

Электронные и ионные пучки

УДК 537.533.34

Моделирование электростатической системы из цилиндрического и гиперболического зеркал

Б. У. Ашимбаева, К. Ш. Чокин, А. О. Саулебеков, Ж. Т. Камбарова

Проведен расчет комбинированного энергоанализатора потоков заряженных частиц на основе электростатических цилиндрического и гиперболического полей посредством аналитических формул и программы "Фокус" моделирования аксиально-симметричных систем корпускулярной оптики. Гиперболическое поле (ГП) в планарной плоскости не является однородным и имеет ярко выраженные дисперсионные свойства. Это качество комбинированного анализатора представляет интерес, так как приводит к расширению аналитических возможностей анализатора.

PACS: 29.30.Dn

Ключевые слова: комбинированный энергоанализатор, цилиндрическое поле, гиперболическое поле, дисперсия, аппаратная функция.

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 В. В. Зашкварой и др. в [3].

Исследование комбинированной системы, одним из элементов которой является ГЗ, заслужи-

вает внимания и представляет практический интерес, так как поле ГЗ в планарной плоскости не является однородным и может иметь ярко выраженные дисперсионные свойства. Именно это направление исследования стало целью данной статьи.

Оптимизация комбинированной системы

Для поиска энергоанализирующей системы с улучшенными электронно-оптическими свойствами рассмотрена система, комбинированная на основе электростатических полей цилиндрического зеркала (ЦЗ) и ГЗ. Новизной предлагаемого устройства является взаимное расположение известных ЦЗ и ГЗ. Пучок заряженных частиц проходит через цилиндрическое поле, а затем через гиперболическое, отражаясь от внешнего гиперболического электрода.

Схема энергоанализатора на основе комбинированных электростатических полей представлена на рис. 1. 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'' .

Ашимбаева Багила Умарбаевна, старший научный сотрудник.

Чокин Канат Шафикович, главный научный сотрудник. Физико-технический институт.

Казахстан, 480082, г. Алматы, ул. Ибрагимова, 11.

Тел. 8 (727) 226-25-09. E-mail: kanat@hotbox.ru

Саулебеков Арман Ормашович, декан.

Камбарова Жанар Турсьновна, докторант PhD.

Карагандинский государственный университет.

Казахстан, 100028, г. Караганда, ул. Университетская, 28.

Тел. 8 (7212) 77-04-03. E-mail: kambarova@bk.ru

Статья поступила в редакцию 22 сентября 2011 г.

© Ашимбаева Б. У., Чокин К. Ш., Саулебеков А. О., Камбарова Ж. Т., 2012

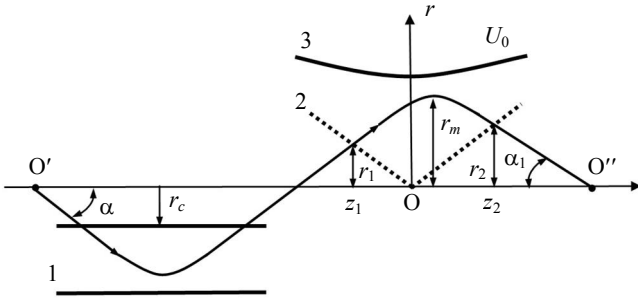


Рис. 1. Схема зеркального анализатора:

1 — цилиндрическое зеркало; 2 — конические электроды; 3 — гиперболический электрод

Траекторный анализ

Рассмотрим предварительно движение заряженной частицы в электростатическом ГП, потенциал которого описывается в системе координат \mathbf{r} , \mathbf{z} следующим выражением [3]

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

Гиперболическое зеркало формируется коническим электродом, находящимся под нулевым потенциалом, и электродом гиперболической формы с одноименным заряду частиц потенциалом. Форма нулевой эквипотенциальной линии, согласно уравнению (1), при $U = 0$ определяется выражением $r^2 = 2z^2$. Следовательно, координаты входа и выхода траектории из ГЗ определяются как $r_1^2 = 2z_1^2$, $r_2^2 = 2z_2^2$.

Запишем уравнения движения заряженных частиц в ГП

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

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 па-

раметры 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 ГП (1)

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

где $S_1 = S \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha}$, α_1 — угол выхода траектории из ГЗ.

Угол α_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 ГЗ определяется из уравнения (3) при условии $\frac{dr}{dz} = 0$

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

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_2, 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 рис. 1, есть сумма проекций. Первая часть $l_1 = L_1/r_c$ соответствует участку $O'O$ и остается постоянной $l_1 = \operatorname{const}$, а вторая часть $l_2 = L_2/r_c$ соответствует участку OO'' .

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

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

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

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 α , S , z_1 .

