

## ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ЭНЕРГОАНАЛИЗАТОР ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ УДАЛЕННЫХ И ПРОТЯЖЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ

© 2013 В.Н. Голованов, И.А. Ильина

Ульяновский государственный университет

Поступила в редакцию 26.11.2013

В работе представлен новый тип электростатического энергоанализатора на основе торцового цилиндрического поля, ограниченного концентрическими цилиндрическими поверхностями и двумя плоскими поверхностями, перпендикулярными к оси симметрии цилиндров. Для потока заряженных частиц, входящего непосредственно в окно между цилиндрическими электродами численно рассчитаны режимы с фокусировкой второго порядка для двух конфигураций: 1) точечный источник на оси симметрии, находящийся на большом расстоянии от анализатора и 2) источник с большими угловыми размерами. Новый прибор конструктивно прост и не требует систем защиты от краевых полей. Приведен экспериментальный спектр, полученный от поверхности разрушения образца непосредственно в сверхвысоковакуумной камере специального оже-спектрометра с использованием одной из рассчитанных конфигураций для удаленного точечного источника.

Ключевые слова: Электростатический энергоанализатор, торцовое цилиндрическое поле, электронная спектроскопия.

### ВВЕДЕНИЕ

Для решения многих исследовательских и технологических задач материаловедения и физики поверхности необходимо использование методов электронной спектроскопии, например, электронной оже-спектроскопии или рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Однако на практике это часто затрудняется тем обстоятельством, что объект исследования не может быть приближен к энергоанализатору на расстояние, требуемое его электронно-оптической схемой, например из-за радиоактивности или высокой температуры. В то же время, для большинства хорошо известных анализаторов эти расстояния очень малы, как например для АЦЗ [1]. Кроме того, во многих случаях эмитирующая вторичные электроны поверхность имеет относительно большую площадь, в то время, как электронно-оптические схемы большинства используемых анализаторов обеспечивают высокую разрешающую способность при точечных или малых по размеру источниках. В таких случаях обычно используются дополнительные промежуточные линзовые системы, которые усложняют конструкцию прибора и увеличивают его стоимость. Указанные факторы во многих случаях затрудняют или даже делают практически невозможным проведение исследований с использованием таких широко

распространенных приборов как АЦЗ и анализаторов со сферической формой электродов. Более того, все известные анализаторы страдают существенным недостатком – наличием краевых полей, влияние которых способно существенно ухудшить расчетные характеристики прибора. Для их устранения обычно вводятся специальные системы электродов, что усложняет конструкцию и систему электрического питания анализатора и может затруднить его применение, особенно при использовании в космосе. В связи с этим, с целью расширения сферы применения электронной спектроскопии постоянно исследуются возможности как модификации известных конфигураций [2-5], так и поиски новых систем энергоанализаторов с высокой разрешающей способностью, свободных от искажающего действия краевых полей [6-12].

