

УДК 537.533.34

## РЕЖИМ СПЕКТРОГРАФА В ЭНЕРГОАНАЛИЗАТОРЕ ИЗ ДВУХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ

*В. В. Зашквара, В. У. Ашимбаева, А. Ф. Былинкин*

Установлено, что в системе из двух последовательно расположенных электростатических цилиндрических зеркал с внутренним и внешним отражением можно осуществить спрямление линии фокусов. При этом вдоль цилиндрической поверхности в диапазоне  $\pm 20\%$  от основной энергии пучка сохраняется хорошее качество угловой фокусировки. Изготовлен и испытан макет спектрографа.

Одна из возможностей повышения экспрессности энергоанализа в электронной спектроскопии состоит в использовании энергоанализа — торов, работающих в режиме спектрографа, и многоканальных детекторов для одновременной регистрации электронов различной энергии. Однако известные спектрографы —  $180^\circ$ -ный сектор с однородным магнитным полем, электростатический анализатор типа плоского зеркала — часто не удовлетворяют требованиям по светосиле, поэтому представляет определенный интерес выяснить возможность использования в качестве спектрографа энергоанализирующих систем другого типа.

В настоящее время в электронной спектроскопии широко распространен электростатический цилиндрический зеркальный анализатор (ЦЗА) [1]. Создаваемое электростатическим полем между двумя цилиндрическими электродами электронное зеркало обеспечивает пространственную фокусировку пучка и, следовательно, высокую светосилу анализатора, но известные электронно-оптические схемы ЦЗА рассчитаны только на спектроскопический режим. Перевод ЦЗА в режим спектрографа связан с решением задачи о спрямлении линии фокусов.

Линия фокусов анализатора — геометрическое место фокусов пучков частиц различных энергий. В ЦЗА вращением линии фокусов, расположенной в аксиальной плоскости, вокруг оси симметрии образуется поверхность фокусов, которая пересекает цилиндрическую поверхность, содержащую кольцевое изображение источника, сформированное пучком заряженных частиц с основной энергией  $E_0$ . С изменением энергии  $\epsilon = E - E_0/E_0$  линия фокусов быстро удаляется в радиальном направлении от кольцевого изображения. Поверхность фокусов в ЦЗА сложная, и осуществить режим спектрографа трудно. Предпринимались попытки спрямить линию фокусов ЦЗА, модифицируя отклоняющее поле изменением формы одного из электродов [2], фокусировка анализатора вдоль спрямленной линии фокусов при этом резко ухудшилась.

Задачу о спрямлении линии фокусов в ЦЗА можно решить, если последовательно с цилиндрическим зеркалом расположить некоторый энергоанализирующий элемент, линия фокусов которого в точке  $E = E_0$  характеризуется по отношению к ЦЗА производной противоположного знака. Оказалось, что таким элементом, адекватным ЦЗА по симметрии и геометрии прохождения пучка заряженных частиц, при определенных условиях может служить цилиндрическое зеркало с внешним отражением.

В настоящей работе показано, что в системе из двух согласованных по параметрам цилиндрических зеркал — с внутренним и внешним отражением

пучка — можно спрямить линию фокусов вдоль цилиндрической поверхности, сохраняя угловую фокусировку пучков в широком диапазоне энергии. Благодаря этому свойству появляется реальная возможность перевода ЦЗА в режим спектрографа.

Схема прохождения траектории через систему из двух цилиндрических зеркал изображена на рис. 1 (выше оси симметрии). Электронно-оптический источник  $s$  в форме узкого кольца, расположенного во внутренней области цилиндрического электрода радиуса  $r_0$ , удален от поверхности  $r_0 = \text{const}$  на расстояние  $\Delta_1$  (все линейные размеры в дальнейшем выражены в долях  $r_0$ ). В результате двукратного отражения от цилиндрического поля пучок заряженных частиц, осевая траектория которого изображена на рис. 1, фокусируется в кольцевое изображение  $i$ , удаленное от поверхности  $r_0 = \text{const}$  на расстояние  $\Delta_2$ . В качестве критерия спрямления линии фокусов системы мы приняли равенство нулю тангенса угла наклона касательной к линии фокусов в точке пересечения ее с осевой траекторией пучка ( $\varepsilon = 0$ ). Поскольку из-за присущей ЦЗА дисперсии

