

12
©1995О НЕКОТОРЫХ ФОКУСИРУЮЩИХ СВОЙСТВАХ
ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ПОЛЯ С ГРАНИЦАМИ

А.М.Ильин

Энергоанализатор “цилиндрическое зеркало” (ЦЗ) [1] является одним из наиболее распространенных в Оже-электронной спектроскопии. Характеризующее его распределение потенциалов создается, как известно, между соосными бесконечно длинными цилиндрическими электродами и имеет вид

$$U(r) = U_0 \frac{\ln \frac{r}{r_1}}{\ln \frac{r_2}{r_1}}. \quad (1)$$

Здесь r_1 и r_2 — радиусы внутреннего и наружного электрода относительно внутреннего. Фокусирующие свойства поля (1) изучены достаточно хорошо, и практически все основные возможности ЦЗ для построения фокусирующих энергоанализаторов известны [1]. Заметим, однако, что поле (1) можно рассматривать лишь как асимптотическое решение уравнения Лапласа $\Delta U = 0$ со следующими граничными условиями:

$$U(r = r_1) = U(z = 0) = U(z = L) = 0; \quad U(r = r_2) = U_0. \quad (2)$$

На рис. 1 представлена основная схема использования обсуждаемого поля для энергоанализа пучка заряженных частиц. Здесь S_1 — точечный источник, расположенный на оси z ; α_0 — угол наклона центральной траектории анализируемого пучка, имеющего апертуру $\Delta\alpha$; S_2 — отверстие приемной диафрагмы; f_0 — расстояние между точечным источником и приемной диафрагмой; L_1 и L_2 — расстояния между S_1 и правой границей и S_2 и левой границей соответственно, являющиеся параметрами расчета; L — расстояние между границами поля. Решение уравнения Лапласа с граничными условиями (2) имеет вид

$$U(x, y) = \frac{4U_0}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{P_m(y)}{(2m-1)P_m(\beta)} \sin \frac{(2m-1)\pi x}{l}, \quad (3)$$

где

$$P_m(y) = \frac{I_0(ty)K_0(t) - I_0(t)K_0(ty)}{K_0(t)},$$

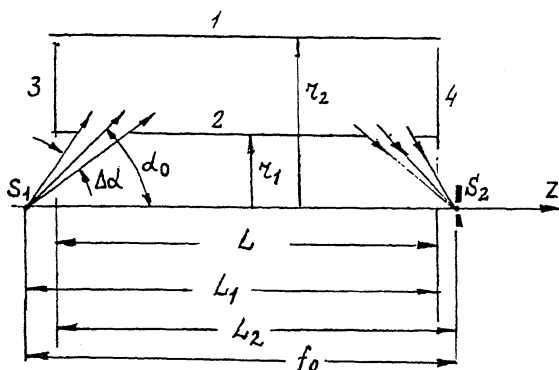


Рис. 1. Основные геометрические характеристики фокусирующего поля (3) при энергоанализе пучка заряженных частиц по схеме "ось-ось". 1 — наружный электрод, 2 — внутренний электрод, 3, 4 — торцевые электроды, S_1 — точечный источник частиц, S_2 — приемная диафрагма.

а I_0 и K_0 — модифицированные функции Бесселя и Ганкеля. Здесь и далее используются следующие обозначения безразмерных переменных:

$$x = \frac{z}{r_1}, \quad y = \frac{r}{r_1}, \quad \beta = \frac{r_2}{r_1},$$

$$l = \frac{L}{r_1}, \quad l_1 = \frac{L_1}{r_1}, \quad l_2 = \frac{L_2}{r_1}.$$

Ряд, входящий в (3), имеет условную сходимость, вследствие чего потенциал в этом виде непригоден для точного расчета характеристик фокусировки. Поэтому предварительно было проведено улучшение сходимости по методике [2], после чего выражение (3) использовалось для построения траекторий электронов, выходящих из точечного источника s_1 под разными углами к оси z . Для построения выполнялось численное интегрирование дифференциального уравнения в частных производных второй степени [3]

$$y'' = \frac{1}{2(\gamma - \frac{U}{U_0})} (1 + y'^2) (U'_y - y' U'_x). \quad (4)$$

Здесь $\gamma = \frac{E_0}{eU_0}$, E_0 и e — кинетическая энергия и заряд электрона. Расчет проводился методом Рунге-Кутты с помощью ЭВМ. В процессе расчетов варьировались параметры l , l_1 , l_2 , β , γ .

