

## Конический зеркальный энергоанализатор

© Л.А. Баранова

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

(Поступило в Редакцию 8 ноября 2017 г.)

Проведено исследование электронно-оптических свойств осесимметричного зеркального энергоанализатора, внутренний электрод которого представляет собой цилиндр, а внешний образован двумя идентичными конусами, примыкающими друг к другу своими основаниями. Показано, что светосила и разрешающая способность такого анализатора существенно превосходят аналогичные параметры традиционно используемого цилиндрического зеркала. Выполнение внутреннего электрода из трех цилиндров разного диаметра, находящихся под одним потенциалом, позволяет добиться дальнейшего улучшения электронно-оптических характеристик конического анализатора. При малых углах раствора пучка разрешение конического анализатора вдвое превосходит разрешение цилиндрического зеркала, при возрастании угла раствора разница в разрешении достигает порядка величины.

DOI: 10.21883/JTF.2018.07.46184.2549

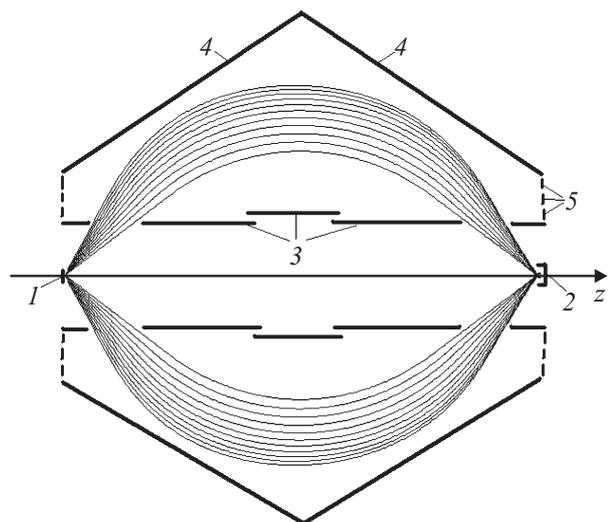
### Введение

В научных исследованиях и в промышленности широкое применение получил цилиндрический зеркальный энергоанализатор. Достоинствами цилиндрического зеркала являются простота конструкции, высокая разрешающая способность, обусловленная наличием фокусировки второго порядка по меридиональному углу, и высокая светосила, обусловленная осевой симметрией анализатора [1–3]. В работах [4,5] предложен и испытан осесимметричный зеркальный энергоанализатор, светосила и разрешающая способность которого значительно превосходят аналогичные параметры цилиндрического зеркала. Существенным недостатком этого прибора является сложная форма электродов, описываемая уравнением  $lnr - (r^2/2 - z^2) = \text{const}$ . В [6] показано, что столь же высокие светосила и разрешение достигаются в цилиндрическом зеркальном анализаторе, если его внешний электрод разрезан на три части, потенциалы на которых можно регулировать независимо. В [7] показано, что дальнейшего улучшения электронно-оптических характеристик цилиндрического зеркала можно добиться в конструкции, где оба электрода (как внешний, так и внутренний) выполнены дискретными.

В настоящей работе предложена и исследована путем компьютерного моделирования еще одна конструкция осесимметричного зеркального анализатора, параметры которого не уступают параметрам анализаторов, описанных в [6,7]. Внешний электрод исследованной конструкции выполнен из конических электродов, внутренний образован одним или тремя цилиндрами.

### Конструкция конического зеркального анализатора

Исследованы две модификации конического анализатора, слегка различающиеся строением внутреннего электрода. Внешний электрод в обеих модификациях образован двумя идентичными усеченными конусами, соприкасающимися своими основаниями. Внутренний электрод в первой модификации представляет собой сплошной цилиндр, во второй — образован тремя цилиндрами, причем радиусы двух крайних цилиндров одинаковы, а радиус среднего цилиндра несколько больше



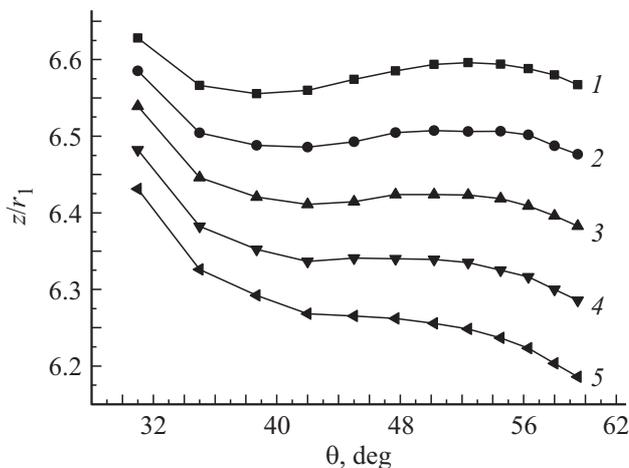
**Рис. 1.** Схематическое изображение конического зеркального анализатора: 1 — исследуемый образец, 2 — детектор, 3 — внутренний цилиндрический электрод, 4 — внешний конический электрод, 5 — электроды, компенсирующие краевое поле.

