

УДК 537.212, 537.213

Цилиндрический зеркальный энергоанализатор модифицированной конструкции

Л. А. Баранова

Проведено компьютерное моделирование цилиндрического зеркального энергоанализатора, внешний электрод которого разрезан на несколько электрически изолированных частей, потенциалы на которых могут регулироваться независимо друг от друга. Показано, что в традиционном режиме работы цилиндрического зеркала (запуск заряженных частиц через внутренний цилиндр) модифицированная конструкция в режиме фокусировки второго порядка позволяет в пять раз уменьшить доминирующий коэффициент сферической аберрации третьего порядка, что приводит к существенному повышению разрешающей способности и светосилы анализатора. С целью повышения линейной дисперсии анализатора при запуске заряженных частиц через торцевую диафрагму, перпендикулярную оси анализатора, предложено использовать модифицированную конструкцию в двухкаскадном режиме работы с регистрацией заряженных частиц при их вторичном пересечении оси. Независимая регулировка потенциалов на разрезанном внешнем цилиндре позволяет реализовать фокусировку второго порядка в обоих каскадах и повысить линейную дисперсию анализатора в четыре раза по сравнению с однокаскадным режимом.

PACS: 41.85.Qg

Ключевые слова: энергоанализатор, цилиндрическое зеркало, разрешающая способность, линейная дисперсия, сферическая аберрация, светосила.

Введение

Анализатор энергий заряженных частиц на основе электростатического цилиндрического зеркала широко применяется в промышленности и научных исследованиях для определения состава и свойств материалов посредством анализа энергетических спектров заряженных частиц, эмитируемых образцами. Достоинствами цилиндрического зеркала являются простота конструкции, высокая разрешающая способность, обусловленная наличием фокусировки второго порядка по меридиональному углу, и высокая светосила, обусловленная осевой симметрией анализатора [1—4].

Недостатком цилиндрического зеркала является необходимость располагать исследуемый

объект очень близко к самому анализатору, поскольку заряженные частицы должны поступать в анализирующее поле через входное окно во внутреннем цилиндре под углом $42,3^\circ$ к оптической оси. В работах [5, 6] исследованы электронно-оптические свойства цилиндрического зеркала при запуске заряженных частиц в поле анализатора через торцевую диафрагму, перпендикулярную оптической оси, что позволяет располагать исследуемый образец на произвольном расстоянии от анализатора, однако дисперсия анализатора при впуске частиц через торец снижается почти в два раза по сравнению с традиционным режимом работы.

В работах [7, 8] предложена модифицированная конструкция цилиндрического зеркала, внешний электрод которой образован отдельными электрически изолированными цилиндрами. Возможность независимой регулировки потенциалов на отдельных частях внешнего электрода позволяет в широких пределах регулировать электронно-оптические параметры анализатора.

В настоящей работе подробно исследованы электронно-оптические свойства модифицированной конструкции цилиндрического зеркала и пока-

Баранова Любовь Александровна, старший научный сотрудник.
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе.
Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26.
Тел.: (812) 292-79-51, +7 (911) 759-62-97.
E-mail: l.baranova@mail.ioffe.ru

Статья поступила в редакцию 19 января 2016 г.

© Баранова Л. А., 2016

зана возможность существенного повышения его разрешающей способности, светосилы и линейной дисперсии как в традиционном режиме работы, так и в режиме запуска заряженных частиц через торцевую диафрагму.

Модифицированное цилиндрическое зеркало в режиме запуска заряженных частиц через внутренний цилиндр

Электронно-оптические свойства модифицированного цилиндрического зеркала были исследованы численно с помощью программы СРОЗД [9]. Программа базируется на методе конечных элементов и позволяет с высокой точностью рассчитывать распределение поля и траектории заряженных частиц в произвольных электростатических системах. На первом этапе был исследован традиционный режим работы, когда заряженные частицы поступают в анализирующее поле через окно во внутреннем электроде, при этом источник и приемник располагаются на оси анализатора (фокусировка «ось—ось»).