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

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

$$\frac{dz_1}{d\alpha} = \frac{\sqrt{2}z_1(1 + \text{ctg}^2\alpha) - A_1}{(1 + \sqrt{2}\text{ctg}\alpha)}, \quad (11)$$

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

$$\begin{aligned} (1 + \sqrt{2}\text{ctg}\alpha) \frac{dz_2}{d\alpha} = \\ = \frac{dz_1}{d\alpha} \left(\sqrt{2}\text{ctg}\alpha \frac{z_1^2 - s^2}{z_1^2 + s^2} - \frac{s^2\text{ctg}^2\alpha + z_1^2}{s^2\text{ctg}^2\alpha - z_1^2} \right) + \\ + 2z_1s^2\text{ctg}\alpha \left(\frac{\sqrt{2}\text{ctg}\alpha}{z_1^2 + s^2} + \frac{1}{s^2\text{ctg}^2\alpha - z_1^2} \right); \end{aligned} \quad (12)$$

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

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

$$\begin{aligned} (1 + \sqrt{2}\text{ctg}\alpha) \frac{dz_2}{d\varepsilon} = \\ = \frac{dz_1}{d\varepsilon} \left(\sqrt{2}\text{ctg}\alpha \frac{z_1^2 - s^2}{z_1^2 + s^2} - \frac{s^2\text{ctg}^2\alpha + z_1^2}{s^2\text{ctg}^2\alpha - z_1^2} \right) + \\ + z_1s^2\text{ctg}\alpha \left(\frac{\sqrt{2}}{z_1^2 + s^2} - \frac{\text{ctg}\alpha}{s^2\text{ctg}^2\alpha - z_1^2} \right), \end{aligned} \quad (15)$$

где

$$A_1 = 4P_1^2(1 + 2P_1\theta_1)\text{ctg}^2\alpha_1 - 4P_1\theta_1 - 2(1 + \text{ctg}^2\alpha_1), \quad (16)$$

$A_2 = 2[P_1^2 + P^2(1 + 2P_1\theta_1)]\text{ctg}\alpha_1$ — абберационные коэффициенты ЦЗ [4].

Результаты расчета основных электронно-оптических характеристик комбинированного зеркального анализатора, рассчитанные в условиях угловой фокусировки первого порядка, представлены в таблице.

Из анализа проведенных расчетов установлено, что в анализаторе, скомбинированном из двух светосильных цилиндрического и гиперболического зеркал, осуществляется режим угловой фокусировки первого порядка в широком интервале значений параметров α , P , S . Отличительной особенностью данной системы зеркал является наличие значительных по абсолютной величине коэффициентов угловой и линейной дисперсии по энергии. 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. Например, 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.

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.

Сопоставление аналитического и компьютерного анализа

Для подтверждения достоверности расчетов по аналитическим формулам далее проведен анализ электронно-оптической схемы комбинированного анализатора с помощью программы "Фокус" моделирования аксиально-симметричных систем корпускулярной оптики с произвольной геометрией

трода и внешнего электрода цилиндрического зеркала равны 1. Асимптоты гиперболического электрода имеют угол $\beta = \arctg \sqrt{2} = 54,4^\circ$.

На рис. 2 представлен ход траекторий заряженных частиц. Образец расположен на оси симметрии конструкции. Из него в интервале полярных углов от 35 до 39° вылетают частицы и под действием потенциалов на электродах направляются на

Электронно-оптические параметры комбинированного анализатора

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

Примечание. α — входной угол; z_1 — продольная координата входа траектории в поле ГЗ; S_1 — параметр отражения ГЗ; P — параметр отражения ЦЗ; r_m — радиальный размах траектории в полях ЦЗ и ГЗ; $l = l_1 + l_2$ — полная проекция траектории; $\frac{d\alpha_1}{d\varepsilon}$ — коэффициент угловой дисперсии по энергии; D — линейная дисперсия по энергии.

электродов [6]. Программа позволяет в графическом режиме осуществить ввод и модификацию конструкции, вычислить распределение потенциала в выделенной области и провести траекторный анализ системы.

На рис. 2 представлено продольное сечение конструкции комбинированного анализатора. Общая протяженность системы — 9,8. Радиусы внутреннего и внешнего электродов ЦЗ, соответственно, равны 1 и 2,5. Внутренний электрод ЦЗ и конические электроды находятся под нулевым потенциалом. Потенциалы гиперболического элект-

выходную диафрагму. Энергия заряженных частиц, точнее, отношение энергии заряженной частицы к потенциалу электрода $E/V = 1,3$. При расчетах шаг изменения угла был равен $0,5^\circ$. В системе выполняется угловая фокусировка первого порядка "ось—кольцо".

Изображение имеет большой радиус и предопределяет большие размеры коллектора. Это положительно сказывается на его времени срабатывания и предопределяет практически отсутствие "мертвого" времени.