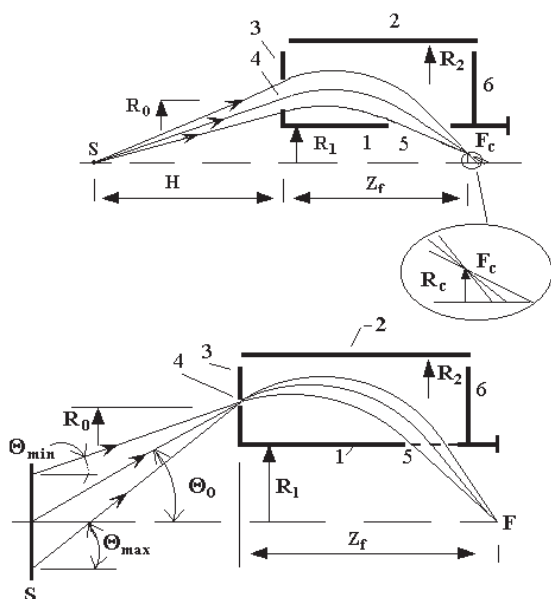
### 1. ФОКУСИРУЮЩЕЕ ПОЛЕ АНАЛИЗАТОРА

Поле, использованное во всех конфигурациях, является решением уравнения Лапласа  $\nabla^2 U(R, Z) = 0$  с граничными условиями  $U(R_1, Z) = U(R, 0) = U(R, L) = 0$ ,  $U(R_2, Z) = V$  и ограничено концентрическими цилиндрическими поверхностями с радиусами  $R_1$  и  $R_2$  ( $R_1 < R_2$ ) и двумя плоскими поверхностями, перпендикулярными к оси  $Z$  (см. рис. 1).

Распределение потенциала для данной электростатической системы может быть выражено в виде:

$$U(r, z) = \frac{4V}{\pi} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \sin((2n+1) \cdot \frac{\pi z}{l}) \cdot \frac{F_n(r)}{F_n(\beta) \cdot (2n+1)} \quad (1)$$

Голованов Виктор Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, проректор по научной работе и информационным технологиям. E-mail: golovanovvn@ulsu.ru  
Ильина Ирина Аркадьевна, аспирант кафедры материаловедения.



**Рис. 1.** Схематический вид в вертикальном разрезе (верхние части) фокусирующих систем. Вверху: 1 – внутренний цилиндр, 2 – наружный цилиндр, первый торцевой электрод с входным окном (4), 5- окно вывода пучка из фокусирующего поля, 6 – второй торцевой электрод, S – точечный источник заряженных частиц, F – фокус на оси симметрии. Внизу: 1-3, 5,6 – те же элементы, что в верхней конфигурации, 4 – кольцевая щель с радиусом  $R_0$ , S – эмиттирующая поверхность, F – фокус на оси симметрии.

Длины в (1) и далее рассчитываются в радиусах внутреннего цилиндра  $R_1$  для того, чтобы вести безразмерные параметры  $r = R/R_1$ ,  $z = Z/R_1$ ,  $r_c = R_c/R_1$ ,  $l = L/R_1$ ,  $\beta = R_2/R_1$ , а также  $h = H/R_1$  - расстояние между источником и анализатором (рис.1). Здесь  $F_n(r) = (I_0(k_n \cdot r) \cdot K_0(k_n) - I_0(k_n) \cdot K(k_n \cdot r)) / K_0(k_n)$ ,  $k_n = (2n + 1) \cdot \pi / l$ . Здесь  $I_0$  and  $K_0$  – модифицированные функции Бесселя и Ганкеля соответственно. Рис. 1 представляет две основные конфигурации анализатора на основе ограниченного цилиндрического поля, в частности, поля в области входного электрода, которое можно назвать торцевой областью. Распределение потенциала (1) существенно отличается от поля идеального цилиндрического зеркала, особенно в торцевых областях. Расчеты показали, что если безразмерное расстояние  $l$  существенно больше, чем  $\beta - 1$ , то поле (1) в центральной части энергоанализатора близко к полю АЦЗ.

## 2. РАСЧЕТЫ И КОНСТРУКЦИЯ

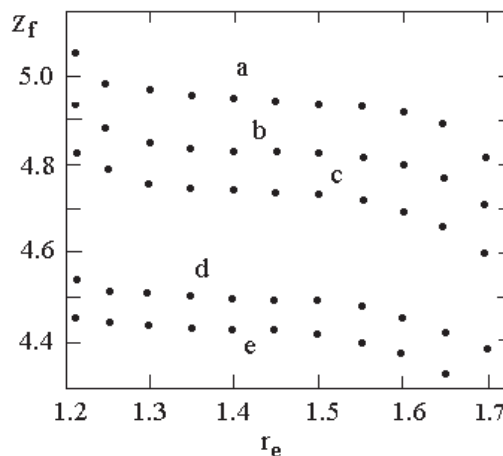
Нерелятивистские уравнения движения в поле (1) имеют следующий вид:

$$\ddot{r} = -\frac{e}{m} \cdot \frac{\partial U(r, z)}{\partial r}, \quad (2)$$

$$\ddot{z} = -\frac{e}{m} \cdot \frac{\partial U(r, z)}{\partial z}. \quad (3)$$

Здесь  $e$  и  $m$  – заряд и масса покоя частицы. К сожалению, систему уравнений (2) и (3) невозможно решить аналитически из-за сложного вида распределения потенциала (1). Эта система решалась численно для определения траекторий частиц с кинетической энергией  $E_0$ , эмитированных источниками S для обеих конфигураций, представленных на рис. 1. Радиальная координата средней траектории частиц входящего пучка  $r_0 = R_0/R_1$  угол наклона средней траектории обозначен соответственно через  $\theta_0$  (в соответствии с конфигурацией, представленной на рис. 1).

Исследование фокусирующих свойств выполнялось с помощью численного определения точек пересечения траекторий в прилегающей к оси симметрии области фокуса. Вычисления производились методом Рунге-Кутты с точностью  $0.002 r_1$  для конфигурации с точечным источником. Для конфигурации с протяженным источником требовалось увеличение точности до  $0.001 r_1$ . Предварительно нами исследовалось влияние числа членов в сумме (1) на точность расчета фокусировки. Прямые вычисления суммы в правых частях выражений (2) и (3) производились от  $n = 0$  до  $n = 90$ , что мы считаем оптимальным. На рис. 2 приведены типичные абберационные фигуры (зависимость фокусирующего расстояния  $z_f$  от  $r_e$  – радиальной координаты входа траектории) для конфигурации с то-



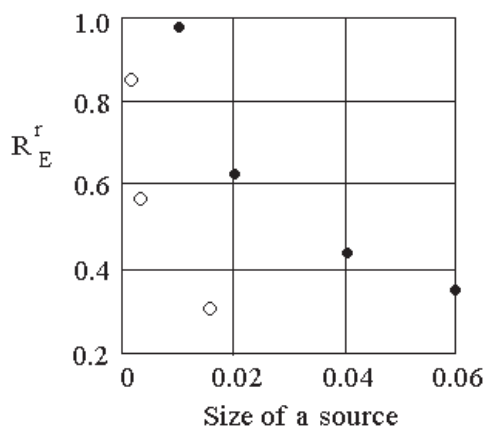
**Рис. 2.** Абберационные кривые, полученные для конфигурации с точечным источником при различных расстояниях источника от входного окна анализатора:

(a)  $h = 10$ ,  $G = 2.80$ ; (b)  $h = 8$ ,  $G = 2.55$ ; (c)  $h = 6$ ,  $G = 2.30$ ; (d)  $h = 4$ ,  $G = 1.977$ ; (e)  $h = 3$ ,  $G = 1.835$ . Для всех случаев были использованы параметры  $l = 5$ ,  $\beta = 2$ . Здесь  $r_e$  – радиальная координата входа траектории в анализатор

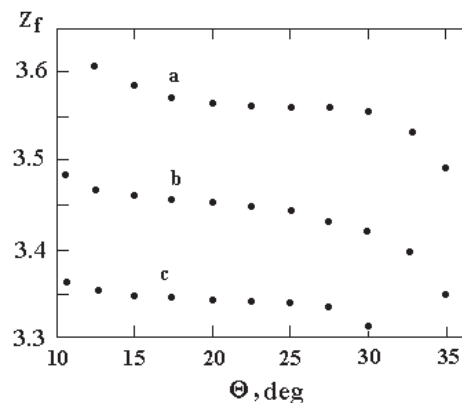
чечным источником, располагающимся на различных расстояниях  $h$  от анализатора. Очевидно, что все приведенные кривые имеют форму кубических парабол с центральной точкой перегиба, что соответствует режиму фокусировки второго порядка, который поддерживался при выбранном значении  $h$  соответствующим значением параметра  $G = E_0 / eV$ , где  $E_0$  – это начальная кинетическая энергия исследуемых частиц, а  $V$  – отклоняющий потенциал на внешнем цилиндре.

