

УДК 537.533.34

## Энергоанализатор на основе комбинированных электростатических полей

Б. У. Ашимбаева, К. Ш. Чокин, С. Н. Асылбекова, А. О. Саулебеков

*Предложена энергоанализирующая система с высокими электронно-оптическими параметрами на основе электростатических цилиндрического и гиперболического полей. Гиперболическое поле в планарной плоскости не является однородным и имеет ярко выраженные дисперсионные свойства. Это качество комбинированного анализатора представляет интерес, так как приводит к расширению его аналитических возможностей. Новизной предлагаемого устройства является взаимное расположение известных цилиндрического и гиперболического зеркал.*

PACS: 41.85.-p

*Ключевые слова:* система, анализатор по энергии, электростатическое поле, зеркало.

### Введение

Исследования аналитических свойств комбинированных систем, построенных из электростатических зеркал различного типа, показали возможность расширения их функциональных возможностей по сравнению с одиночными зеркалами. Задача одновременной регистрации угловых и энергетических спектров в пучке заряженных частиц была решена для нескольких систем, построенных на основе комбинирования светосильных цилиндрического и сферического зеркал [1, 2]. К числу светосильных электростатических зеркал относится также гиперболическое зеркало (ГЗ), схемы фокусировки которого были рассмотрены Зашкварой В. В. и др. в [3]. Исследование комбинированной системы, одним из элементов которой является ГЗ, заслуживает внимания и представляет практический интерес, так как поле ГЗ в планарной плоскости не является однородным и может иметь ярко выраженные дисперсионные свойства.

### Энергоанализатор с улучшенными свойствами

С целью поиска энергоанализирующей системы с улучшенными электронно-оптическими

свойствами рассмотрим систему, комбинированную на основе электростатических полей цилиндрического зеркала (ЦЗ) и ГЗ. Новизной предлагаемого устройства является взаимное расположение известных ЦЗ и ГЗ, в котором пучок заряженных частиц проходит через цилиндрическое, а затем через гиперболическое поля, отражаясь от внешнего гиперболического электрода.

Схема энергоанализатора на основе комбинированных электростатических полей представлена на рисунке.

Анализатор состоит из точечного источника  $O'$ , последовательно расположенных зеркал с цилиндрическим и гиперболическим распределением полей и детектора  $O''$ . Пучок заряженных частиц выходит из точечного источника  $O'$ , расположенного на оси симметрии  $Z$ , отражается в поле зеркал и фокусируется на оси симметрии в точечное изображение  $O''$ .

Рассмотрим предварительно движение заряженной частицы в электростатическом гиперболическом поле, потенциал  $U$  которого описывается в системе координат  $r, z$  следующим выражением [3]

$$U = a \left( r^2/2 - z^2 \right). \quad (1)$$

ГЗ формируется коническими электродами, входящими под нулевым потенциалом, и электродом гиперболической формы, имеющим потенциал, одноименный заряду частиц. Пучок частиц, выходящий из точечного источника, расположенного на оси симметрии комбинированной системы, поступает в область поля через прозрачные участки конического электрода. В результате фокусирующего действия поля на пучок на выходе из него образуется кольцевое или точечное изображение на оси симметрии системы зеркал.

Ашимбаева Багила Умарбаевна, ст. научный сотрудник.

Чокин Канат Шафикович, начальник лаборатории.

Физико-технический институт.

Казахстан, г. Алматы.

Асылбекова Сауле Нурмухаммедовна, мл. науч. сотрудник.

Саулебеков Арман Ормашович, профессор.

Карагандинский государственный университет,

Казахстан, г. Караганда.

E-mail: saulebekov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25 февраля 2011 г.

