

Цилиндрический зеркальный энергоанализатор в режиме впуска заряженных частиц через торцевую диафрагму

© Л.А. Баранова

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

(Поступило в Редакцию 23 ноября 2015 г.)

На основе компьютерного моделирования исследованы электронно-оптические свойства цилиндрического зеркального анализатора при впуске заряженных частиц через торцевую диафрагму. С целью повышения линейной дисперсии рассмотрены режимы с двукратным пересечением заряженными частицами оптической оси (двухкаскадный анализатор). Внешний электрод исследуемой электронно-оптической системы предложено разделять на несколько изолированных частей, потенциалы на которых регулируются независимо друг от друга. Это позволяет осуществлять настройку фокусировки второго порядка, а также варьировать линейную дисперсию в широких пределах. Найдены оптимальные режимы работы, позволяющие повысить линейную дисперсию в 3–4 раза по сравнению с однокаскадным режимом.

Введение

Цилиндрический зеркальный энергоанализатор представляет собой один из самых распространенных инструментов в современной электронной спектроскопии. Достоинствами этого прибора являются высокая светосила, обусловленная осевой симметрией конструкции, и высокая разрешающая способность, обусловленная наличием фокусировки второго порядка по меридиональному углу. Недостатком цилиндрического зеркала является необходимость располагать исследуемый объект очень близко к самому анализатору, поскольку заряженные частицы должны впускаться в анализирующее поле через входное окно во внутреннем цилиндре под углом 42.3° к оптической оси. Однако многие приложения, такие как ядерная физика, исследование поверхности материалов, не позволяют расположить объект исследования в непосредственной близости от анализатора. В связи с этим представляется актуальным использовать цилиндрический зеркальный анализатор в режиме впуска заряженных частиц через торцевую диафрагму, а не через внутренний цилиндр. В этом случае исследуемый объект может располагаться на больших расстояниях от анализатора. В работе [1] исследованы электронно-оптические свойства цилиндрического зеркала, в котором заряженные частицы входят в поле анализатора через торцевую диафрагму, находящуюся под потенциалом внутреннего цилиндра. Найдены условия фокусировки второго порядка в такой конструкции. Однако дисперсия анализатора при впуске частиц через торец снижается почти в 2 раза по сравнению с традиционным режимом работы. В работе [2] предложена конструкция анализатора из двух коаксиальных цилиндров с торцевой входной диафрагмой, обладающая высокой дисперсией, однако там не найдены режимы с фокусировкой второго порядка.

В настоящей работе найдена возможность повышения линейной дисперсии цилиндрического зеркала при впуске анализируемых частиц через торцевую диафрагму с сохранением фокусировки второго порядка.

Конструкция двухкаскадного цилиндрического анализатора с торцевой входной диафрагмой

Простым способом повышения линейной дисперсии цилиндрического анализатора с торцевой входной диафрагмой представляется использование тандема из двух анализаторов, причем во втором из них осуществляется традиционный режим работы, при котором заряженные частицы входят в анализирующее поле через окно во внутреннем цилиндре и используется режим фокусировки „ось–ось“. Препятствием для осуществления такой схемы является то, что во второй анализатор частицы должны входить под углом 42.3° к оптической оси, тогда как угол выхода частиц из первого анализатора отличается от этого значения и меняется в зависимости от расстояния между исследуемым объектом и входом в первый анализатор.

В работе [3] предложена модифицированная конструкция цилиндрического зеркала, которая позволяет существенно улучшить электронно-оптические характеристики анализатора и в которой угол входа частиц в анализатор варьирует в зависимости от режима работы. Внешний электрод модифицированной конструкции образован несколькими соосными цилиндрами одинакового радиуса, на которые подаются независимо регулируемые потенциалы. В настоящей работе аналогичная конструкция применена для повышения линейной дисперсии тандема из двух зеркальных цилиндрических анализаторов (двухкаскадного анализатора). На рис. 1 схематически показан один из предлагаемых вариантов двухкаскад-