радиуса крайних. Потенциал внутреннего электрода во всех случаях равен нулю.

Схематическое изображение конического зеркального анализатора представлено на рис. 1 (вторая модификация). Источник заряженных частиц и детектор расположены на оси симметрии анализатора — режим фокусировки „ось-ось“. На каждом из торцов анализатора с целью компенсации краевого поля помещены кольцевые электроды, потенциалы на которых определяются путем расчета распределения потенциала в неусеченных конусах. Поскольку на торцах расстояние между внешним и внутренним электродами в коническом анализаторе существенно меньше, чем в цилиндрическом, проблема компенсации краевого поля здесь стоит менее остро.

### Определение оптимальных геометрических параметров конического анализатора

Электронно-оптические свойства конического зеркального анализатора исследовались численно с помощью программы СРОЗД [8], позволяющей с высокой точностью рассчитывать распределение потенциала и траектории движения заряженных частиц в трехмерных электростатических системах. Было рассчитано несколько вариантов конического анализатора, различающихся радиусом основания конусов, углом при вершине и положением плоскости, в которой конусы соприкасаются, а также длиной и радиусом центральной части внутреннего электрода. Для каждого варианта конструкции определялся потенциал на внешнем электроде, обеспечивающий фокусировку второго порядка на оси анализатора. Рис. 2 иллюстрирует поиск условий фокусировки второго порядка, на нем представлена зависимость координаты точки пересечения траектории



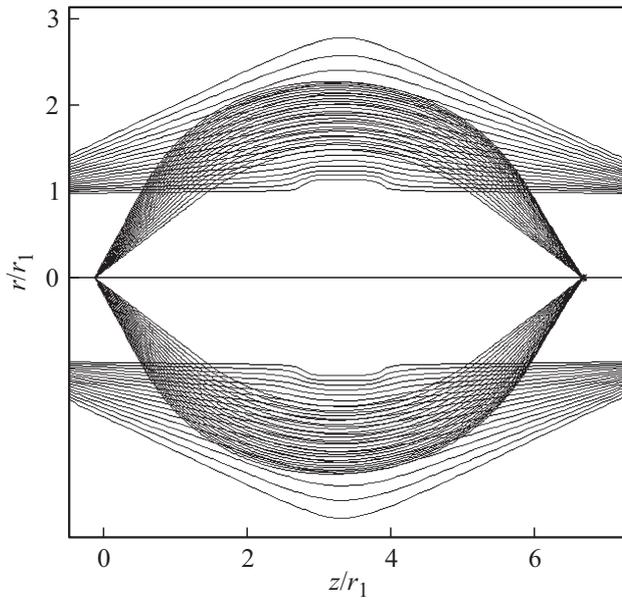
**Рис. 2.** Координата точки пересечения траектории заряженной частицы с осью  $z$  в зависимости от угла входа заряженных частиц  $\theta$  при различных значениях потенциала на внешнем электроде: 1 —  $eV/E = 0.66$ , 2 — 0.67, 3 — 0.68, 4 — 0.69, 5 — 0.7.

заряженной частицы с осью  $z$  от угла  $\theta$  влета частицы в анализатор. Параметром семейства кривых является значение потенциала на внешнем электроде  $V$ , отнесенное к энергии частиц, выраженной в электрон-вольтах ( $eV/E$ ). Кривая 4 соответствует тому случаю, когда производная  $d^2z/d\theta^2$  обращается в нуль, т.е. достигается фокусировка второго порядка. На основании полученных данных определялись базовые электронно-оптические характеристики каждой из исследованных конструкций в режиме фокусировки второго порядка.

Проведенное исследование позволило найти оптимальные геометрические параметры конического анализатора, обеспечивающие наилучшее разрешение и светосилу. Строение внешнего электрода одинаково в обеих модификациях. Радиус общего основания конусов  $r_{c1}$ , отнесенный к радиусу внутреннего цилиндра  $r_1$ , равен  $r_{c1}/r_1 = 3.3$ . Конусы соприкасаются в плоскости, находящейся на расстоянии  $z/r_1 = 3.3$  от источника заряженных частиц. Радиус сечения конуса плоскостью, проходящей через источник заряженных частиц, равен  $r_{c2}/r_1 = 1.7$ . Как уже указывалось выше, внутренний электрод первой модификации представляет собой сплошной цилиндр радиуса  $r_1$ . Во второй модификации внутренний электрод образован тремя цилиндрами. Отношение радиуса центрального цилиндра к радиусу крайних составляет  $r_2/r_1 = 1.15$ , длина центрального цилиндра равна радиусу  $r_1$ , расстояние от его центра до источника заряженных частиц составляет  $3.3r_1$ . Данные, представленные на рис. 2, рассчитаны именно для оптимальной конструкции конического анализатора.