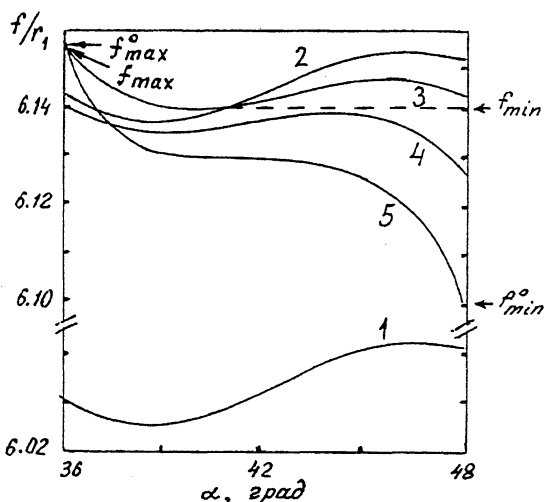


Рис. 2. Зависимости проекций траекторий на ось z от угла наклона траектории в точке S_1 . Абберрационные фигуры соответствуют случаю, когда поле в области ввода частиц совпадает с полем ЦЗ (при больших значениях L_2). f — проекции траекторий на ось z (в единицах r_1). 1 — $l_1 = 5.700$, $\gamma = 1.820$; 2 — $l_1 = 6.200$, $\gamma = 1.870$; 3 — $l_1 = 6.300$, $\gamma = 1.890$; 4 — $l_1 = 6.350$, $\gamma = 1.895$; 5 — ЦЗ ($l_1 \rightarrow \infty$), $\gamma = 1.890$.

При больших значениях l , l_1 , l_2 распределение потенциалов в анализирующей области поля (3) с большой точностью совпадало с (1). При этом результаты машинного расчета для значений параметров $\alpha_0 = 42.3^\circ$, $\beta = 2$ дали значение $f = 6.129r_1$, совпадающее с аналитическим решением для ЦЗ в режиме фокусировки второго порядка [4]. Для примера на рис. 2 приведена серия абберрационных кривых, соответствующих случаю, когда поле в области входа частиц совпадает с цилиндрическим. Известно, что разрешение по энергии в общем случае уменьшается с уменьшением абберрационного размытия [1]. Сопоставление абберрационных фигур (рис. 2) показывает, что для угла расходимости анализируемого пучка 12° абберрационное размытие для ЦЗ в несколько раз больше, чем для предлагаемой системы. По-видимому, это связано с взаимной компенсацией вкладов абберраций второго и более высоких порядков в поле (3). Параметр, характеризующий изменение разрешения по энергии при использовании (3), по сравнению с ЦЗ может быть записан в виде

$$K = \frac{(f_{\max}^0 - f_{\min}^0)_{\text{ЦЗ}}}{(f_{\max} - f_{\min})}, \quad (5)$$

где в числителе значения, относящиеся к ЦЗ (фигура 5 на рис. 2), а в знаменателе — к цилиндрическому полю с гра-

ницами (3) (абберационные фигуры 1-4 на рис. 2). Таким образом, разрешение по энергии для различных режимов анализа в поле (3) относительно разрешения, характерного для ЦЗ, может быть оценено из соотношения

$$R_E = \frac{R_{E0}}{K}, \quad (6)$$

где R_{E0} , R_E — разрешение по энергии соответственно ЦЗ и поля (3). Например, для сочетания параметров, отвечающих режиму анализа с минимальным абберационным размытием (абберационная фигура 3), $R_E \approx 0.2R_{E0}$.

В конструкции анализатора, использующего поле (3), границы по оси z реализуются в виде торцевых электродов, электрически соединенных с внутренним цилиндром. Выполнение одного или обоих торцевых электродов, а также приемника (S_2) подвижными вдоль оси z делает анализатор способным к изменению режимов работы, а также к настройке на максимум интенсивности по фокусному расстоянию в определенном режиме [5]. В тех случаях, когда схема анализатора предусматривает использование режимов, в которых создается поле (1) вблизи одного из торцевых электродов или во всем фокусирующем пространстве, это достигается подключением распределения потенциалов (1) к системам коррекции краевого поля [1], расположенным на соответствующих электродах. Переход из режима повышенной разрешающей способности в режим ЦЗ дает возможность сопоставления Оже-спектров, полученных от одного и того же объекта, и выполнения количественных оценок с использованием стандартных спектров, полученных в основном с применением ЦЗ при среднем разрешении по энергии около 0.6%.

Список литературы

- [1] Анализ поверхности методами оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / Пер с англ. Под ред. Д. Бриггса и М.П. Сиха. М.: Мир, 1987. 598 с.
- [2] Морс Ф.М., Фейсбах Г. Методы теоретической физики / Пер. с англ. 1960. 886 с.
- [3] Страшкевич А.М. // Электронная оптика электростатических систем. М.-Л.: Энергия, 1966. 327 с.
- [4] Зашкеара В.В., Корсунский М.И., Космачев О.С. // ЖТФ. 1966. Т. 36. С. 132.
- [5] Ильин А.М. Патент Республики Казахстан. № 197. Бюлл. № 2.

Физико-технический
институт
АН Казахстана
Алма-Ата

Поступило в Редакцию
1 июля 1994 г.
В окончательной редакции
10 января 1995 г.