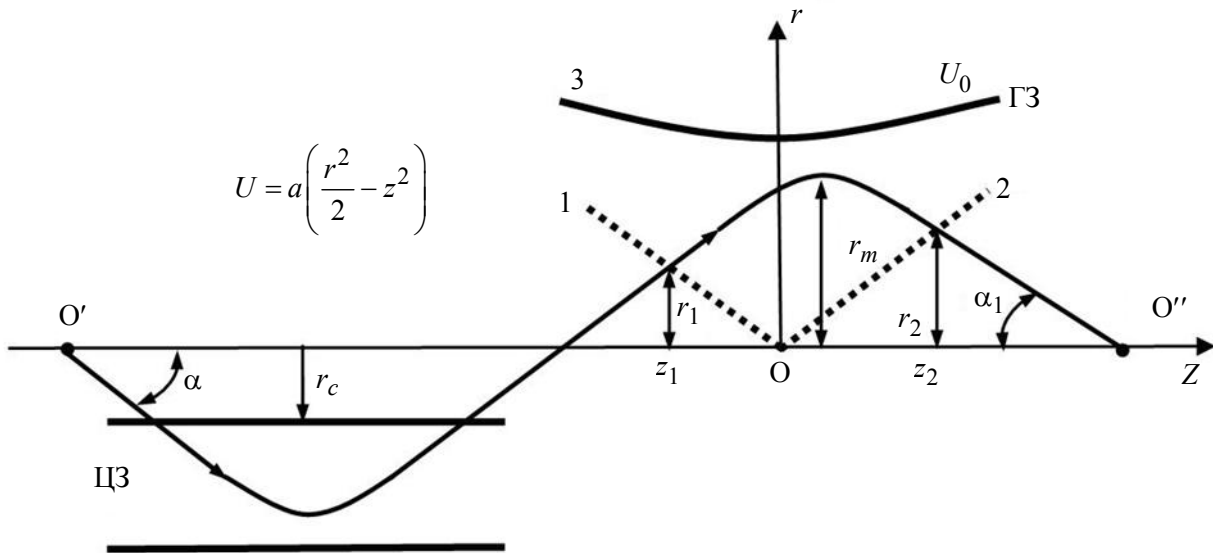


Схема зеркального анализатора:

1, 2 — конические электроды; 3 — гиперболический электрод; ЦЗ — цилиндрическое зеркало; ГЗ — гиперболическое зеркало

Форма нулевой эквипотенциальной линии, согласно уравнению (1), при  $U = 0$  определяется выражением  $r^2 = 2z^2$ . Следовательно, координаты входа и выхода траектории из гиперболического зеркала определяются как  $r_1^2 = 2z_1^2$ ,  $r_2^2 = 2z_2^2$ .

Запишем уравнения движения заряженных частиц в гиперболическом поле:

$$\left. \begin{aligned} m\dot{r} &= e \left( -\frac{\partial U}{\partial r} \right) = -eUr \\ m\dot{z} &= e \left( -\frac{\partial U}{\partial z} \right) = 2eUz \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Интегрирование системы уравнений (2) с учетом начальных условий  $\dot{r}_A = v_0 \sin \alpha$ ,  $\dot{z}_A = v_0 \cos \alpha$  приводит к дифференциальному уравнению движения частиц

$$\pm \sqrt{2} \frac{dr}{\sqrt{2S^2 - r^2 + r_1^2}} = \frac{dz}{\sqrt{S^2 \operatorname{ctg}^2(\alpha) + z^2 - z_1^2}}, \quad (3)$$

где  $S = \sqrt{\frac{W}{ea}} \sin \alpha$  — параметр отражения зеркала, связывающий его геометрические и энергетические характеристики.

Знак (+) в этом уравнении соответствует участку подъема траектории, знак (–) — участку снижения. Все продольные параметры будут выражены в единицах радиуса внутреннего цилиндрического электрода  $r_c$ . Интегрируя дифференциальное уравнение (3) в пределах от  $r_1$  до  $r_m$  на участке подъема траектории и от  $r_m$  до  $r_2$  на участке снижения, найдем уравнение плоских траекторий движения частиц в гиперболическом поле (1):

$$\begin{aligned} & \pi - \arcsin \frac{z_1}{\sqrt{z_1^2 + S^2}} - \arcsin \frac{z_2}{\sqrt{z_1^2 + S^2}} = \\ & = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ \ln(z_2 + S_1 \operatorname{ctg}(\alpha_1)) - \ln(-z_1 + S \operatorname{ctg}(\alpha)) \right], \quad (4) \end{aligned}$$

где  $S_1 = S \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha}$ ;

$\alpha_1$  — угол выхода траектории из гиперболического зеркала.