Схематическое изображение модифицированной конструкции анализатора и ход траекторий в ней представлены на рис. 1. Внешний цилиндр разрезан на три электрически изолированных части, причем на первую и третью части внешнего цилиндра поданы одинаковые потенциалы V_1 , а на центральную часть подан потенциал V_2 .

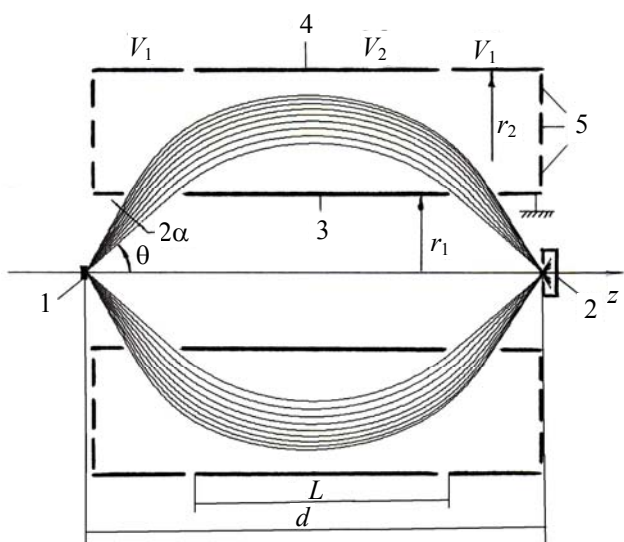


Рис. 1. Схематическое изображение модифицированного цилиндрического зеркала. 1 — исследуемый образец, 2 — детектор, 3 — внутренний цилиндр, 4 — составной внешний цилиндр, 5 — электроды, компенсирующие краевое поле.

Было рассчитано несколько конкретных вариантов предлагаемой конструкции, различаю-

щихся геометрическими параметрами и отношением потенциалов, поданных на центральную и боковые части внешнего цилиндра. Для каждого конкретного варианта производился поиск условий фокусировки второго порядка, т. е. условий, при которых коэффициент сферической aberrации второго порядка по углу расходимости пучка на входе обращается в ноль. В этом случае доминирующим aberrационным членом является сферическая aberrация третьего порядка и размытие изображения вдоль оси z дается формулой:

$$\Delta z = C_3 \alpha^3$$

где C_3 — коэффициент сферической aberrации третьего порядка и α — угол полураствора пучка в меридиональной плоскости на входе в анализатор. Расчеты показали, что модифицированное цилиндрическое зеркало в режиме фокусировки второго порядка обладает меньшим коэффициентом сферической aberrации третьего порядка и, следовательно, более острой фокусировкой, чем традиционный анализатор.

В табл. 1 в качестве иллюстрации приведены характеристики нескольких рассчитанных вариантов. Первая строка таблицы относится к традиционному цилиндрическому зеркалу (внешний цилиндр не разрезан), третья строка соответствует найденному оптимальному варианту модифицированного зеркала. Он характеризуется следующими параметрами: отношение радиусов внешнего и внутреннего цилиндров равно $r_2/r_1 = 2,6$, длина центральной части внешнего цилиндра равна $L/r_1 = 3,5$, расстояние от источника заряженных частиц до левого края центральной части составляет $1,5r_1$, отношение потенциалов, поданных на центральную и боковые части внешнего цилиндра равно $V_2/V_1 = 0,6$.

В оптимальном варианте модифицированное цилиндрическое зеркало позволяет примерно в 5 раз уменьшить доминирующий коэффициент сферической aberrации C_3 .

Рис. 2 также позволяет сравнить качество фокусировки в обычном и модифицированном цилиндрическом зеркале. На нем показана зависимость координаты точки пересечения центральной траектории пучка с осью z от угла наклона траектории на входе в анализатор. Мы видим, что диапазон угла θ , в котором координата точки пересечения траектории с осью z практически постоянна, т. е. не зависит от угла θ , в модифицированном зеркале гораздо шире, чем в обычном.

