

10

©1994 г.

## КОНИЧЕСКИЕ ЭНЕРГОАНАЛИЗАТОРЫ С ФОКУСИРОВКОЙ ВТОРОГО ПОРЯДКА

*А.А. Трубицын*

Численно исследованы условия осуществления фокусировки второго порядка в конических схемах. Для систем с совмещенными вершинами получены зависимости угла фокусировки второго порядка от приведенной энергии электронов, имеющие вид линейно возрастающих функций. Зависимости представлены при различных значениях угла полураствора внутреннего конуса. Представлены зависимости угла фокусировки второго порядка от положения точечного источника на оси симметрии и от угла полураствора конусов для систем с параллельными образующими. Отмечена возможность достижения фокусировки второго порядка в конических системах конечных размеров. Приведена электронно-оптическая схема одного из таких устройств.

Исследование угловых распределений и энергетических спектров потоков вторичных электронов позволяет получить важнейшую информацию о структуре приповерхностной области, ее физическом и химическом состоянии. В качестве электронных спектрометров наряду с широко используемыми анализаторами на базе сферической и цилиндрической оптики находят применение системы с электродами конической формы, обладающие рядом полезных качеств.

В данной работе проведено численное исследование электростатических конических энергоанализаторов с разнесенными и совмещенными вершинами на базе методики, предложенной и развитой в [1,2].

В работе [3] построена приближенная теория соосных конических систем с совмещенными вершинами. Предложенный приближенный подход позволил провести исследование энергоанализаторов в режиме фокусировки первого порядка.

Режим угловой фокусировки второго порядка более предпочтителен и чаще используется на практике, поскольку в этом случае существенно ослабляется противоречие между требованиями одновременно высоких светосилы и разрешающей способности. В данной работе рассчитаны параметры энергоанализаторов с фокусировкой второго порядка при расположении точечного источника на оси симметрии системы (на рис. 1 показана верхняя половина сечения системы меридиальной плоскостью) и аналитическом распределении потенциала [3] (в

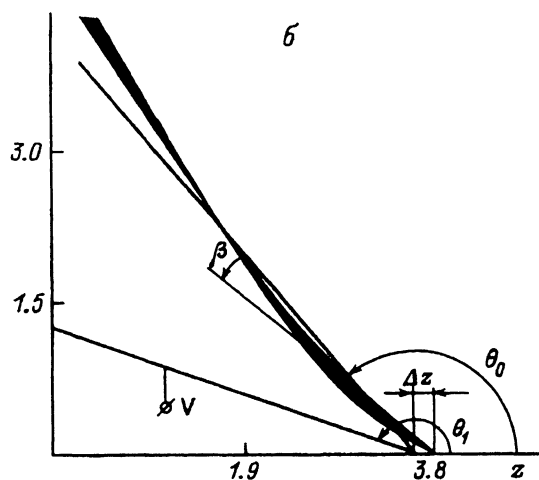
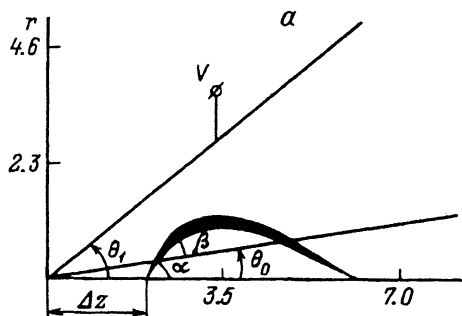


Рис. 1. Конические системы с совмещенными вершинами.

сферической системе координат  $(\rho, \theta, \psi)$

$$\psi(\theta) = V \frac{\ln(\operatorname{tg}(\theta/2)/\operatorname{tg}(\theta_0/2))}{\ln(\operatorname{tg}(\theta_1/2)/\operatorname{tg}(\theta_0/2))},$$

где  $\theta_0$  — угол полураствора внутреннего конуса, потенциал которого принят равным нулю;  $\theta_1$  — угол полураствора внешнего конуса, имеющего потенциал  $V$ .