Угол  $\alpha_1$  вычисляется из следующего выражения при условии  $r^2 = r_2^2$  и  $z^2 = z_2^2$

$$\operatorname{ctg} \alpha_1 = \sqrt{\frac{S^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha + z_2^2 - z_1^2}{S^2 - z_2^2 + z_1^2}}. \quad (5)$$

Радиальная координата точки поворота траектории в поле гиперболического зеркала определяется из уравнения (3) при условии  $dr/dz = 0$ ,

$$2S^2 - r_m^2 + r_1^2 = 0, \quad r_m^2 = r_1^2 + 2S^2 = 2z_1^2 + 2S^2. \quad (6)$$

Равенство радиальных координат обеих ветвей траектории в точке поворота  $r_m = r_m^{(1)} = r_m^{(2)}$  дает дополнительную формулу для расчета характеристик правой ветви  $z_1, S_1$

$$z_2^2 + S_1^2 = z_1^2 + S^2. \quad (7)$$

Исходным для изучения характеристик комбинированной системы зеркал является уравнение полной проекции плоской траектории движения заряженных частиц от источника до его изображения на ось симметрии  $Z$ . Полная проекция траектории  $O'O''$ , согласно рисунку, есть сумма проекций. Первая часть  $l_1 = L_1/r_c$  соответствует

участку O'O и остается постоянной  $l_1 = \text{const}$ , а вторая часть соответствует участку OO"  $l_2 = L_2/r_c$

$$\left. \begin{aligned} l_1 &= l_{\text{ог}} + z_1 + r_1 \text{ctg}\alpha = l_{\text{ог}} + z_1 (1 + \sqrt{2} \text{ctg}\alpha), \\ l_2 &= z_2 + r_2 \text{ctg}\alpha_1 = z_2 (1 + \sqrt{2} \text{ctg}\alpha_1), l = l_1 + l_2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Длина проекции траектории в ЦЗ  $l_{\text{цз}} = L_{\text{цз}}/r_c$  определяется выражением

$$l_{\text{ог}} = 2 \text{ctg}\alpha_1 (1 + 2P_1\theta_1), \quad (9)$$

где  $P_1^2 = \frac{W}{qU} \sin^2 \alpha_1$ ;  $\theta_1 = e^{P_1^2} \int_0^{P_1^2} e^{-x^2} dx$  — параметры отражения ЦЗ [4].

Параметры проекции траектории в ГЗ рассчитываются из уравнений (4)—(7), из которых трансцендентное уравнение (4) решается относительно параметра  $z_2$  методом последовательных приближений варьированием величин  $\alpha, S, z_1$ .

Для анализа характеристик комбинированной системы зеркал были выполнены расчеты абберационных коэффициентов, которые определяются производными от  $l = l_1 + l_2$  по входному углу  $\alpha$  и величине относительного разброса энергий в пучке частиц  $\varepsilon = \Delta\omega/\omega$ . Поиск угловой фокусировки первого порядка сводится к определению условия  $dl_2/d\alpha = 0$ . Величина линейной дисперсии по энергии определяется производной  $l_2$  по  $\varepsilon$ .  $d\alpha_1/d\varepsilon$  — коэффициент угловой дисперсии по энергии, соответствующий величине изменения угла выхода из ГЗ в зависимости от изменения энергии частиц, определялся дифференцированием уравнения (5) по  $\varepsilon$ . Ниже приведены уравнения основных абберационных коэффициентов, определяющих электронно-оптические свойства системы зеркал:

$$\frac{dl_2}{d\alpha} = (1 + \sqrt{2} \text{ctg}\alpha) \frac{dz_2}{d\alpha} - \sqrt{2} z_1 (1 + \text{ctg}^2 \alpha) \frac{d\alpha_1}{d\alpha}; \quad (10)$$

$$\frac{dz_1}{d\alpha} = \frac{\sqrt{2} z_1 (1 + \text{ctg}^2 \alpha) - A_1}{(1 + \sqrt{2} \text{ctg}\alpha)},$$

$$\frac{d\alpha_1}{d\alpha} = 1 + \frac{z_1}{s^2 \text{ctg}\alpha} \left( \frac{dz_1}{d\alpha} + \frac{dz_2}{d\alpha} \right); \quad (11)$$

$$\begin{aligned} (1 + \sqrt{2} \text{ctg}\alpha) \frac{dz_2}{d\alpha} &= \frac{dz_1}{d\alpha} \left( \sqrt{2} \text{ctg}\alpha \frac{z_1^2 - s^2}{z_1^2 + s^2} - \frac{s^2 \text{ctg}^2 \alpha + z_1^2}{s^2 \text{ctg}^2 \alpha - z_1^2} \right) + \\ &+ 2z_1 s^2 \text{ctg}\alpha \left( \frac{\sqrt{2} \text{ctg}\alpha}{z_1^2 + s^2} + \frac{1}{s^2 \text{ctg}^2 \alpha - z_1^2} \right); \quad (12) \end{aligned}$$