Надо заметить, что одно из свойств нового анализатора в конфигурации с точечным источником состоит в том, что угол между центральной траекторией входного пучка и осью симметрии остается малым, особенно для удаленного источника. Это дает возможность дистанционной спектроскопии участков поверхности, имеющих углубленный профиль, вплоть до ямочной структуры. Заметим, что в случае использования анализатора цилиндрическое зеркало проведение таких исследований невозможно из-за особенности его электронно-оптической схемы [13].

На рис. 3 представлены результаты теоретических расчетов зависимости разрешающей способности по энергии для анализатора с точечным источником в сканирующем режиме, т.е. при смещении источника от оси симметрии. Значения разрешающей способности даны по отношению к эталону – разрешающей способности для точечного источника на оси симметрии. Для сравнения представлены результаты расчетов для



**Рис. 3.** Рассчитанная зависимость относительного значения разрешающей способности по энергии от величины смещения точечного источника от оси симметрии для анализатора с торцовым полем (черные значки) и для цилиндрического зеркала (светлые значки). Линейные размеры, как и везде в работе, даются в единицах  $R_1$ . Относительная разрешающая способность  $R_E^r$  приведена по отношению к ее значению при точечном источнике, расположенном на оси симметрии, при следующем наборе параметров:  $l = 5$ ,  $\beta = 2$ ,  $h = 8$ ,  $G = 2.55$



**Рис. 4.** Рассчитанные абберационные кривые для конфигурации с протяженным источником. Расчеты проводились для  $l = 4$ ,  $G = 2$  при следующих наборах параметров: а –  $y_0 = 1.12$ ,  $G = 1.34$ ; б –  $y_0 = 1.15$ ,  $G = 1.30$ ; в –  $y_0 = 1.18$ ,  $G = 1.275$

АЦЗ. Сопоставление результатов показывает, что хотя разрешающая способность также падает при удалении источника от оси симметрии, но для торцового анализатора диапазон размеров области, сканируемой без потери в разрешающей способности, значительно увеличен. Это свойство особенно ценно для сканирующей электронной оже-спектроскопии.

Расчеты, проведенные для случая протяженного источника показали, что и в этом случае можно получить режимы с острой фокусировкой второго порядка (рис. 4) и с достаточно большим угловым интервалом приема траекторий.

Заметно, что при уменьшении радиуса входного окна, угловой интервал для острой фокусировки несколько увеличивается. Детальные дополнительные расчеты показали, что в такой конфигурации анализатора можно использовать также кольцевую диафрагму, расположенную в самой узкой части пучка. При этом разрешающая способность может быть несколько увеличена по сравнению со случаем диафрагмы-отверстия на оси симметрии и точечного фокуса.

Расчеты дисперсии  $D_E$  в исследуемых системах производились с использованием соотношения:

$$D_E = (\Delta z / \Delta E) \cdot \Delta E, \quad (4)$$

где  $\Delta z$  – малые, но конечные отрезки, полученные при численном расчете траекторий для малых сдвигов по энергии  $\Delta E$ , при значении энергии  $E$ . В соответствии с (4) было получено среднее значение дисперсии  $D_E = 5.1$  для конфигурации с точечным источником и  $D_E = 3.7$  для конфигурации с протяженным источником. Для численных расчетов разрешающей способности по энергии, как было показано в [11], следует использовать соотношение