Таблица 1

Электронно-оптические характеристики традиционного (первая строка) и модифицированного цилиндрического зеркала*

$\frac{L}{r_1}$	$\frac{E}{eV_1}$	$\frac{V_2}{V_1}$	$\theta_r, ^\circ$	$\frac{d}{r_1}$	$\frac{D}{r_1}$	$\frac{r_{\max}}{r_1}$	$\frac{C_3}{r_1}$
0	1,37	1,0	42,3	6,13	5,6	1,8	15,6
2,5	1,13	0,6	45,1	6,57	5,2	1,9	5,5
3,5	1,015	0,6	46,4	6,52	5,3	1,95	3,5
3,5	1,00	0,5	42,0	6,91	4,0	1,85	9,5

* Здесь L — длина центральной части внешнего цилиндра, E — энергия настройки анализатора, θ_r — средний угол влета частиц, d — расстояние от источника до детектора вдоль оси z , D — линейная дисперсия, r_{\max} — максимальное отстояние центральной траектории от оси, C_3 — коэффициент сферической аберрации третьего порядка.

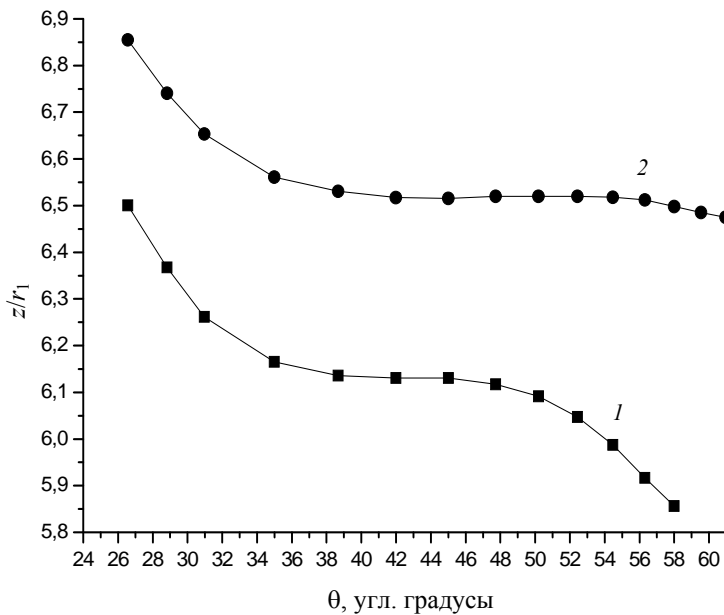


Рис. 2. Координата точки пересечения траектории заряженной частицы с осью z в зависимости от угла входа θ . 1 — традиционное цилиндрическое зеркало, 2 — модифицированное цилиндрическое зеркало.

Уменьшение величины сферической аберрации в несколько раз позволяет существенно улучшить эксплуатационные качества энергоанализатора, давая возможность повысить разрешение прибора и/или его светосилу в зависимости от требований практической задачи. В качестве примера приведем некоторые значения разрешения $\rho = \Delta E/E$ и светосилы $\Omega = \alpha \times \sin \theta_r \times 100\%$ для различных диапазонов захватываемого угла 2α .

В диапазоне углов $47^\circ < \theta > 53^\circ$, $\rho = 0,0005$, $\Omega = 4,0\%$

В диапазоне углов $42^\circ < \theta > 54^\circ$, $\rho = 0,001$, $\Omega = 7,5\%$

В диапазоне углов $38^\circ < \theta > 58^\circ$, $\rho = 0,005$, $\Omega = 13\%$

Следует отметить, что в работах [10, 11] предложен и испытан осесимметричный зеркальный энергоанализатор, электронно-оптические характеристики которого не уступают приведенным выше. Однако существенным недостатком этого прибора является сложная форма электро-

дов, описываемая уравнением $\ln r - (r^2/2 - z^2) = \text{const}$. При практическом использовании, несомненно, следует отдать предпочтение конструкции, образованной простыми круговыми цилиндрами.