$$\frac{dl_2}{d\varepsilon} = (1 + \sqrt{2} \text{ctg}\alpha) \frac{dz_2}{d\varepsilon} - \sqrt{2} z_1 (1 + \text{ctg}^2 \alpha_1) \frac{d\alpha_1}{d\varepsilon}; \quad (13)$$

$$\frac{dz_1}{d\varepsilon} = \frac{-A_2}{(1 + \sqrt{2} \text{ctg}\alpha)}; \quad \frac{d\alpha_1}{d\varepsilon} = \frac{z_1}{s^2 \text{ctg}\alpha} \left( \frac{dz_1}{d\varepsilon} + \frac{dz_2}{d\varepsilon} \right); \quad (14)$$

$$\begin{aligned} (1 + \sqrt{2} \text{ctg}\alpha) \frac{dz_2}{d\varepsilon} &= \frac{dz_1}{d\varepsilon} \left( \sqrt{2} \text{ctg}\alpha \frac{z_1^2 - s^2}{z_1^2 + s^2} - \frac{s^2 \text{ctg}^2 \alpha + z_1^2}{s^2 \text{ctg}^2 \alpha - z_1^2} \right) + \\ &+ z_1 s^2 \text{ctg}\alpha \left( \frac{\sqrt{2}}{z_1^2 + s^2} - \frac{\text{ctg}\alpha}{s^2 \text{ctg}^2 \alpha - z_1^2} \right), \quad (15) \end{aligned}$$

где  $A_1 = 4P_1^2 (1 + 2P_1\theta_1) \text{ctg}^2 \alpha_1 - 4P_1\theta_1 - 2(1 + \text{ctg}^2 \alpha_1)$ ,

$$A_2^{(1)} = 2 [P_1^2 + P^2 (1 + 2P_1\theta_1)] \text{ctg}\alpha_1 - \quad (16)$$

абберационные коэффициенты ЦЗ [4].

Результаты расчета основных электронно-оптических характеристик комбинированного зеркального анализатора, рассчитанные в условиях угловой фокусировки первого порядка  $dl_1/d\varepsilon = 0$ , представлены в таблице. Здесь даны значения:  $\alpha$  — входного угла,  $z_1$  — продольной координаты входа траектории в поле ГЗ,  $S_1$  — параметра отражения ГЗ,  $P$  — параметра отражения ЦЗ,  $r_m$  — радиального размаха траектории в полях ЦЗ и ГЗ,  $l = l_1 + l_2$  — полной проекции траектории,  $d\alpha_1/d\varepsilon$  — коэффициента угловой дисперсии по энергии,  $D$  — линейной дисперсии по энергии. Из анализа проведенных расчетов установлено, что в анализаторе, комбинированном из двух светосильных цилиндрического и гиперболического зеркал, осуществляется режим угловой фокусировки первого порядка в широком интервале значений параметров  $\alpha, P, S$ .

Отличительной особенностью данной системы зеркал является наличие значительных по абсолютной величине коэффициентов угловой дисперсии по энергии  $d\alpha_1/d\varepsilon$  и линейной дисперсии по энергии  $D$ . Это качество комбинированного анализатора представляет интерес, так как приводит к расширению аналитических возможностей анализатора.

Линейная дисперсия комбинированной системы зеркал для многих приведенных схем на порядок больше линейной дисперсии одиночного электронного зеркала, к примеру, линейная дисперсия для ЦЗ составляет 5,6 [4]. Большая величина линейной дисперсии по энергии в условиях угловой фокусировки первого порядка позволяет использовать комбинированную систему зеркал в качестве энергоанализатора с высокой разрешающей способностью.