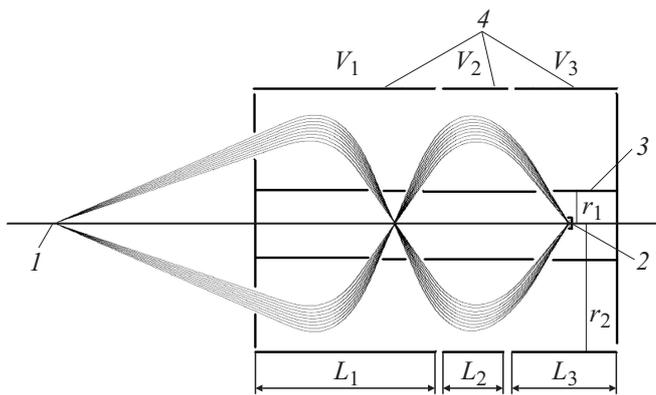


Рис. 1. Схематическое изображение конструкции двухкаскадного цилиндрического зеркала и траекторий заряженных частиц, 1 — источник заряженных частиц, 2 — детектор, 3 — заземленный внутренний цилиндр, 4 — составной внешний цилиндр.

ного анализатора. Внешний электрод образован тремя отдельными цилиндрами с независимым питанием. На обоих торцах расположены диафрагмы, электрически соединенные с внутренним электродом (как правило, заземленные). На рисунке показаны также траектории заряженных частиц в предлагаемой конструкции. Способ расчета траекторий и поиск режимов с фокусировкой второго порядка рассмотрены ниже.

Компьютерное моделирование двухкаскадного цилиндрического зеркального анализатора

Электронно-оптические свойства зеркального анализатора были исследованы численно с помощью программы СРОЗД [4]. Геометрические параметры конструкции были заданы следующим образом: отно-

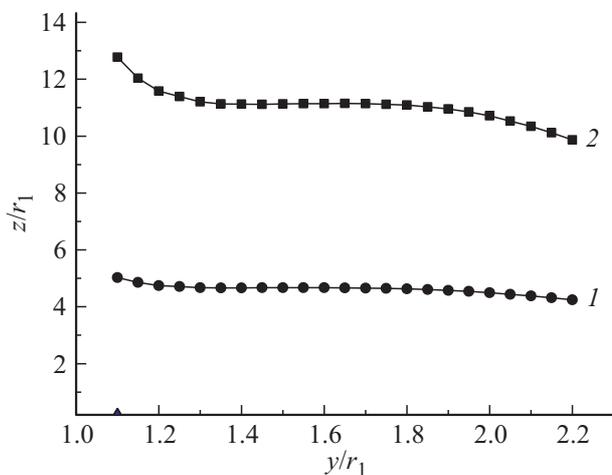


Рис. 2. Координата точки пересечения траектории заряженной частицы с осью z в зависимости от координаты y входа частицы в анализатор, 1 — первый фокус, 2 — второй фокус.

Таблица 1. Зависимость линейной дисперсии D/r_1 цилиндрического зеркального энергоанализатора от потенциалов V_i на составных частях внешнего электрода

eV_1/E	eV_2/E	eV_3/E	D/r_1
1.20	Однокаскадный анализатор		3.2
	1.20	—	
1.20	Двухкаскадный анализатор		6.7
	0.70	—1.50	
	0.85	1.20	
	0.94	0.94	
	1.00	0.70	
	1.20	0	
(линейное распределение)			13.6

шение радиусов внешнего и внутреннего цилиндров равно $r_2/r_1 = 4$, длина всего анализатора составляет $L/r_1 = 16$, длина первой части внешнего цилиндра составляет $L_1/r_1 = 6.5$. Количество и длины остальных частей внешнего цилиндра варьировались в процессе поиска оптимальной конструкции анализатора.

На первом этапе работы был проведен поиск режима с фокусировкой второго порядка в первой ступени двухкаскадного анализатора, т.е. заряженные частицы, входящие в анализатор через торцевую диафрагму, регистрировались при первом пересечении ими оси анализатора. Стандартный метод поиска режима с фокусировкой второго порядка заключается в том, что строится семейство кривых, характеризующих зависимость координаты пересечения траектории с осью z от координаты y входа частицы в поле анализатора. Параметром семейства является отношение потенциала на внешнем электроде к энергии частицы, выраженной в электрон-вольтах. Кривая семейства, в определенной точке которой выполняется условие $dz/dy = d^2z/dy^2 = 0$, соответствует фокусировке второго порядка.