На рис. 2 представлены зависимости величины угла  $\beta_0 = \alpha_0 - \theta_0$ , вблизи которого выполняется условие второго порядка, от величины приведенной энергии электронов

$$q = \frac{E}{V} \ln \frac{\operatorname{tg} \theta_1/2}{\operatorname{tg} \theta_0/2}.$$

Здесь  $\beta_0$  — угол между образующей внутреннего конуса и траекторией частицы;  $\alpha_0$  — угол эмиссии частицы;  $E$  — энергия частицы. Зависимость  $\beta_0$  от  $q$  носит линейный характер с достаточно высокой крутизной, что дает дополнительные возможности при построении энергоанализирующих систем по сравнению с цилиндрическим зеркалом. Имеется зависимость угла  $\beta_0$  фокусировки второго порядка от величины угла полураствора внутреннего конуса для каждого фиксированного  $q$ . При этом зависимость в диапазоне  $\theta_0 = 10-40^\circ$  выражена слабо.

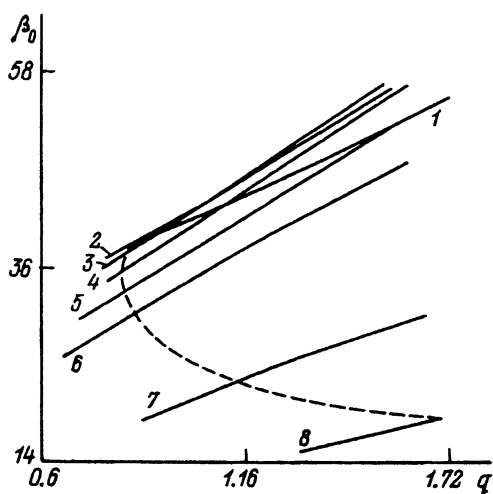


Рис. 2. Зависимости угла фокусировки второго порядка от приведенной энергии.

$\theta_0$ , град: 1 — 10, 2 — 20, 3 — 30, 4 — 40, 5 — 50, 6 — 60, 7 — 90, 8 — 110.

Штриховая кривая на рис. 2 является границей областей мнимых (слева от кривой) и действительных (справа от кривой) изображений. Видно, что с ростом  $\theta_0$  для получения действительного изображения источника необходимо увеличивать приведенную энергию  $q$ .

Относительная линейная дисперсия  $D/|r|$ , где  $D = E \cdot \partial|r|/\partial E$  — линейная дисперсия,  $|r|$  — расстояние между источником и изображением, увеличивается при росте  $q$  и может значительно превышать (в несколько раз) соответствующий параметр цилиндрического зеркала.

Конические энергоанализаторы с небольшим значением  $\theta_0$  (до  $30^\circ$ ) (рис. 1, а) имеют малый радиус изображения и высокую относительную линейную дисперсию (так, при  $q = 1.4$  и  $\theta_0 = 10^\circ$  величина  $D/|r| \cong 5$ ), что делает их перспективными с точки зрения оптимизации спектрометров по многоцелевым критериям, например по обеспечению необходимой геометрии эксперимента, высоких эксплуатационных характеристик и по простоте конструкции. Практический интерес представляет случай с  $q = 1.76$ ,  $\theta_0 = 27^\circ$ , где угол фокусировки второго порядка  $\alpha_0 = 90^\circ$  ( $\beta_0 = 63^\circ$ ), а электроны выходного потока имеют малые значения радиальной составляющей скорости. При диапазоне входных углов  $\Delta\alpha = \pm 6^\circ$  разброс выходных углов составляет  $\pm 1^\circ$ , относительные координаты точки фокуса имеют следующие значения:  $|z_F - z_S|/\Delta z \cong 54.3$ ,  $r_F/\Delta z \cong 7.2$ , где  $z_F$ ,  $r_F$ ,  $z_S$  — координаты фокуса и источника в системе координат, связанной с вершинами конусов;  $\Delta z$  — расстояние между аксиальным источником и вершинами. Указанные особенности позволяют использовать анализатор для проведения измерений интенсивности потока вторичных электронов по полярному углу в диапазоне  $-\pi/2 - +\pi/2$  (для чего необходимо совместить поверхность объекта с меридиально секущей плоскостью, перпендикулярной плоскости рисунка), а при последовательном вращении образца вокруг собственной нормали — и по азимутальному углу в диапазоне  $0 - 2\pi$ . Вследствие малого разброса выходных углов имеется возможность осуществления режима торможения в двухступенчатом варианте устройства с помощью системы из двух плоских сеток, расположенной между первой и второй ступенями.

