

Анализатор энергий заряженных частиц на основе модифицированного цилиндрического зеркала в режиме фокусировки „кольцо—ось“

© Л.А. Баранова

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

(Поступило в Редакцию 28 мая 2013 г.)

Проведено исследование электронно-оптических свойств модифицированной конструкции электростатического энергоанализатора типа цилиндрического зеркала, предложенной ранее. Рассмотрен режим работы анализатора, при котором источник заряженных частиц расположен на внутреннем цилиндре, а детектор — на оси цилиндра (фокусировка „кольцо—ось“). На основе численного моделирования показано, что модифицированная конструкция обладает существенно более высоким качеством фокусировки, чем традиционное цилиндрическое зеркало. Найдены оптимальная конструкция и режим питания, при которых сферическая абберация уменьшается в 5 раз по сравнению с обычным цилиндрическим зеркалом.

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.

На практике наиболее часто используются два режима работы цилиндрического зеркала: фокусировка „ось—ось“ и фокусировка „кольцо—ось“. В первом случае как источник, так и детектор заряженных частиц располагаются на оси анализатора. Во втором случае источником заряженных частиц служит входная кольцевая щель на внутреннем цилиндре, и заряженные частицы, эмитируемые реальным источником, фокусируются на эту щель с помощью дополнительных оптических устройств. Детектор по-прежнему располагается на оси.

В [1] предложена модифицированная конструкция цилиндрического зеркала, обладающая более высокими электронно-оптическими характеристиками по сравнению с классическим зеркалом. В [2] исследован режим фокусировки „ось—ось“ и показано, что модифицированное зеркало позволяет существенно улучшить остроту фокусировки за счет уменьшения доминирующего коэффициента сферической абберации в несколько раз. В настоящей работе проведено подробное исследование электронно-оптических характеристик модифицированного цилиндрического зеркала в режиме фокусировки „кольцо—ось“.

Конструкция модифицированного цилиндрического зеркала

Модифицированное цилиндрическое зеркало состоит из двух коаксиальных цилиндров с радиусами r_1 и r_2 , между которыми приложено тормозящее электростатическое поле. Отличие от классического цилиндрического зеркала состоит в том, что внешний цилиндр разрезан на три электрически изолированных части, на которые подаются независимо регулируемые потенциалы.

На рис. 1 дано схематическое изображение исследованного анализатора и ход траекторий в нем в том случае, когда источником заряженных частиц служит кольцевая щель на внутреннем цилиндре, а детектор

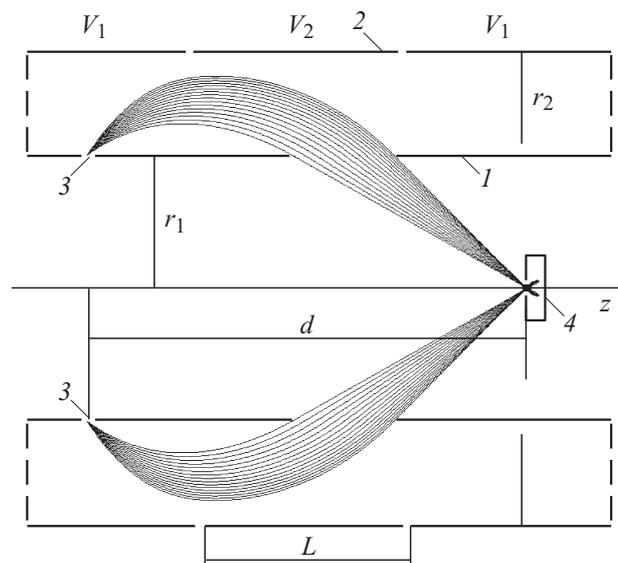


Рис. 1. Конструкция модифицированного цилиндрического зеркала.

расположен на оси симметрии (режим фокусировки „кольцо–ось“).

