

## Двухэлектронный энергоанализатор заряженных частиц с квазилинейным электростатическим полем

© Т.Я. Фишкова

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

(Поступило в Редакцию 18 июля 2011 г.)

Теоретически исследована предложенная автором простая конструкция электростатического энергоанализатора вторичных электронов, состоящая из двух электродов — плоского и в виде двугранного угла. Получена формула для распределения потенциала такого устройства. Проведены численные расчеты его параметров при работе в режимах спектрометра и спектрографа. Система предназначена для определения состава поверхности образца, облучаемая первичными электронами либо рентгеновским излучением.

### Введение

Одновременное (параллельное) детектирование оже и других возбужденных электронов в широком диапазоне изменения их энергий обеспечивает быстрое определение химического состава поверхности различных материалов. Для разделения таких электронов по энергии используются электростатические многоканальные анализаторы (спектрографы) различных типов, которым в последнее время посвящен целый ряд работ. Это — спектрографы с простой формой электродов типа плоского зеркала [1], цилиндрического зеркала [2], усеченного цилиндра [3], а также степенные с плоскостью симметрии [4], однако форма электродов последнего не столь проста, как в [1–3]. Особый интерес представляет случай, когда точки фокусировки пучков различных энергий лежат на одной линии и такие пучки можно фиксировать с помощью позиционно-чувствительного детектора (ПЧД) [1,4].

В работе [5] описан новый электростатический спектрограф заряженных частиц на базе двумерного поля квадруполя (авторы называют его гиперболическим), который способен анализировать кинетическую энергию частиц, различающуюся приблизительно в 50 раз. Отличие такого спектрографа от исследованных ранее состоит в том, что плоскостью дисперсии, в которой происходит разделение пучка по энергиям, а также его фокусировка по углу раствора, является поперечная плоскость системы, а не продольная, как принято обычно в том числе и в спектрографах [1–4]. Авторами [5] теоретически получены условия работы спектрографа в двух режимах фокусировки пучка: из точки в точку и из параллельного пучка в точку. Разработана конструкция прибора, состоящая из шести плоских электродов, напряжения на которых подобраны таким образом, чтобы обеспечить удовлетворительную аппроксимацию гиперболического поля.

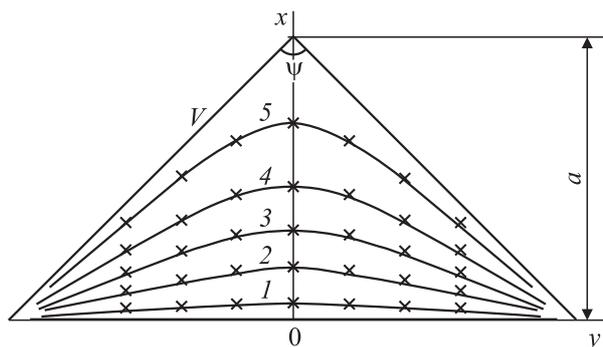
### Результаты

Целью настоящей работы является исследование упрощенной конструкции предложенного в работе [5] электростатического энергоанализатора, в том числе его работа в режиме спектрографа. Предлагаемый энергоанализатор заряженных частиц образован двумя электродами, один из которых представляет собой двугранный угол величиной  $\psi = 90^\circ$  либо  $120^\circ$ , а другой является плоским и расположен перпендикулярно биссектрисе двугранного угла на расстоянии  $a$  от его вершины. Зазоры между электродами малы ( $l \leq 0.1a$ ). Впуск и вывод пучка заряженных частиц осуществляется через плоский электрод.

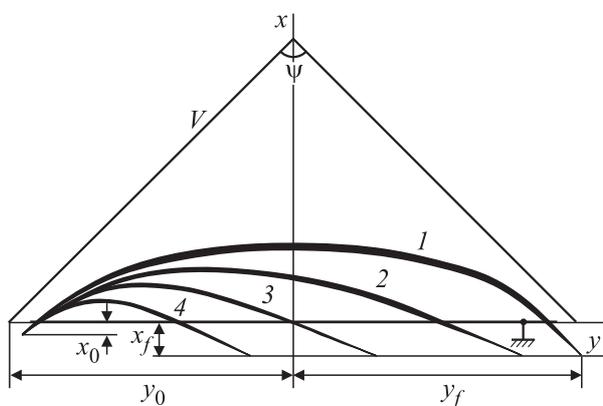
Известно, что напряженность поля квадруполя, образованного четырьмя гиперболическими электродами меняется строго по линейному закону. Однако из-за сложности формы электродов ее обычно упрощают таким образом, чтобы закон изменения напряженности квадруполюсного поля мало отличался от линейного. В ранних работах [6,7] предложены и рассчитаны по аналитическим формулам двухэлектродные энергоанализаторы, один из электродов которых представляет собой двугранный угол, а второй имеет цилиндрическую либо плоскую форму. Меняя величину двугранного угла  $\psi = \pi/n$ , где  $n = 1, 2, 3 \dots$ , можно получить однородное поле плоского конденсатора ( $n = 1$ ), квазилинейное поле квадруполя ( $n = 2$ ), квазиквадратичное поле секступоля ( $n = 3$ ) и т.д.