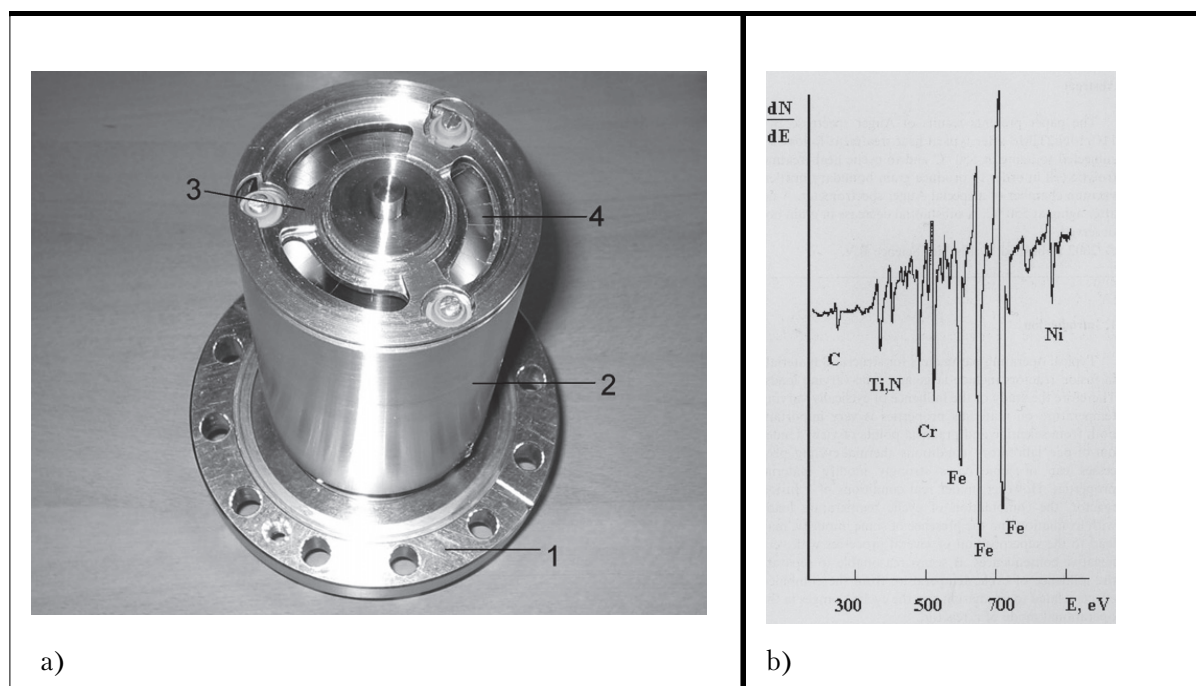
$$R_E = \frac{D_E}{\Delta z_f}. \quad (5)$$

В (5)  $\Delta z_f$  – величина проекции выбранной для использования центральной части абберационной фигуры на ось симметрии. Расчет разрешающей способности по энергии для конфигурации с точечным источником дал в среднем значение  $R_E = 310$  при точечном источнике, расположенном на оси симметрии. Для сравнения укажем, что расчет для цилиндрического зеркала дал значение  $R_E = 290$ . Для конфигурации с протяженным источником и точечным фокусом разрешающая способность по энергии составляет примерно 200 с приемлемым угловым интервалом входа пучка от 10 до 25°. Для этой же конфигурации но с кольцевым фокусом, когда радиус фокуса составлял примерно  $0.09 r_1$  разрешающая способность составила 350 при растворе угла входа от 5 до 30°. Высокая трансмиссия прибора дополнительно обеспечивается сочетанием большого угла раскрытия (в среднем 6° для удаленного точечного источника и 20° для протяженного источника), при котором выполняется острая фокусировка, с цилиндрической симметрией системы. На рис. 5,а показан общий вид прототипа анализатора для электронной оже-спектроскопии, использующего расчеты по схеме для удаленного точечного источника, а на рис. 5,б представлен

экспериментальный оже-спектр, полученный от поверхности разрушения в сверхвысоком вакууме образца стали X11N10T, расположенного на расстоянии 22 см от анализатора (расчетное расстояние  $h = 9.8$  для анализатора с радиусом внутреннего цилиндра 2.2 см).

