пластинами 8, 9 принято за $a = 1$, а все геометрические параметры выражены в единицах a . Это дает возможность применить метод геометрического подобия, исходя из размеров того или иного изготавливаемого устройства. Минимальная величина регистрируемых энергий принята за единицу. Поскольку в электростатических энергоанализаторах существует закон электрического подобия, то изменение абсолютной величины энергии заряженных частиц при аналогичном изменении потенциалов на разрезанном плоском электроде оставляет неизменным диапазон одновременно регистрируемых энергий.

I режим. Длина спектрографа равна $L = 5a$. Источник и приемник расположены на нижнем плоском электроде, верхний электрод, находящийся на расстоянии $s_1 = 0.1a$ от переднего и на $s_9 = 0.2a$ от заднего торцов системы, разрезан на восемь равных частей длиной $l_i = 0.5a$ с расстоянием друг от друга $s_i = 0.1a$. При впуске пучков заряженных частиц с начальными координатами $y_0 = 0$, $z_0 = 0.1a$ под углами к продольной оси z , равными $\theta = 30^\circ \pm 1^\circ$, режим работы с фокусировкой на нижнюю пластину конденсатора в диапазоне энергий пучков, различающихся в 100 раз, осуществляется при $eV_1 = 20E_1$ и $V_i/V_1 = 1.69\sqrt{z_i/a}$.

Для удобства расположения исследуемого объекта найден также режим работы II спектрографа длиной $L = 5.1a$ при вынесенном источнике (рис. 1). Начальные координаты пучков заряженных частиц равны $y_0 = -0.3a$, $z_0 = -0.4a$. Верхний электрод расположен на расстоянии $s_1 = 0.4a$ от переднего и $s_{10} = 0.3a$ от заднего торцов системы. Он разрезан на девять частей длиной $l_i = 0.4a$, находящихся на одинаковом расстоянии $s_i = 0.1a$ друг от друга. При впуске частиц различных энергий под углами к продольной оси z , равными $\theta = 29^\circ \pm 1^\circ$, режим работы с фокусировкой на нижнюю пластину конденсатора в том же диапазоне энергий пучков, что в режиме I, различающихся в 100 раз, осуществляется при $eV_1 = 24E_1$ и $V_i/V_1 = 1.29\sqrt{z_i/a}$. Для обоих режимов работы электронно-оптические параметры спектрографа приведены на рис. 2, a, b , где E и E_1 — энергия заряженных частиц и их минимальная энергия, Z_f — положение соответствующих щелей в нижнем электроде, на которые осуществляется фокусировка, $\rho = \Delta E/E$ — разрешение по энергии. Следует отметить, что наибольший диапазон одновременно регистрируемых на линейном ПЧД энергий, который

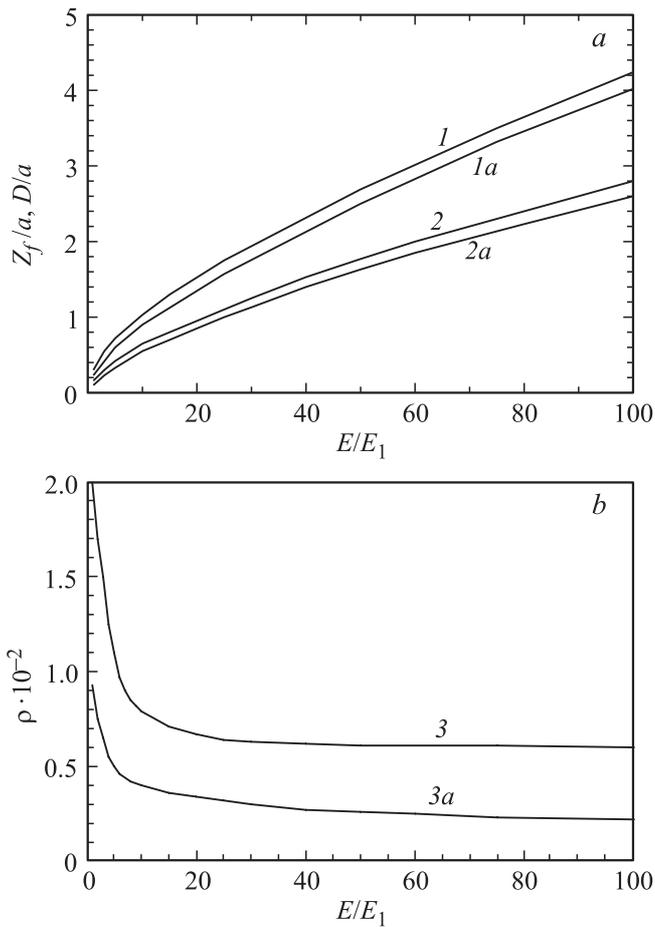


Рис. 2. Электронно-оптические параметры спектрографа в зависимости от энергии пучков заряженных частиц: а) 1 — местоположение щелей в плоском электроде Z_f/a , 2 — линейная дисперсия по энергии D/a ; б) 3 — разрешение по энергии ρ . Кривые 1, 2, 3 относятся к вынесенному за пределы поля источнику; кривые 1, а–3, а — к источнику, расположенному на заземленном плоском электроде.

равен 50, достигнут в спектрографе с гиперболическим полем [5]. В упрощенной конструкции спектрографа с таким полем [1] диапазон энергий равен 25, а его увеличение возможно лишь при сильном удлинении системы. Для сравнения — при одинаковых габаритных размерах устройств в предлагаемом спектрографе диапазон одновременно регистрируемых на линейном ПЧД энергий достигает 100. Кроме того, предлагаемая конструкция проще, чем в работах [1, 5], к тому же она закрыта от проникновения посторонних электростатических полей.

Заключение

Автором предложен [6] и исследован с помощью компьютерного моделирования электростатический спектрограф заряженных частиц простой конструкции, состоящей из плоских электродов: заземленного коробчатого и дискретного плоского электрода, на отдель-

ные части которого подаются потенциалы, изменяющиеся по закону, пропорциональному квадратному корню расстояния от переднего торца системы до середины соответствующей части. Путем компьютерного моделирования показано, что в таком спектрографе диапазон параллельно (одновременно) регистрируемых на линейном позиционно-чувствительном детекторе энергий заряженных частиц достигает двух порядков. На работу предлагаемого устройства не влияют собственные поля рассеяния, а его рабочая область закрыта от проникновения посторонних электростатических полей.

Численно найдены оптимальные (с точки зрения фокусировки на одну линию пучков заряженных частиц в широком диапазоне изменения их энергий) режимы работы в двух случаях, когда источник расположен на плоском электроде и при вынесенном за пределы поля источнике. В обоих случаях энергии одновременно регистрируемых частиц различаются в 100 раз, что в 2–4 раза больше, чем у лучших известных спектрографов.

Список литературы

- [1] Баранова Л.А. ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 2. С. 85–89.
- [2] Read F.H. Rev. Sci. Instr. 2002. Vol. 73. N 3. P. 1129–1139.
- [3] Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я. ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 11. С. 133–135.
- [4] Краснова Н.К. ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 6. С. 97–103.
- [5] Jacka M., Kirk M., Gomati M.M.El., Prutton M. Rev. Sci. Instr. 1999. Vol. 70. N 5. P. 2282–2287.
- [6] Фишкова Т.Я. „Электростатический спектрограф для заряженных частиц“. Решение о выдаче патента на полезную модель по заявке № 2013142083 от 7.11.2013.