Схематически сечение предлагаемой конструкции, образованной электродом в виде двугранного угла величиной  $\psi = 90^\circ$  и плоским электродом, представлено на рис. 1. Автором получено аналитическое выражение распределения потенциала такого устройства, выведенное на основании формул работ [6,7], которое имеет следующий вид:

$$\frac{\Phi(x, y)}{V} = 1 - (p^2\pi)^{-1} \times \operatorname{arctg} \frac{2p[(1-x)^2 - y^2]}{1 - p^2\{[(1-x)^2 + y^2]^2 - (py)^2\}}.$$



**Рис. 1.** Поперечное сечение двухэлектродного энергоанализатора с ходом эквипотенциалей. Сплошные кривые — численный расчет, крестиками отмечены расчеты по формуле. Кривая 1 —  $\Phi/V = 0.1$ , 2 — 0.3, 3 — 0.5, 4 — 0.7, 5 — 0.9.



**Рис. 2.** Ход траекторий заряженных частиц в режиме работы системы в качестве спектрометра (кривая 1) и в качестве спектрографа (кривые 2–4), энергия частиц  $\epsilon_0$ : 1 — 1, 2 — 0.8, 3 — 0.6, 4 — 0.4.

Здесь  $V$  — напряжение на электроде в виде двугранного угла при заземленном плоском электроде,  $p = 1/\sqrt{3}$  — постоянная величина. Координаты  $x, y$  выражены в единицах расстояния между вершиной двугранного угла и плоским электродом  $a$ , что обеспечивает геометрическое подобие системы. Величины потенциалов, полученные по формуле, на рис. 1 отмечены крестиками. Кроме того, распределение потенциала такого устройства, рассчитанное численно, показано на этом же рисунке сплошными линиями. Их отличие от аналитических значений не превышает 5%. Поскольку ход эквипотенциалей антисимметричен относительно средней плоскости системы, проходящей через биссектрису двугранного угла, в процессе расчетов траекторий заряженных частиц стало ясно, что оптимальные параметры такого анализатора по энергии ожидаются в случае зеркально симметричного хода траекторий пучка относительно средней плоскости системы (см. траектории 1 на рис. 2).

Численное моделирование описанной выше электростатической системы проведено по программе автора для плоской задачи. Найдены условия ее работы в режиме спектрометра для различных местоположений

объекта и детектора с фокусировкой пучка в пределах угла его раствора  $\Delta\alpha = \pm 3^\circ$  при большой величине коэффициента линейной дисперсии по энергии, равной  $D = (1 - 2)a$ . Так, у анализатора с величиной двугранного угла  $\psi = 90^\circ$  имеется интересный режим работы для случая, когда источник вынесен за пределы поля на расстоянии  $x_0 = 0.15a$  при его расстоянии до средней плоскости системы  $y_0 = 0.95a$  и силе анализатора  $\eta = eV/\epsilon_0 = 0.65$  ( $e, \epsilon_0$  — заряд и энергия частиц). При этом в точке, расположенной на плоском электроде ( $x_f = 0$ ) на расстоянии  $y_f = 0.89a$  от средней плоскости системы, осуществляется острая фокусировка пучка с углом раствора  $\alpha_0 = (61 \pm 1)^\circ$  в пятно размером  $s = 10^{-3}a$ .

В энергоанализаторе с величиной двугранного угла  $\psi = 120^\circ$  имеется режим работы при удобном расположении исследуемого объекта с точки зрения попадания на него первичного либо другого излучения. При начальных координатах  $x_0 = 0.2a, y_0 = 1.75a$  и силе энергоанализатора  $\eta = 0.33$  размер пятна в фокусе ( $x_f = 0.17a, y_f = 1.72a$ ) при  $\Delta\alpha = \pm 1^\circ$  равен  $s = 10^{-3}a$ , а при  $\Delta\alpha = \pm 3^\circ$   $s = 3 \cdot 10^{-3}a$ . При этом коэффициент линейной дисперсии по энергии равен  $D = 1.1a$ . В случае фокусировки такого пучка на плоском электроде при силе энергоанализатора  $\eta = 0.5$  дисперсия по энергии достигает  $D = 2.0a$ , а размеры сфокусированного пучка не меняются.