Модифицированное цилиндрическое зеркало в режиме запуска заряженных частиц через торцевую диафрагму

На втором этапе работы была исследована возможность повышения линейной дисперсии цилиндрического зеркала при запуске заряженных частиц через торцевую диафрагму. Простым способом повышения линейной дисперсии цилиндрического зеркала представляется использование тандема из двух анализаторов или двухкаскадного анализатора. В этом случае заряженные частицы входят в анализатор через торцевую диафрагму и регистрируются на детекторе после двукратного пересечения ими оптической оси. Во втором кас-

каде осуществляется традиционный режим работы, при котором заряженные частицы поступают в анализирующее поле через окно во внутреннем цилиндре и используется режим фокусировки «ось—ось». Препятствием для осуществления такой схемы является то, что во второй каскад частицы должны входить под углом $42,3^\circ$ к оптической оси, тогда как угол выхода частиц из первого каскада отличается от этого значения и меняется в зависимости от расстояния между исследуемым объектом и входом в анализатор. Модифицированная конструкция цилиндрического зеркала позволяет преодолеть это препятствие, и путем настройки независимо регулируемых потенциалов на внешнем электроде добиться фокусировки второго порядка в двухкаскадном анализаторе при различных углах входа частиц во второй каскад.

На рис. 3 схематически показан один из предлагаемых вариантов двухкаскадного анализатора. Внешний электрод образован тремя отдельными цилиндрами с независимым питанием. На обоих торцах расположены диафрагмы, электрически соединенные с внутренним цилиндром (как правило, заземленные). Геометрические параметры конструкции заданы следующим образом: отношение радиусов внешнего и внутреннего цилиндров равно $r_2/r_1 = 4$, длины цилиндров, составляющих внешний электрод, равны соответственно: $L_1 = 6,5r_1$, $L_2 = 3,5r_1$ и $L_3 = 6r_1$. На рис. 3 показаны также траектории заряженных частиц в предлагаемой конструкции.

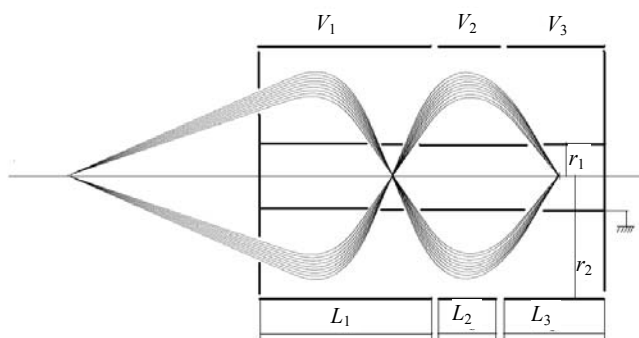


Рис. 3. Схематическое изображение двухкаскадного модифицированного цилиндрического зеркала и траекторий заряженных частиц при впуске заряженных частиц через торцевую диафрагму.

Настройка двухкаскадного анализатора производилась поэтапно, а именно, вначале осуществлялся поиск режима с фокусировкой второго порядка в первой ступени, т. е. заряженные частицы, входящие в анализатор через торцевую диафрагму, регистрировались при первом пересечении ими оси анализатора. Параметры найденного режима таковы: исследуемый объект расположен на расстоянии $8r_1$ от входной диафрагмы, централь-

ная траектория пучка входит в поле на расстоянии $y = 1,6r_1$ от оптической оси, фокусировка на оси происходит на расстоянии $z = 4,6r_1$ от входной диафрагмы, отношение потенциала на первой части внешнего цилиндра V_1 к энергии частиц E составляет $eV_1/E = 1,2$. Фокусировка в первой ступени двухкаскадного анализатора практически определяется потенциалом на первой части внешнего цилиндра и мало зависит от потенциалов следующих частей. Тем не менее, при настройке второго каскада может потребоваться некоторая корректировка потенциала V_1 после того, как установлены остальные потенциалы.