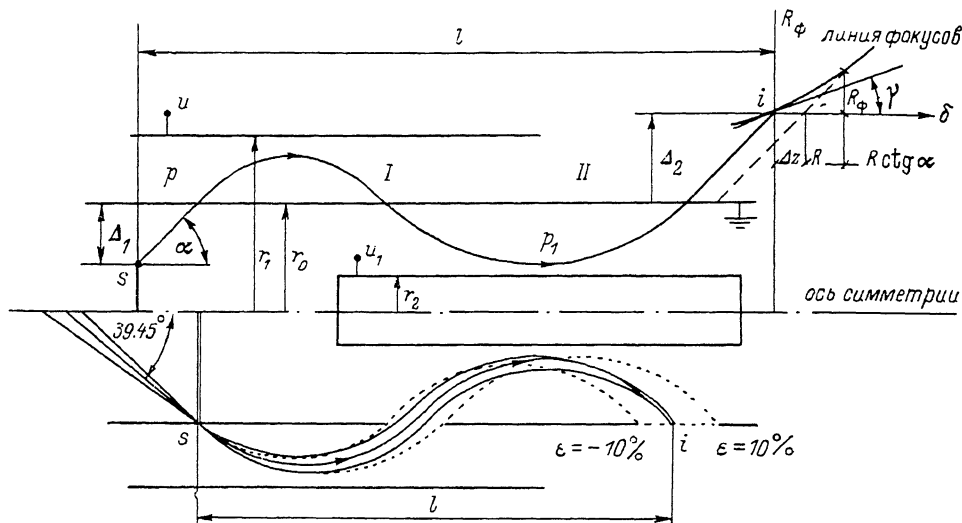


Рис. 1. Траектории в системе из двух цилиндрических зеркал — с внутренним (I) и внешним (II) отражением.

по энергии  $dl/d\varepsilon \neq 0$ , то равенство  $\text{tg } \gamma = d\Delta/d\varepsilon$ ;  $dl/d\varepsilon = 0$  эквивалентно  $d\Delta/d\varepsilon = 0$ , где  $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$ . Формула, связывающая параметры зеркал системы (рис. 1), работающей в условиях спрямления линии фокусов на цилиндрической поверхности, имеет следующий вид:

$$\Delta = 4 \frac{(n + n_1)(m p + m_1 p_1) - 2(p^0 + p_1 \theta_1)(n + n_1 + m p^3 - m_1 p_1^3)}{2(n + n_1 + m p^3 - m_1 p_1^3) + m p + m_1 p_1}, \quad (1)$$

где

$$m = \theta + p(1 + 2q\theta), \quad n = p^2(1 + 2p\theta), \\ m_1 = \theta_1 + p_1(1 - 2p_1\theta_1), \quad n_1 = p_1^2(1 - 2p_1\theta_1),$$

где

$$p = \sqrt{\frac{E}{qu} \ln \frac{r_1}{r_0}} \sin \alpha \quad \text{и} \quad p_1 = \sqrt{\frac{E}{qu_1} \ln \frac{r_0}{r_1}} \sin \alpha$$

— параметры отражения от зеркал I и II соответственно,  $\theta = e^{p^2} \int_0^p e^{-x^2} dx$ ,  $\theta_1 = e^{-p_1^2} \int_0^{p_1} e^{x^2} dx$ . К формуле (1) можно прийти, если условие угловой фокусировки первого порядка в системе (рис. 1)

$$\Delta(1 + \text{ctg}^2 \alpha) = 4 [\text{ctg}^2 \alpha (n + n_1) - p^0 - p_1 \theta_1] \quad (2)$$

Т а б л и ц а 1

$p$	$p_1$	$\alpha$ , град	$l$	$A_{II}$	$A_{III}$	$A_2$
0.30000	0.32435	44.85461	0.77884	-1.54978	0.01591	0.77490
0.32000	0.35020	44.80485	0.89718	-1.78228	0.02450	0.89112
0.34000	0.37695	44.74501	1.02629	-2.03447	0.03680	1.01724
0.36000	0.40490	44.66877	1.16761	-2.30849	0.05453	1.15425
0.38000	0.43425	44.57191	1.32241	-2.60592	0.07993	1.30295
0.40000	0.46512	44.45267	1.49178	-2.92756	0.11582	1.46379
0.42000	0.49794	44.30085	1.67821	-3.27647	0.16704	1.63823
0.44000	0.53300	44.11055	1.88386	-3.65423	0.23996	1.82713
0.46000	0.57092	43.86645	2.11274	-4.06474	0.34534	2.03236
0.48000	0.61240	43.55169	2.36975	-4.51156	0.49981	2.25577
0.50000	0.65865	43.13451	2.66327	-5.00118	0.73335	2.50057
0.52000	0.71165	42.56049	3.00757	-5.54374	1.10435	2.77184
0.54000	0.77525	41.71747	3.43162	-6.15903	1.74859	3.07952
0.56000	0.85525	40.45875	3.98022	-6.84964	2.98428	3.43220
0.56000	1.26967	21.63214	10.28344	-11.80789	162.89481	5.90407
0.56702	0.90000	39.44933	4.31093	-7.22980	4.08175	3.61490
0.56702	1.22738	25.55501	8.49297	-10.43446	73.93730	5.21734
0.57000	0.92074	38.97511	4.46682	-7.39077	4.69210	3.69537
0.57000	1.20582	27.19174	7.90633	-9.99309	54.11031	4.99655
0.57925	1.07595	34.15197	5.84765	-8.53873	14.40537	4.2695