Данный энергоанализатор с квазилинейным полем может работать также в режиме спектрографа, т.е. обеспечивать в некотором относительно небольшом диапазоне энергий при одних и тех же потенциалах на электродах одновременную фокусировку пучка заряженных частиц в разных точках, которые лежат на одной линии, поэтому пучки с различными энергиями можно фиксировать с помощью ПЧД.

Получение спектра в большом диапазоне энергий можно осуществить двумя способами. Первый способ использован в работах [2,5], в которых для решений этой задачи подается определенный потенциал, подобранный таким образом, чтобы фокусировать последовательно пучки разных энергий. В спектрографе работы [5] такая фокусировка осуществляется на один из заземленных плоских электродов системы, вдоль которого размещается линейный ПЧД. В спектрографе работы [2] электроны, выходящие из точки на оси коаксиальных цилиндров, внешний из которых разрезан на восемь частей, фокусируются на поверхность внутреннего цилиндра. Автор этой работы пишет, что для регистрации электронов надо использовать ПЧД. Однако возникают сомнения относительно такой возможности, поскольку о существовании ПЧД цилиндрической формы в настоящее время неизвестно.

Второй способ, при котором энергоанализатор имеет всего два электрода, состоит в том, что развертка спектра осуществляется путем последовательного изменения потенциала ползающего электрода по линейному относительно энергии закону при постоянной силе энергоанализатора.

Последний способ используется в предлагаемом устройстве. Путем варьирования трех параметров: положения объекта, силы анализатора и угла впуска частиц определялось положение линии фокусов для пучков различных энергий. При этом выбирались такие режимы работы, которые обеспечивали фокусировку в наибольшем диапазоне энергий. В энергоанализаторе с величиной двугранного угла  $\psi = 90^\circ$  удалось найти интересный режим работы в случае объекта, вынесенного за пределы поля ( $x_0 = 0.05a$ ,  $y_0 = 0.95a$ ), и силе анализатора  $\eta = 0.5$ . При изменении энергии пучка в 2.5 раза фокусировка осуществляется на линии, расположенной на расстоянии  $x_f = 0.13a$  от плоского электрода. При этом для углов впуска  $\alpha_0 = (58 \pm 2)^\circ$  размер пятна во всех каналах не превышает  $s = 5 \cdot 10^{-3}a$  (см. рис. 2).

При возрастании величины двугранного угла полезадающего электрода диапазон одновременной фокусировки частиц различных энергий уменьшается, однако возрастают дисперсия по энергии и светосила системы. Так, при  $\psi = 120^\circ$  в случае  $x_0 = 0.1a$ ,  $y_0 = 1.4a$  при силе анализатора  $\eta = 0.48$  на линии, расположенной на расстоянии  $x_f = 0.13a$  при углах впуска  $\alpha_0 = (58 \pm 3)^\circ$ , осуществляется острая фокусировка пучков не хуже  $s = 4 \cdot 10^{-3}a$ , а дисперсия по энергии достигает  $D = 1.7a$ . При этом диапазон изменения энергии сфокусированных частиц лежит в пределах 25%.

## Заключение

Предложен электростатический анализатор заряженных частиц по энергии, состоящий из двух электродов простой формы — плоского и в виде двугранного угла.

Получена формула распределения потенциала такого устройства. Путем численного моделирования рассчитаны параметры энергоанализатора и определены оптимальные режимы его работы в качестве спектрометра при величинах двугранного угла, равных  $90^\circ$  и  $120^\circ$ . Найдены также параметры предлагаемого анализатора в режиме работы спектрографа, когда точки фокусировки пучков заряженных частиц различных энергий лежат на одной линии, вынесенной за пределы поля, и их регистрация может осуществляться с помощью ПЧД. При этом регистрация пучков с существенно большим разбросом по энергии возможна путем последовательного изменения разности потенциалов между электродами по линейному относительно энергии закону при постоянной силе анализатора. Описаны предложенные в последнее время электронные спектрографы, в том числе такие, у которых для регистрируемых энергий электронов используются многоэлектродные электростатические системы.

## Список литературы

- [1] *Yagashiat A.* // J. Appl. Phys. Part. 1. 1986. Vol. 25. P. 657.  
 [2] *Read F.H.* // Rev. Scien. 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., Gjmati M.M., Putton M.* // Rev. Sci. Instr. 1999. Vol. 70. N 5. P. 2282–2287.  
 [6] *Фишкова Т.Я.* // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 7. С. 1358–1364.  
 [7] *Фишкова Т.Я.* // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 5. С. 925–929.