В [1,2] было показано, что улучшение качества фокусировки в модифицированном зеркале происходит только в том случае, если потенциал на центральной части внешнего цилиндра по абсолютной величине меньше потенциалов на боковых частях. Наилучшую фокусировку обеспечивает симметричный режим питания, когда на боковые части внешнего цилиндра поданы одинаковые потенциалы V_1 .

Численное моделирование модифицированного цилиндрического зеркала

Численное моделирование анализатора проводилось с помощью программы СРОЗД, позволяющей с высокой точностью рассчитывать распределение потенциала и траектории движения заряженных частиц в трехмерных электростатических системах [3]. Исследование показало, что электронно-оптические характеристики модифицированного цилиндрического зеркала существенно зависят от длины центральной части L внешнего цилиндра и от отношения потенциалов на центральной и боковых частях V_2/V_1 . В ходе исследования были найдены оптимальные соотношения геометрических и электрических параметров, обеспечивающие наилучшее качество фокусировки.

Для каждого исследованного варианта конструкции и заданного режима питания проводился поиск условий, при которых осуществляется фокусировка второго порядка. С этой целью строилось семейство кривых, представляющих собой зависимость координаты точки пересечения траектории с осью z на выходе из анализатора от угла наклона траектории θ на входе в анализатор. Параметром семейства кривых являлось значение энергии E заряженных частиц, т.е. каждая кривая строилась для заданного значения энергии. Как известно, фокусировка второго порядка выполняется в том случае, если удовлетворено условие $dz/d\theta = d^2z/d\theta^2 = 0$ при некотором значении угла θ . В построенном семействе только одна кривая удовлетворяет указанному условию. Найдя эту кривую, можно непосредственно определить энергию настройки анализатора E_r (параметр E данной кривой), угол наклона θ_r центральной траектории на входе в анализатор, в окрестности которого выполняется фокусировка второго порядка, и положение изображения на оси z .

При наличии фокусировки второго порядка доминирующим абберационным членом является сферическая абберация третьего порядка. Размытие изображения вдоль оси z , обусловленное сферической абберацией, дается формулой $\Delta z = C_3 \alpha^3$, где C_3 — коэффициент сферической абберации третьего порядка и α — угол полураствора пучка в меридиональной плоскости на входе в анализатор. Величина C_3 служила критерием

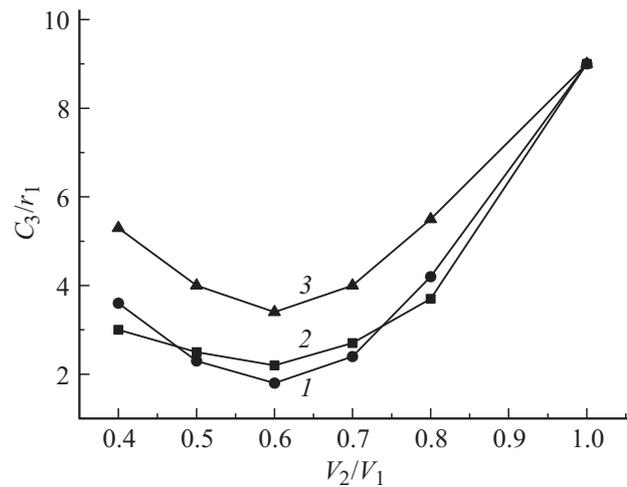


Рис. 2. Зависимость коэффициента сферической абберации третьего порядка от потенциала на центральной части внешнего цилиндра. Длина центральной части внешнего цилиндра составляет L/r_1 : 1 — 2.0, 2 — 2.25 и 3 — 6.0.

при выборе оптимального варианта конструкции анализатора.