Пр и м е ч а н и е.  $l$  — расстояние между источником и изображением,  $A_{II}$  и  $A_{III}$  — коэффициенты угловых аберраций второго и третьего порядков,  $A_2$  — коэффициент линейной дисперсии по энергии [3].

продифференцировать по  $\epsilon$  и, положив  $d\Delta/d\epsilon=0$ , исключить из этого уравнения  $\text{ctg } \alpha$ . Подробные выкладки содержатся в работе [3]. Согласно схеме на рис. 1, уравнение линии фокусов  $l$  в координатах  $R_\phi$  и  $\delta$  представим параметрически

$$R_\phi = \Delta - \Delta(0) = 4 \sin^2 \alpha [\text{ctg}^2 \alpha (n + n_1) - p^\theta - p_1 \theta_1], \quad (3)$$

$$\delta = \Delta z + R_\phi \text{ctg } \alpha = 4 \text{ctg } \alpha [p^\theta + p_1 \theta_1 - p(0)^\theta(0) - p_1(0)\theta_1(0)] + R_\phi \text{ctg } \alpha. \quad (4)$$

В формулах (3) и (4) параметры, помеченные индексом «0», относятся к осевой траектории основного пучка ( $\epsilon=0$ ).

В зависимости от  $p \geq 0.3$  для  $\Delta=0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$  по найденным решениям уравнений (1) и (2) построены графики функций  $p_1(p)$  и  $\alpha(p)$  (рис. 2). Часть кривых семейства  $p_1(p)$  или  $\alpha(p)$ , представляющих наибольший интерес, состоит из двух ветвей, сходящихся в крайней точке, в которой производные  $dp_1/dp$  и  $d\alpha/dp$  обращаются в бесконечность. В табл. 1 приведены данные о значениях параметров системы для случая  $\Delta=0$ , когда источник и изображение располагаются на поверхности среднего цилиндрического электрода  $r=r_0$ . Из рис. 2 и табл. 1 следует, что в системе из двух ЦЗА спрямление линии фокусов осуществляется в довольно широком диапазоне значений основных параметров зер-

Т а б л и ц а 2

$\epsilon$ , %	$\Delta\alpha$ , град	$\Delta l$	$\epsilon$ , %	$\Delta\alpha$ , град	$\Delta l$
-20.0	-2.0	-0.01002	0.0	2.0	-0.00864
-20.0	2.0	-0.00600	4.0	-2.0	-0.00918
-16.0	-2.0	-0.00960	4.0	2.0	-0.00864
-16.0	2.0	-0.00682	8.0	-2.0	-0.00954
-12.0	-2.0	-0.00927	8.0	2.0	-0.00842
-12.0	2.0	-0.00751	12.0	-2.0	-0.01010
-8.0	-2.0	-0.00905	12.0	2.0	-0.00798
-8.0	2.0	-0.00806	16.0	-2.0	-0.01085
-4.0	-2.0	-0.00894	16.0	2.0	-0.00730
-4.0	2.0	-0.00844	20.0	-2.0	-0.01182
0.0	-2.0	-0.00898	20.0	2.0	-0.00636