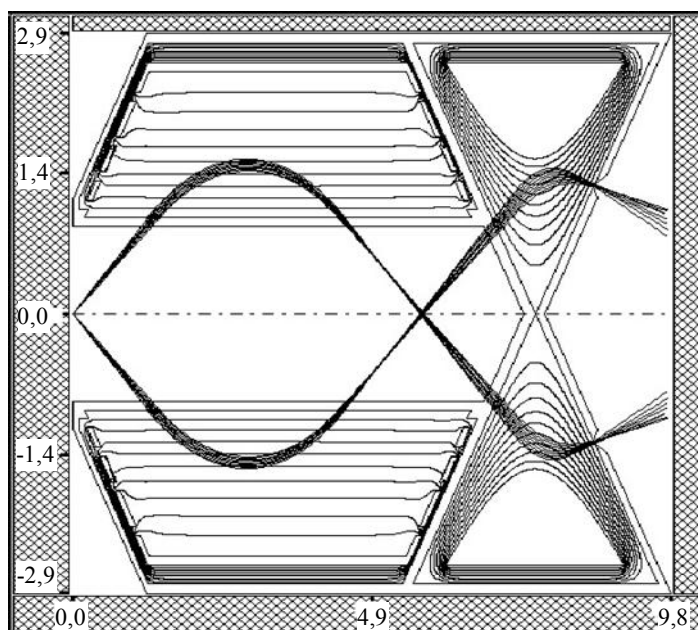


Рис. 2. Продольное сечение конструкции комбинированного анализатора и траектории движения частиц в нем

Для расчета аппаратной функции комбинированной системы запускаются частицы из точечного источника в диапазоне начальных углов $37,5 \pm 2,5^\circ$ и в диапазоне энергий 1,27—1,3. На рис. 3 представлена аппаратная функция комбинированной системы. Относительное энергетическое разрешение на полувысоте инструментальной функции анализатора с радиусом выходной диафрагмы $0,036R_{in}$ составляет 2,9 % при светосиле $\Omega/2\pi = 5,31$ %.

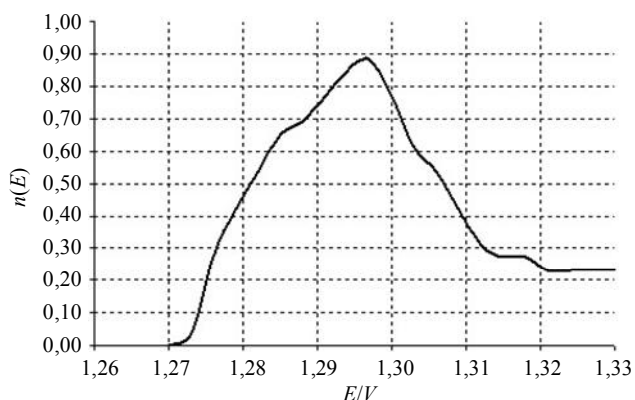


Рис. 3. Аппаратная функция $n(E) = f(E/V)$ комбинированной системы

Заключение

В работе рассчитаны схемы комбинированного энергоанализатора на основе цилиндрического и гиперболического зеркал, 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. Рассмотрена возможность расширения аналитических функций предлагаемого энергоанализатора 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.
2. Зашквара В. В., Саулебеков А. О. и др. // Там же. 1992. Т. 62. № 6. С. 189.
3. Зашквара В. В., Ильин А. М., Крючков В. Ф. // Там же. 1976. Т. 46. № 5. С. 1572.
4. Зашквара В. В., Корсунский М. И., Космачев О. С. // Там же. 1966. Т. 36. № 1. С. 132.
5. Zashkvara V. V., Ashimbaeva B. U. // Nuclear Instrum. and Meth. 1994. V. A340. P. 514.
6. Trubitsyn A. A. // Charged Particle Optics: 8th Intern. Conf. Handbook. Singapore. 2010. P. 208.

Modeling of the electrostatic system of cylindrical and hyperbolic mirrors

B. U. Ashimbaeva, K. Sh. Chokin

Institute of Physics and Technology
2 Ibragimov str., Almaty, 480082, Kazakhstan
E-mail: bagilya@satsun.sci.kz

A. O. Saulebekov, Zh. T. Kambarova

Karaganda State University
28 Universitetskaya str., Karaganda, 100028, Kazakhstan
E-mail: saulebekov@mail.ru

Calculation of the charged particles fluxes has been carried out for the combined energy analyzer based on electrostatic cylindrical and hyperbolic fields. It is made by means of analytic formulas and the program "Focus" for simulation axial-symmetric systems of the corpuscular optics. A hyperbolic plane in the planar field is not homogeneous and has strong dispersive properties. This quality of the combined analyzer is of interest because it leads to the expansion of analytical capabilities of the analyzer.

PACS: 29.30.Dn

Keywords: combined energy analyzer, cylindrical field, hyperbolic field, dispersion, instrumental function.

Bibliography — 6 references.

Received September 22, 2011

* * *