## Электронно-оптические параметры комбинированного анализатора

$\alpha$ (град)	$Z_1$	$S_1$	$P$	$r_m$ (в ЦЗ)	$r_m$ (в ГЗ)	$l=l_1+l_2$	$\frac{d\alpha_1}{d\varepsilon}$	$D = \frac{dl_2}{d\varepsilon}$	
35	,30	,2704	,7273	1,697	,571	9,019	-14,330	27,553	
	,40	,3605	,7404	1,730	,762	9,844	-11,696	30,143	
	,50	,4507	,7527	1,762	,952	10,664	-10,111	32,721	
	,60	,5408	,7643	1,794	1,142	11,478	-9,051	35,283	
	,70	,6309	,7753	1,824	1,333	12,289	-8,291	37,833	
	,80	,7211	,7856	1,854	1,523	13,095	-7,718	40,368	
	,90	,8112	,7955	1,883	1,714	13,898	-7,270	42,894	
	1,00	,9013	,8048	1,911	1,904	14,697	-6,911	45,410	
	40	,30	,3099	,7882	1,861	,610	8,551	-19,579	33,574
		,40	,4132	,8023	1,904	,813	9,329	-15,912	36,500
,50		,5165	,8154	1,944	1,017	10,100	-13,702	39,400	
,60		,6198	,8277	1,984	1,220	10,866	-12,221	42,275	
,70		,7231	,8392	2,022	1,423	11,626	-11,159	45,130	
,80		,8264	,8501	2,060	1,627	12,382	-10,359	47,970	
,90		,9297	,8604	2,097	1,830	13,133	-9,731	50,783	
1,00		1,0330	,8702	2,132	2,033	13,880	-9,228	53,592	
45		,30	,3559	,8659	2,117	,658	9,279	-28,481	45,376
		,40	,4746	,8805	2,171	,878	9,265	-23,047	49,049
	,50	,5932	,8940	2,224	1,097	10,748	-19,771	52,683	
	,60	,7118	,9067	2,275	1,317	11,480	-17,572	56,268	
	,70	,8305	,9184	2,325	1,536	12,206	-15,992	59,822	
	,80	,9491	,9295	2,373	1,755	12,927	-14,800	63,341	
	0,90	1,0678	,9400	2,420	1,975	13,643	-13,867	66,834	
	1,00	1,1864	,9499	2,465	2,194	9,279	-13,115	70,303	

Абсолютная величина угловой дисперсии по энергии для большинства схем энергоанализа велика и находится в пределах значений 10,0—20,0, что соответствует изменению выходного угла на величину 5—12° при изменении энергии частиц на 1 %. Это свойство позволяет использовать комбинированную систему при небольшой угловой расходимости пучка в аксиальной плоскости в качестве энергоанализатора для одновременной регистрации конечного интервала энергий с помощью координатного детектора. Располагая координатный детектор за фокусом в перпендикулярной оси симметрии плоскости, согласно работе [5], можно одновременно регистрировать как энергетическое, так и угловое распределение заряженных частиц в пучке.

### Заключение

Рассчитаны схемы комбинированного энергоанализатора, в которых реализуется угловая фокусировка первого порядка расходящихся пучков

заряженных частиц. Установлено, что в этом режиме комбинированная система зеркал характеризуется наличием значительных по абсолютной величине коэффициентов угловой и линейной дисперсий по энергии. Предложена возможность расширения аналитических функций энергоанализатора на основе комбинированных электростатических полей путем одновременной регистрации углового и энергетического распределения заряженных частиц в пучке.

### Литература

1. Зашквара В. В., Юрчак Л. С., Былинкин А. Ф. // ЖТФ. 1988. Т. 58. № 10. С. 2010—2020.
2. Зашквара В. В., Саулебеков А. О. и др. // Там же. 1992. Т. 62. № 6. С. 189—204.
3. Зашквара В. В., Ильин А. М., Крючков В. Ф. // Там же. 1976. Т. 46. № 5. С. 1572—1574.
4. Зашквара В. В., Корсунский М. И., Космачев О. С. // Там же. 1966. Т. 36. № 1. С. 132—138.
5. Zashkvara V. V., Ashimbaeva B. U. // Nuclear Instrum. and Meth. 1994. A340. P. 514—523.

## Energy analyzer on basis of combination of electrostatic fields

*B. U. Ashimbaeva, K. Sh. Chokin*

Institute of Physics and Technology, Almaty, Kazakhstan

*S. N. Asylbekova, A. O. Saulebekov*

Karaganda State University, Karaganda, Kazakhstan

*The energy analyzed system with high electron-optical parameters based on electrostatic cylindrical and hyperbolic fields is offered. The hyperbolic field in a planar plane is not homogeneous and has strongly distinctive dispersive properties. This quality of the combined analyzer is of interest, as it leads to expansion of analytical possibilities of the analyzer. Novelty of the offered device is the relative arrangement of known cylindrical and hyperbolic mirrors.*

PACS: 41.85.-p

*Keywords:* system, energy analyzer, electrostatic field, mirror.

Bibliography — 5 references.

*Received February 25, 2011*

\* \* \*