кал  $\Delta$ ,  $p$  и  $p_1$ . Если  $\Delta=0$ , то линия фокусов проходит вблизи поверхности среднего цилиндрического электрода  $r=r_0$ , и в этом случае для  $p > 0.54$  существуют электронно-оптические схемы, для которых коэффициент линейной дисперсии по энергии  $A_2$  больше трех. В качестве примера на рис. 1 ниже оси симметрии (2) представлена схема из двух согласованных зеркал, характеризующаяся следующими расчетными параметрами:  $p=0.56702$ ,  $p_1=0.9$ ,  $\Delta=0$ ,  $\alpha=39.45^\circ$ ,  $l=4.3109$ ,  $A_2=3.6149$ ,  $A_{II}=-7.23$ ,  $A_{III}=4.08125$ . Пунктиром изображены осевые траектории пучков, отличающихся по энергии на  $\pm 10\%$  от энергии осевого пучка. Для этого случая по формулам (3) и (4) была рассчитана спрямленная линия фокусов (рис. 3), ее хорошо аппроксимирует полином четвертой степени  $R_\phi=0.04919 \delta^2 + 0.00646 \delta^3 - 0.00323 \delta^4$ . В табл. 2 в зависимости от  $\epsilon$  приведены значения величин продольного размытия изображения, вызванного угловой расходимостью пучка  $\Delta\alpha=\pm 2^\circ$  на поверхности  $r=r_0$  вблизи спрямленной линии фокусов (рис. 3). Размытие характеризуется величиной  $\Delta l=l, (\epsilon,$

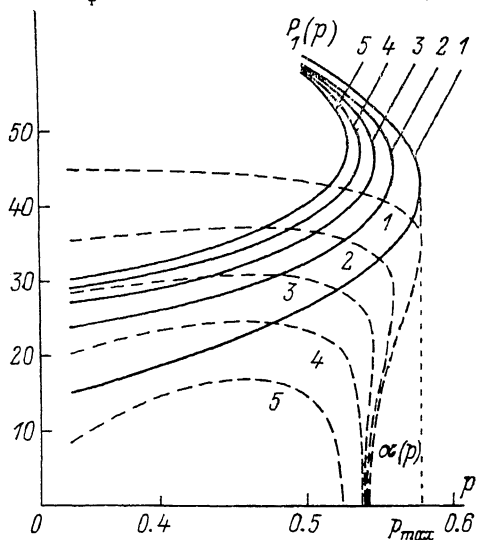


Рис. 2. 1 —  $\Delta=0$ , 2 — 0.25, 3 — 0.5, 4 — 0.75, 5 — 1.0.

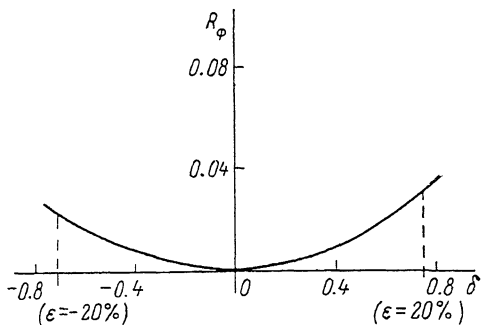


Рис. 3. График спрямленной линии фокусов.

$\pm 2^\circ$ ) —  $l(\epsilon, 0)$ , рассчитанной для крайних траекторий пучка. Видно, что в диапазоне  $\epsilon = \pm 20\%$  имеет место хорошее качество фокусировки пучка.

Для экспериментальной проверки результатов теоретического рассмотрения был изготовлен и испытан макет спектрографа, в котором реализована электронно-оптическая схема угловой фокусировки первого порядка, сопровождающейся спрямлением линии фокусов для случая  $\Delta=0$ ,  $\alpha=39.45^\circ$ . Общий вид конструкции макета представлен на рис. 4. Базовой деталью является средний цилиндрический электрод 1, выполненный из трубы диаметром 42 мм, толщина стенки 0.5 мм (сталь 1×18Н10Т). В корпусе электрода 1 с угловым раскрытием на  $60^\circ$  профрезерованы входная щель шириной 0.5 мм и два окна 3 и 4. Окна 3 и 4 затянута односторонней сеткой из нихромовых нитей толщиной 0.15 мм, расположенных вдоль образующих цилиндра 1 с шагом 1 мм; окно 4 сверху закрыто экраном цилиндрической формы из прозрачного стекла 5, на внутреннюю поверхность которого нанесен тонкий проводящий слой люминофора, флуоресцирующего под действием электронного пучка. Рабочие области электростатического цилиндрического поля в каскадах внешнего и внутреннего отражения пучка заключены между участками среднего цилиндрического электрода 1, внешним полуцилиндрическим электродом 6, внутренним цилиндрическим электродом 7, боковыми щемами 8 и 9. Детали 6, 7, 8 и 9 из дюралюминия марки ДТ-16. На электроды 6 и 7 подаются отклоняющие потенциалы  $u$  и  $u_1$ . На боковых щемах 8 и 9 укреплены по два защитных электрода кольцевой формы, находящиеся под потенциалом в соответствии с логарифмическим законом изменения цилиндрического поля с радиусом. Радиусы рабочих поверхностей среднего 1 и внешнего 6 электродов составляют:  $r_0=21$ ,  $r_1=35$  мм. Величина радиуса поверхности внутреннего электрода  $r_2$  была выбрана, исходя из требования ра-