Рис. 2 иллюстрирует поиск оптимальной конструкции и оптимального питания анализатора, на нем представлена зависимость коэффициента сферической абберации C_3 от отношения потенциалов на центральной и боковых частях V_2/V_1 для трех значений длины L центральной части внешнего цилиндра. Ближайший к источнику край центральной части неподвижен и находится от него на расстоянии $0.8r_1$, измеренном вдоль оси z . Как видно из рисунка, коэффициент C_3 принимает минимальное значение при $L = 2.0r_1$ и $V_2/V_1 = 0.6$. В этом случае сферическая абберация модифицированного зеркала в 5 раз меньше, чем абберация обычного зеркала в режиме фокусировки „кольцо–ось“.

В таблице приведены характеристики ряда рассчитанных вариантов. Первая строка таблицы относится к традиционному цилиндрическому зеркалу, четвертая строка

Электронно-оптические характеристики традиционного (первая строка) и модифицированного цилиндрического зеркал в режиме фокусировки „кольцо–ось“

$\frac{L}{r_1}$	$\frac{V_2}{V_1}$	$\frac{E_r}{eV_1}$	$\theta_r, \text{deg.}$	$\frac{d}{r_1}$	$\frac{D}{r_1}$	$\frac{r_{\max}}{r_1}$	$\frac{C_3}{r_1}$
0	1.0	1.356	38.8	3.60	2.97	1.45	8.7
2.6	0.6	0.89	43.5	3.41	3.44	1.40	3.4
2.25	0.6	0.91	43.5	3.47	3.39	1.40	2.2
2.0	0.6	0.95	43.5	3.60	3.23	1.40	1.7
1.8	0.6	1.02	42.0	3.77	2.87	1.41	2.6
1.4	0.6	1.30	38.8	4.24	2.56	1.50	15.0

Примечание. Здесь E_r — энергия настройки анализатора, θ_r — средний угол взлета 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 абберации третьего порядка.

соответствует оптимальному варианту модифицированного зеркала, обеспечивающему наилучшее качество фокусировки. Последняя строка таблицы показывает, что при неудачно выбранной конструкции (в данном случае слишком короткая центральная часть внешнего цилиндра) качество фокусировки модифицированного зеркала может даже ухудшиться по сравнению с традиционным зеркалом.

Рис. 3 иллюстрирует различия в распределении потенциала и ходе траекторий в обычном и модифицированном цилиндрическом зеркалах в режиме фокусировки второго порядка. Видно, что ослабление напряженности поля в центральной части модифицированного анализатора существенным образом улучшает качество фокусировки заряженных частиц на оси.

Рис. 4 также позволяет сравнить качество фокусировки в двух видах цилиндрического зеркала. На нем представлена зависимость координаты точки пересечения