Непосредственно из этой кривой определяются координата входа центральной траектории пучка в поле и положение фокуса на оси z . Кривая 1 на рис. 2 соответствует фокусировке второго порядка в первой ступени двухкаскадного анализатора. Параметры найденного режима таковы: исследуемый объект расположен на расстоянии $8r_1$ от входной диафрагмы, центральная 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. Поиск режима с фокусировкой второго

Таблица 2. Зависимость линейной дисперсии D/r_1 цилиндрического зеркального энергоанализатора от расстояния l/r_1 между источником заряженных частиц и торцевой входной диафрагмой

l/r_1	5	8	10	12
D/r_1	13.6	13.6	11.8	9.6

порядка во второй ступени двухкаскадного анализатора производился аналогичным образом (кривая 2 на рис. 2).

На первом этапе работы мы исследовали конструкцию, предложенную в работе [3], а именно внешний электрод анализатора был образован тремя соосными цилиндрами, длины которых составляли соответственно: $L_1 = 6.5r_1$, $L_2 = 3.5r_1$ и $L_3 = 6r_1$. Фокусировки второго порядка удалось добиться при целом ряде значений потенциалов на втором и третьем цилиндрах, при этом значение линейной дисперсии варьировало в довольно широких пределах. В табл. 1 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. 1 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. Программа СРОЗД позволяет моделировать системы, на определенных электродах которых потенциал меняется линейно вдоль оси z . Мы воспользовались этой опцией в нашей работе. Последняя строка табл. 1 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. Кривая 2 на рис. 2 иллюстрирует фокусировку второго порядка именно в этом режиме работы двухкаскадного анализатора.

На практике, конечно, линейное падение потенциала, как правило, аппроксимируется ступенчатой функцией. Мы провели компьютерное моделирование анализатора, в котором внешний цилиндр разделен на 4 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.

В работе была также исследована зависимость линейной дисперсии анализатора от расстояния между источником заряженных частиц и входом в анализатор. Рассматривались только режимы с линейным распределением потенциала на второй части внешнего цилиндра. Таблица 2 иллюстрирует полученные результаты, из которых можно заключить, что оптимальное расстояние источника заряженных частиц от анализатора находится в пределах от $5r_1$ до $8r_1$. При больших расстояниях линейная дисперсия падает, при меньших — невозможно добиться фокусировки второго порядка.

Заключение

Проведено численное исследование электронно-оптических свойств двухкаскадного цилиндрического зеркального энергоанализатора, внешний электрод которого разделен на несколько электрически изолированных частей, находящихся под разными потенциалами. Найдены условия фокусировки второго порядка в первом каскаде и в двухкаскадном анализаторе в целом. Выполнение условий фокусировки второго порядка в первом каскаде однозначно определяет значение потенциала на первой части внешнего цилиндра. Фокусировка второго порядка на выходе из второго каскада получена в целом ряде режимов при различных потенциалах на остальных частях внешнего цилиндра. Показано, что линейная дисперсия двухкаскадного анализатора в несколько раз превышает дисперсию однокаскадного и существенно зависит от значений потенциалов на внешнем электроде. Максимального значения линейная дисперсия достигает в анализаторе, внешний электрод которого состоит из двух цилиндров, причем от левого до правого края второго цилиндра потенциал линейно уменьшается от значения потенциала на первом цилиндре до нуля. В этом режиме линейная дисперсия в 4 раза превышает дисперсию однокаскадного прибора. Показано, что аппроксимация линейного распределения потенциала ступенчатой функцией практически не вызывает уменьшения дисперсии.

Список литературы

- [1] *Ilyin A.M.* // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Research A. 2003. Vol. 500. P. 62–67.
- [2] *Фишкова Т.Я.* // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 12. С. 128–129.
- [3] *Баранова Л.А.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 4. С. 149–151.
- [4] СРО programs, available from www.electronoptic.com