## ВЫВОДЫ

Проведены численные расчеты фокусирующих свойств двух конфигураций нового типа электростатического анализатора на основе ограниченного цилиндрического поля. Анализатор практически свободен от краевого поля, обеспечивает возможность спектроскопии удаленных и протяженных источников (в различных конфигурациях) при сохранении высокой разрешающей способности по энергии и высокой трансмиссии. Прибор позволяет производить обширное сканирование исследуемой поверхности, эффективен при исследовании поверхностей с высокой степенью шероховатости, вплоть до ямочной структуры. На основании расчетных данных был построен прототип энергоанализатора, использованный в экспериментальных исследованиях элементного состава поверхностей разрушения создаваемых растяжением непосредственно в сверхвысоковакуумной камере специального оже-спектрометра.



**Рис. 5.** а) общий вид энергоанализатора с торцовым полем, 1 – высоковакуумный фланец, 2 – наружный цилиндрический электрод, 3 – торцовый электрод, соответствующий элементу (3) на рис.1, 4 – входное окно (соответствующее 4 на рис.1); б) типичный оже-спектр, полученный от поверхности разрушения стали X11N10T, образованной в процессе механических испытаний непосредственно в камере оже-спектрометра

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Risley J.S.*// Rev.Sci.Instrum. 1972. V. 43, P.95-99.
2. *Ильин А.М.*// Письма в ЖТФ. 1995. Т.21. В.12. С.42-45.
3. *Read F.H.* // Rev.Sci.Instrum. 2002, V.73, P.1129 - 1134
4. *Read F.H., Cubric D., Kumashiro S., Walker A.*// Nucl. Instrum.Meth.Phys.Res. 2004, A 519, P.338- 342.
5. *Ilyin A.M. and Ilyina I.A.*//Optik. 2007. **118**. P.350 – 352.
6. *Zouros T.J.M., Sise O., Ulu M and Dogan M.*// Measur. Sci.Technol. 2006, 17, P81-86.
7. *Ilyin A.M.* // J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom., 2000, V.113, P.1-4.
8. *Ilyin A.M.*// J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom., 2001. V.120. P.89- 91
9. *Sise O., Zouros T.J.M, Ulu M., Bogan M.*// Meas. Sci.Technol. 2007. 18. P.1853-1858.
10. *Ilyin A.M. and Ilyina I.A* // Meas. Sci. Technol. 2005. 16. P. 1798-1801.
11. *Ilyin A.M. and Ilyina I.A.*// Meas.Sci. Technol., **18** (2007) P.724-726.
12. *Ilyin A.M. and Ilyina I.A.*// Journal of Instrumentation, (JINST) **2**, P01002-6
13. *Ильин А.М.*// ЖТФ. 1994. Т.64. N10. С.188-190.

## ELECTROSTATIC ENERGY ANALYZER FOR ELECTRON SPECTROSCOPY OF REMOTE EXTENDED SOURCES

© 2013 V.N. Golovanov, I.A. Ilyina

Ulyanovsk State University

This paper presents a new type of electrostatic energy analyzer based on mechanical cylindrical field bounded by concentric cylindrical surfaces and two flat surfaces perpendicular to the axis of symmetry of the cylinder. For a stream of charged particles entering directly into the window between the cylindrical electrodes calculated numerically focusing modes of second order for the two configurations: 1) a point source on the axis of symmetry, at a great distance from the analyzer and 2) a source of large angular size. The new device structurally simple and requires no protection systems on the boundary fields. An experimental spectrum is obtained from the fracture surface of the sample chamber directly into the ultrahigh special Auger spectrometer by using one of the calculated dot configurations for the remote source.

Keywords: electrostatic energy analyzer, mechanical cylindrical field, electron spectroscopy.