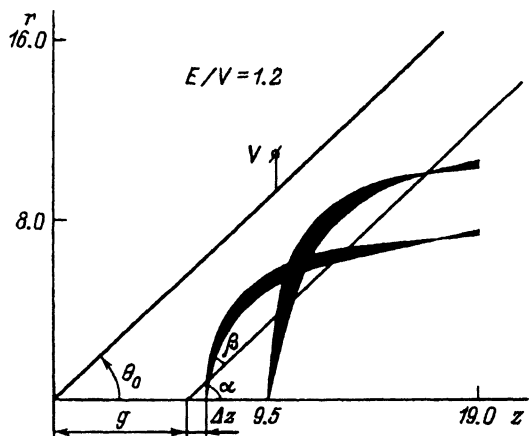


Рис. 3. Конические системы с параллельными образующими.

Конические системы с  $\theta_0 > 90^\circ$  (рис. 1, б), или в терминологии работы [3] с впуском электронов через внешний электрод, менее полезны для практики и могут найти применение в качестве ступеней согласования в многокаскадных конструкциях.

Распределение потенциала в случае конических систем с разнесенными вершинами не имеет аналитического выражения. Наиболее общий подход вычисления электростатического поля неаналитических систем основывается на использовании численных методов. В частности, в данной работе нашел применение метод граничных элементов [4] в комбинации с попеременно-треугольным методом с чебышевским ускорением [5]. Траекторный анализ рассматриваемых систем (на рис. 3 также показана лишь верхняя половина трансаксиального сечения) проводился для точечных источников, расположенных на оси симметрии, и показал возможность осуществления фокусировки второго порядка в широком диапазоне граничных и начальных условий.

В работах [6, 7] проведен приближенный анализ фокусирующих свойств конических систем с параллельными образующими. Детально исследованы условия фокусировки первого порядка при значительном удалении источника от вершин конусов и, в частности, показано, что угол  $\beta_0$  фокусировки первого порядка уменьшается с ростом угла полураствора  $\theta_0$  при  $E/V = \text{const}$ .

На рис. 4 представлены зависимости, полученные в рамках данной работы, угла  $\beta_0$  фокусировки второго порядка от относительного расстояния  $\Delta z/g$  между источником и вершиной внутреннего конуса, где  $g$  — расстояние между вершинами конусов. Уменьшение расстояния  $\Delta z/g$  вызывает достаточно резкое увеличение угла  $\beta_0$ . Происходит рост  $\beta_0$  и при уменьшении раствора конусов, а также при увеличении относительной энергии  $E/V$ . Отмеченные свойства могут оказаться весьма полезными при разработке конструкций анализаторов в обеспечение заданной геометрии эксперимента. При удалении источника на расстояние  $\Delta z$ , значительно превышающее  $g$ , угол  $\beta_0$  фокусировки второго порядка стремится к  $30^\circ$ , что согласуется с данными, приведенными в [7].