### Электронно-оптические характеристики конического анализатора

Рис. 3 иллюстрирует эквипотенциальные линии и траектории заряженных частиц в коническом анализаторе (вторая модификация), рассчитанные программой СРОЗД. Угол раствора пучка заряженных частиц составляет  $\Delta\theta = 60^\circ - 35^\circ = 25^\circ$ . Как видно из рис. 3, даже при таком экстремально большом угле раствора сохраняется острая фокусировка пучка частиц на оси анализатора. Режим работы, представленный на рис. 3, соответствует кривой 2 на рис. 2 ( $eV/E = 0.67$ ). В этом режиме достигается высокая светосила 15% при сравнительно небольшом разрешении 0.7%. На оси анализатора расположен кроссовер (наименьшее сечение) пучка, в то время как параксиальное изображение источника заряженных частиц располагается дальше по ходу пучка. В режимах с большим значением потенциала на внешнем электроде (кривые 3, 4) можно добиться лучшего разрешения, уменьшая угол захвата пучка, т.е. светосилу. Наилучшее разрешение достигается в режиме, соответствующем кривой 4 ( $eV/E = 0.69$ ), когда параксиальное изображение источника совмещено с осью анализатора, при этом, однако, угол захвата пучка будет минимален. При разрешении в 0.04% светосила



**Рис. 3.** Эквипотенциальные линии и траектории заряженных частиц в коническом зеркальном анализаторе.

Разрешение  $\rho$  трех типов зеркального энергоанализатора в зависимости от угла раствора  $\Delta\theta^\circ$  входящего пучка

Угол раствора пучка $\Delta\theta$	Цилиндрическое зеркало. Разрешение $\rho$	Конический анализатор 1. Разрешение $\rho$	Конический анализатор 2. Разрешение $\rho$
7	0.001	0.0008	0.0004
11	0.008	0.002	0.0015
17	0.03	0.004	0.003
23	0.05	0.006	0.004
27	0.07	0.012	0.009
29	—	0.015	0.011

анализатора составит 4.7%. Таким образом, выбор режима работы (потенциала на внешнем электроде) зависит от требований к соотношению разрешения анализатора и его светосилы. Следует учитывать, что при изменении потенциала на внешнем электроде положение кроссовера пучка сдвигается вдоль оси  $z$  и соответственно меняется оптимальное положение детектора.

В таблице приведены значения разрешения конического анализатора в зависимости от угла раствора пучка заряженных частиц (т.е. в зависимости от его светосилы). Здесь же для сравнения даны соответствующие значения разрешения стандартного цилиндрического зеркала. При углах раствора пучка, не превышающих  $7^\circ$ , разрешение конического анализатора первой модификации и цилиндрического зеркала примерно одного порядка. Разрешение конического анализатора второй модификации вдвое лучше. При возрастании угла раствора разница в качестве фокусировки стремительно возрастает. При углах раствора пучка, превышающих  $17^\circ$ , разрешение конического анализатора на порядок лучше разрешения цилиндрического зеркала.

### Заключение

На основании компьютерного моделирования в работе исследован конический зеркальный энергоанализатор заряженных частиц. Найдены соотношения основных геометрических параметров, обеспечивающие наилучшие разрешение и светосилу анализатора. Показано, что основные электронно-оптические характеристики исследованного анализатора существенно превосходят аналогичные параметры цилиндрического зеркала, традиционно используемого в электронной спектроскопии. При одинаковом угле раствора пучка заряженных частиц на входе в анализатор, равном  $7^\circ$ , разрешение конического анализатора второй модификации составляет 0.04% и вдвое превосходит разрешение цилиндрического зеркала. С увеличением угла раствора пучка разрешение конического анализатора деградирует гораздо медленнее, чем разрешение цилиндрического зеркала, что позволяет работать с большой светосилой при удовлетворительном разрешении. Так, при одинаковом разрешении 0.7% светосила конического анализатора почти в три раза выше светосилы цилиндрического зеркала и составляет 15% от полной сферы.

### Список литературы

- [1] *Blauth E.* // *Zs. Phys.* 1957. Vol. 147. P. 228–231.
- [2] *Заиквара В.В., Корсунский М.И., Космачев О.С.* // *ЖТФ.* 1966. Т. 36. С. 132–138.
- [3] *Афанасьев В.П., Явор С.Я.* Электростатические энергоанализаторы для пучков заряженных частиц. М.: Наука, 1978. 224 с.
- [4] *Siegbahn K., Golikov Yu., Kholine N.* A high resolution and large transmission spectrometer. Tecnikum, Institute of Technology, Uppsala University, 1996.
- [5] *Голиков Ю.К., Кольцов С.Н., Холин Н.А.* // *Изв. АН. Сер. физ.* 1998. Т. 62. № 3. С. 555.
- [6] *Баранова Л.А.* // *ЖТФ.* 2013. Т. 83. Вып. 4. С. 149–151. [*Baranova L.A.* // *Tech. Phys.* 2013. Vol. 58. N 4. P. 615–617.]
- [7] *Баранова Л.А.* // *ЖТФ.* 2017. Т. 87. Вып. 3. С. 458–461. [*Baranova L.A.* // *Tech. Phys.* 2017. Vol. 62. N 3. P. 480–483.]
- [8] CPO programs, available from [www.electronoptic.com](http://www.electronoptic.com)