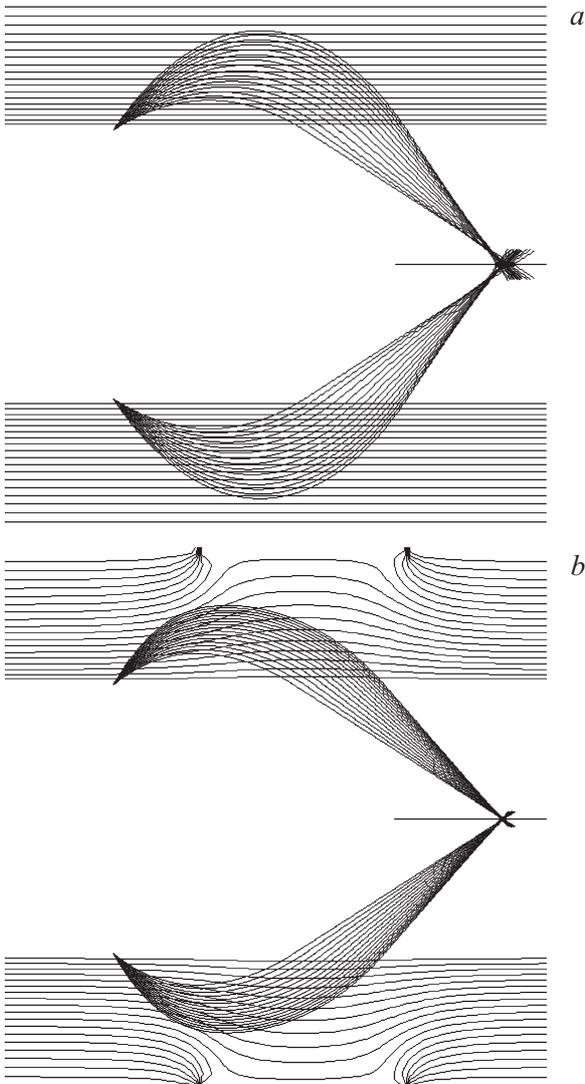


Рис. 3. Эквипотенциальные линии и траектории заряженных частиц в классическом (а) и модифицированном (б) цилиндрическом зеркалах.

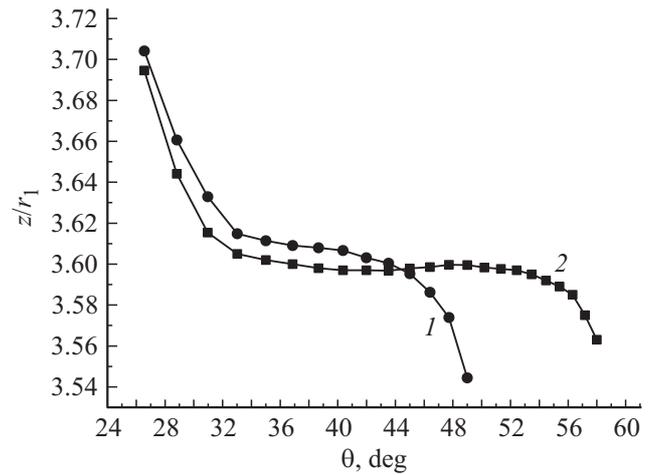


Рис. 4. Координата точки пересечения траектории заряженной частицы с осью z в зависимости от угла входа θ : 1 — традиционное цилиндрическое зеркало, 2 — модифицированное цилиндрическое зеркало.

траектории с осью z на выходе из анализатора от угла наклона θ этой траектории на входе в анализатор в режиме фокусировки второго порядка. Видно, что диапазон начальных углов, в котором координата точки пересечения траектории с осью z практически постоянна, т.е. не зависит от угла наклона θ , в модифицированном зеркале гораздо шире, чем в обычном. Следовательно, при заданном разрешении модифицированное зеркало обладает гораздо большей светосилой. Если же задаться одинаковым значением светосилы, то разрешающая способность модифицированного зеркала будет в несколько раз выше, чем обычного.

Заключение

Проведено численное исследование электронно-оптических свойств энергоанализатора типа цилиндрического зеркала, внешний электрод которого разделен на три электрически изолированные части, находящиеся под разными потенциалами. Найдены условия фокусировки второго порядка в модифицированном цилиндрическом зеркале для случая, когда источник заряженных частиц расположен на внутреннем электроде, а детектор на оси (фокусировка „кольцо–ось“). Показано, что модифицированное зеркало обеспечивает более высокое качество фокусировки, чем обычное в случае, когда потенциалы, поданные на боковые части внешнего цилиндра, по абсолютной величине превосходят потенциал, поданный на центральную часть. Найдены оптимальная конструкция и режим питания, при которых сферическая aberrация третьего порядка принимает минимальное значение. При длине центральной части $L = 2.0r_1$ и соотношении потенциалов $V_2/V_1 = 0.6$ сферическая aberrация такого анализатора в 5 раз меньше, чем aberrация традиционного цилиндрического зеркала.

Уменьшение величины сферической аберрации в несколько раз позволяет существенно улучшить эксплуатационные качества энергоанализатора. Это дает возможность либо 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.

Список литературы

- [1] Баранова Л.А. Патент на полезную модель № 120512. Л.А. Баранова. Приоритет от 5.05.2012. Бюл. № 26. 2012.
- [2] Баранова Л.А. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 4. С. 149–151.
- [3] СРО programs. www.electronoptic.com.