Фокусировка второго порядка в двухкаскадном анализаторе может осуществляться при целом ряде значений потенциалов на втором и третьем цилиндрах, при этом значение линейной дисперсии варьируется в довольно широких пределах. В табл. 2 приведены параметры некоторых режимов работы с фокусировкой второго порядка. Первая строка таблицы относится к первой ступени двухкаскадного анализатора — частицы регистрируются при первом пересечении оси. Отношение линейной дисперсии к внутреннему радиусу составляет $D/r_1 = 3,2$, что значительно меньше значения линейной дисперсии в традиционном режиме работы цилиндрического зеркала с фокусировкой ось — ось ($D/r_1 = 5,6$). Следующие строки табл. 2 относятся к двухкаскадному цилиндрическому зеркалу. Как видим, линейная дисперсия двухкаскадного анализатора существенно выше дисперсии однокаскадного и возрастает с уменьшением потенциала на третьей части внешнего цилиндра.

Таблица 2

*Зависимость линейной дисперсии D/r_1 цилиндрического зеркального энергоанализатора при запуске заряженных частиц через торцевую диафрагму от потенциалов V_i на составных частях внешнего электрода**

eV_1/E	eV_2/E	eV_3/E	D/r_1
	Однокаскадный	анализатор	
1,20	1,20	—	3,2
	Двухкаскадный	анализатор	
1,20	0,70	1,50	6,7
1,20	0,85	1,20	9,5
1,20	0,94	0,94	10,9
1,20	1,00	0,70	11,8
1,20	1,20 (линейное)	0 (распределение)	13,6

* Здесь E — энергия настройки анализатора.

Программа СРОЗД позволяет моделировать системы, на некоторых электродах которых потенциал меняется линейно вдоль оси z . Мы вос-

пользовались этой опцией в нашей работе. Последняя строка табл. 2 относится к случаю, когда внешний электрод анализатора образован всего двумя цилиндрами, причем от левого до правого края второго цилиндра потенциал линейно уменьшается от значения потенциала на первом цилиндре до нуля. Как оказалось, такой режим питания обеспечивает максимальную линейную дисперсию.

На практике, конечно, линейное падение потенциала, как правило, аппроксимируется ступенчатой функцией. Мы провели компьютерное моделирование анализатора, в котором внешний цилиндр разделен на четыре части. Длина первой части оставалась неизменной — $L_1 = 6,5r_1$, длины остальных частей были равны соответственно — $L_2 = 2,0r_1$, $L_3 = 2,0r_1$ и $L_4 = 5,5r_1$. Потенциалы на четырех частях внешнего электрода составляли $eV_1/E = -1,20$, $eV_2/E = -1,07$, $eV_3/E = -0,82$ и $eV_4/E = -0,57$. Линейная дисперсия в этом режиме незначительно уменьшилась по сравнению с линейным распределением потенциала и составила $D/r_1 = 13,0$. Очевидно, что при аппроксимации большим количеством электродов можно добиться того же значения дисперсии, что и при линейном распределении потенциала.

Заключение

В работе проведено численное исследование электронно-оптических свойств модифицированной конструкции цилиндрического зеркального энергоанализатора. Внешний электрод модифицированной конструкции разделен на несколько электрически изолированных частей, потенциалы на которых регулируются независимо друг от друга. В традиционном режиме работы, когда частицы поступают в поле анализатора через окно во внутреннем цилиндре, сферическая абберация анализа-

тора модифицированной конструкции уменьшается в пять раз по сравнению с обычной конструкцией. Это дает возможность либо существенно повысить разрешающую способность анализатора при неизменной светосиле (неизменном телесном угле, захватываемом анализатором), либо повысить захватываемый телесный угол при неизменном разрешении, либо, наконец, улучшить оба параметра, при этом, однако, не достигая их максимально возможных значений