венства отклоняющих потенциалов  $u$  и  $u_1$  в каскадах, которое приводит к соотношению

$$\frac{\ln r'_0/r_2}{\ln r_1/r_0} = \left(\frac{p_1}{p}\right)^2 = 2.51935, \quad (5)$$

где  $r'_0 = 20.5$  мм — радиус внутренней цилиндрической поверхности электрода 1. В этом случае, согласно (5),  $r_2 = 5.66$  мм. Источником электронов служила электронная пушка 10, ось которой наклонена к оси симметрии макета под углом

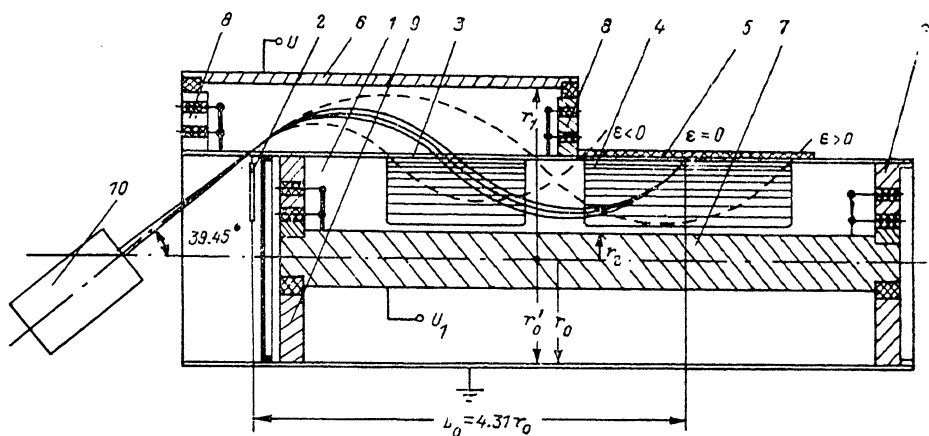


Рис. 4. Общий вид макета спектрографа.

$39.45^\circ$ . С помощью пушки формировался пучок электронов с энергией 1 КэВ, сходящийся на входной щели 2 в пределах  $\Delta\alpha = \pm 2^\circ$ . Макет спектрографа помещался в камеру вакуумной установки. При расчетном значении потенциала настройки  $u = u_1 = 641$  В на экране 5 мы наблюдали изображение входной щели 2 в форме узкой (0.7 мм) поперечной полоски, расположенной на расчетном расстоянии от входной щели  $L = 4.311 r_0 = 90.5$  мм. Визуально было установлено, что при изменении энергии пучка электронов в интервале  $1 \pm 0.2$  КэВ при неизменном потенциале настройки  $u$  изображение не испытывает заметного размытия, смещается по поверхности экрана 5 в пределах расстояния  $L = 75--105$  мм, что хорошо согласуется с данными теоретического расчета.

### Заключение

Решена задача о спрямлении линии фокусов в системе из двух последовательно соединенных электростатических цилиндрических зеркал — с внутренним и внешним отражением. В качестве критерия спрямления принято равенство нулю тангенса угла наклона касательной к линии фокусов в точке ее пересечения с осевой траекторией основного пучка. Получено уравнение, которому в соответствии с этим критерием должны удовлетворять параметры зеркал. Установлено, что спрямление линии фокусов осуществляется в системе для множества схем с кольцевым источником и изображением, в которых сохраняется хорошее качество угловой фокусировки в широком интервале энергии анализируемого пучка заряженных частиц.

Изготовлен и испытан макет спектрографа, в котором реализованы электронно-оптические параметры, обеспечивающие спрямление линии фокусов. Экспериментальные данные хорошо согласуются с данными теоретического расчета.

### Литература

- [1] Зашкеара В. В., Корсунский М. И., Космачев О. С. ЖТФ, 1966, т. 36, № 1, с. 132—138.
- [2] Wannberg B. Nucl. Instrum. and Meth., 1973, v. 107, N 5, p. 549—556.
- [3] Зашкеара В. В., Ашимбаева Б. У. Деп. в ВИНТИ, 1984, № 1622-В87. 21 с.