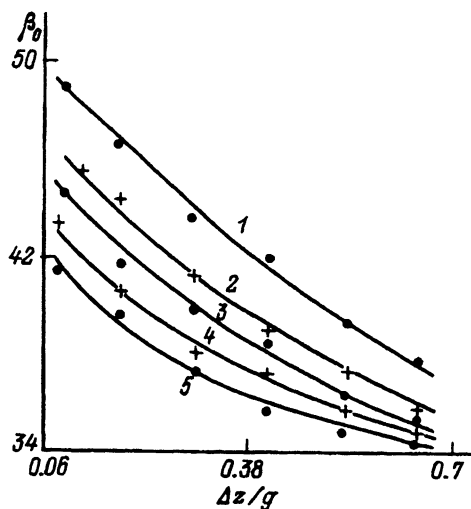


Рис. 4. Зависимости угла фокусировки второго порядка от относительного расстояния между источником и вершиной внутреннего конуса.

$\theta_0$ , град: 1 — 10, 2 — 20, 3 — 30, 4 — 40, 5 — 44.

Расчеты относительной линейной дисперсии показали, что ее величина мало зависит от вариации задающих параметров и лежит в диапазоне 1–1.5.

Результаты расчетов идеализированных систем (бесконечно протяженные конусы) позволили выявить взаимосвязь параметров, обеспечивающих фокусировку второго порядка, и послужили критерием выбора начального приближения геометрий анализаторов с конечными размерами. Предложено большое количество вариантов конических систем, обеспечивающих фокусировку второго порядка, проведен анализ условий фокусировки в таких системах и расчет их эксплуатационных параметров. В качестве примера на рис. 5 представлена конструкция квазиконического анализатора с центральным углом  $\alpha_0$  фокусировки второго порядка  $61^\circ$  для  $E/V = 1.324$ . При ширине выходной диафрагмы 0.9 мм светосила прибора по результатам численных расчетов составила 4.8% от  $2\pi$ , а относительное энергетическое разрешение прибора на полувысоте аппаратной функции — 0.78%.

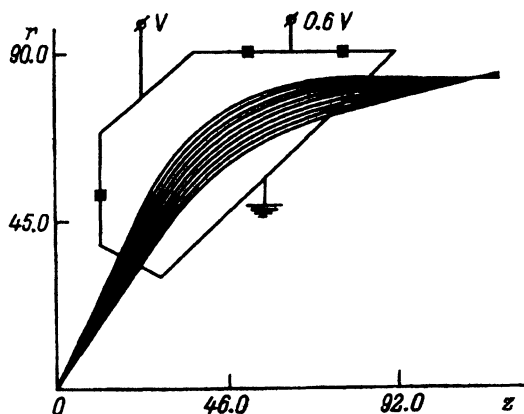


Рис. 5. Электронно-оптическая схема квазиконического энергоанализатора.

## Выводы

1. Численно показана возможность и исследованы условия осуществления фокусировки второго порядка в идеальных конических системах с совмещенными вершинами и параллельными образующими.

2. Представлена конструкция конического энергоанализатора конечных размеров с фокусировкой второго порядка.

## Список литературы

- [1] Горелик В.А. // Тез. VI Всесоюз. симпозиума по вторично-электронной, фотоэлектронной эмиссии и спектроскопии поверхности твердого тела. М.: Радио, 1986. С. 190-191.
- [2] Горелик В.А., Протопопов О.Д., Трубицын А.А. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 8. С. 1531-1534.
- [3] Баранова Л.А., Дьякова Г.Н., Явор С.Я. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 1. С. 207-210.
- [4] Трубицын А.А. // Деп. в ВИНТИ. № 169-В93. М., 1993.
- [5] Самарский А.А. Введение в численные методы. М.: Наука, 1987. 286 с.
- [6] Никофоров И.Я., Козаков А.Т., Рабинович М.Н. // Изв. вузов. Физика. 1981. Т. 24. № 10. С. 35-40.
- [7] Баранова Л.А., Дьяконова Г.Н., Явор С.Я. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 11. С. 2069-2074.

Научно-исследовательский  
технологический институт  
Рязань

Поступило в Редакцию  
3 июня 1993 г.