При запуске заряженных частиц через торцевую диафрагму, перпендикулярную оптической оси, предложено использовать двухкаскадный режим работы. В этом случае модифицированная конструкция позволяет в четыре раза повысить линейную дисперсию анализатора путем настройки независимо регулируемых потенциалов на составных частях внешнего электрода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Заиквара В. В., Корсунский М. И., Космачев О. С. // ЖТФ. 1966. Т. 36. С. 132.
2. Palmberg P. W., Bohn G. K., Tracy J. C. // Applied Physics Letters. 1969. Vol. 15. No. 8. P. 254.
3. Афанасьев В. П., Явор С. Я. Электростатические энергоанализаторы для пучков заряженных частиц. — М.: Наука, 1978.
4. Briggs D., Seach M. P. (Eds.) Practical Surface Analysis by Auger and X-ray Photoelectron Spectroscopy. — New York: Wiley, 1983.
5. Ilyin A. M. // J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 2001. Vol. 120. P. 89.
6. Ilyin A. M. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Research A. 2003. Vol. 500. P. 62.
7. Баранова Л. А. // ЖТФ. 2013. Т. 83. С. 149.
8. Баранова Л. А. // ЖТФ. 2014. Т. 84. С. 155.
9. CPO programs, available from www.electronoptic.com
10. Siegbahn K., Golikov Yu., Kholine N. A high resolution and large transmission spectrometer. — Teknikum, Institute of Technology, Uppsala University, 1996.
11. Голиков Ю. К., Кольцов С. Н., Холин Н. А. // Изв. АН. Сер. физ. 1998. Т. 62. № 3. С. 555.

Cylindrical mirror energy analyzer of modified construction

L. A. Baranova

Ioffe Physico-Technical Institute of the RAS
26 Polytechnicheskaya str., St.Petersburg, 194021, Russia
E-mail: l.baranova@mail.ioffe.ru

Received January 19, 2016

Computer simulation has been carried out of a modified cylindrical mirror analyzer. The outer electrode of the analyzer is divided into a set of separate cylinders which voltages are adjusted independently. It is shown that in traditional mode of operation (charged particles enter the field through the

window in the inner cylinder) the modified construction enables reduction of the dominating third order spherical aberration by a factor of five that results in essential improvement of analyzer resolution and transmission. In order to increase linear dispersion of the analyzer in the case charged particles enter the field through the face aperture which is perpendicular to the axis it is proposed to use the modified construction in double-stage mode of operation with detector placed at the second crossover. Proper adjustment of independent voltages applied to the cut outer cylinder enables realization of second order focusing in both stages and provides an increase in the analyzer linear dispersion by a factor of four.

PACS: 41.85.Qg

Keywords: energy analyzer, cylindrical mirror, resolution, linear dispersion, spherical aberration, optical efficiency.

REFERENCES

1. V. V. Zashkvara, M. I. Korsunskii, and O. S. Kosmachev, *Tech. Phys.* **11**, 96 (1966).
2. P. W. Palmberg, G. K. Bohn, and J. C. Tracy, *Applied Physics Letters*. **15**, 254 (1969).
3. V. P. Afanas'ev and S. Ya. Yavor, *Electrostatic Energy Analyzers for Charged Particle Beams* (Nauka, Moscow, 1978) [in Russian].
4. D. Briggs and M. P. Seach (Eds.), *Practical Surface Analysis by Auger and X-ray Photoelectron Spectroscopy* (Wiley, New York, 1983).
5. A. M. Ilyin, *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* **120**, 89 (2001).
6. A. M. Ilyin, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Research A*, **500**, 62 (2003).
7. L. A. Baranova, *Tech. Phys.* **58**, 615 (2013).
8. L. A. Baranova, *Tech. Phys.* **59**, 463 (2014).
9. CPO programs, available from www.electronoptic.com
10. K. Siegbahn, Yu. Golikov, and N. Kholine, *A High Resolution and Large Transmission Spectrometer* (Tecnikum, Institute of Technology, Uppsala University, 1996).
11. Yu. K. Golikov, S. N. Kol'tsov, and N. A. Kholine, *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* **62**, 555 (1998).