

Для анализа характеристик электростатического гексапольно-цилиндрического энергоанализатора были рассчитаны коэффициенты пространственной фокусировки 1, 2 и 3-го порядков $A_I = \frac{dl}{d\alpha}$,

$$A_{II} = \frac{1}{2!} \frac{d^2 l}{d\alpha^2}, \quad A_{III} = \frac{1}{3!} \frac{d^3 l}{d\alpha^3}. \quad \text{Найдены условия}$$

угловой фокусировки второго порядка

$$\frac{dl}{d\alpha} = \frac{d^2 l}{d\alpha^2} = 0.$$

Рассчитанные основные электронно-оптические характеристики анализатора в зависимости от параметра отражения $P = \sqrt{mV_0^2/2qU_0} \sin\alpha_0$ (m , V_0 и q — масса, скорость и заряд частиц) и угла входа траектории α_0 при условии угловой фокусировки вто-

рого порядка приведены в таблице. Это следующие параметры: $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$ (см. рис. 1); ρ_m — координата точки поворота траектории; ξ_m — половинная проекция траектории на ось симметрии в поле зеркала; l — фокусное расстояние, равное полной проекции траектории на ось симметрии зеркала от источника до его изображения, удовлетворяющее условиям фокусировки; $D = \frac{\partial l}{\partial \varepsilon}$ —

относительная линейная дисперсия по энергии, определяемая дифференцированием полной проекции траектории на ось симметрии от источника до его изображения по величине энергетического разброса в пучке частиц $\varepsilon = \frac{\Delta\omega}{\omega}$; $A_{III} = \frac{1}{3!} \frac{d^3 l}{d\alpha^3}$ — коэффициент кубической угловой аберрации.

Электронно-оптические характеристики ГЦП-анализатора

P	α_0 , град	ρ_m	Δ	ξ_m	l	D	A_{III}
,1000	30,3300	,0100	,0101	,0344	,1032	,0693	-,3114
,1200	30,4780	,0145	,0145	,0494	,1481	,0997	-,4426
,1400	30,6510	,0198	,0198	,0670	,2009	,1356	-,5932
,1600	30,8520	,0259	,0260	,0871	,2611	,1769	-,7604
,1800	31,0790	,0328	,0330	,1097	,3287	,2235	-,9417
,2000	31,3342	,0406	,0408	,1347	,4033	,2752	-1,1334
,2200	31,6161	,0493	,0495	,1619	,4845	,3320	-1,3320
,2400	31,9253	,0588	,0590	,1913	,5720	,3936	-1,5331
,2600	32,2613	,0691	,0694	,2227	,6651	,4596	-1,7324
,2800	32,6238	,0803	,0805	,2560	,7636	,5298	-1,9254
,3000	33,0120	,0922	,0924	,2911	,8667	,6037	-2,1075
,3200	33,4251	,1050	,1050	,3278	,9740	,6809	-2,2744
,3400	33,8615	,1185	,1184	,3660	1,0848	,7609	-2,4222
,3600	34,3192	,1328	,1323	,4055	1,1987	,8431	-2,5475
,3800	34,7954	,1477	,1468	,4463	1,3151	,9272	-2,6471
,4000	35,2868	,1633	,1618	,4882	1,4337	1,0125	-2,7177
,4200	35,7893	,1795	,1773	,5311	1,5541	1,0987	-2,7551
,4400	36,2988	,1963	,1932	,5750	1,6761	1,1852	-2,7533
,4600	36,8114	,2136	,2094	,6199	1,7994	1,2720	-2,7026
,4800	37,3254	,2312	,2259	,6656	1,9237	1,3588	-2,5876
,5000	37,8455	,2493	,2425	,7120	2,0482	1,4457	-2,3843
,5200	38,3918	,2679	,2588	,7586	2,1704	1,5330	-2,0545
,5400	39,0245	,2869	,2741	,8038	2,2841	1,6199	-1,5385
,5600	39,9046	,3066	,2861	,8439	2,3721	1,7016	-,7604
,5754	40,9766	,3225	,2899	,8657	2,3991	1,7516	,0000
,5800	41,3980	,3274	,2896	,8698	2,3965	1,7626	,2201
,6000	43,7420	,3498	,2811	,8763	2,3401	1,7967	,7340
,6200	46,0910	,3722	,2736	,8840	2,2948	1,8435	,2135
,6242	46,5065	,3766	,2734	,8873	2,2934	1,8568	0,0000
,6400	47,8170	,3922	,2779	,9063	2,3162	1,9178	-1,0781
,6600	48,7420	,4071	,2978	,9468	2,4161	2,0175	-3,0426
,6800	47,9590	,4121	,3473	1,0273	2,6809	2,2024	-6,9744
,7000	45,0826	,4263	,4703	1,1806	3,2990	2,9194	-26,4767
,7045	44,8600	,4321	,5000	1,2080	3,4207	3,1015	-33,1633
,7200	44,4548	,4543	,6199	1,2991	3,8617	3,7915	-65,2819

Анализ данных таблицы показывает, что в предложенном зеркальном энергоанализаторе в широком интервале значений параметров P и α_0 осуществляется режим угловой фокусировки второго порядка. При этом источник и его изображение находятся в области внутреннего цилиндрического электрода, т. е. условие угловой фокусировки реализуется только для схем фокусировки заряженных частиц из кольцевого источника в кольцевой детектор ($\Delta_1 + \Delta_2 < 1$). Единственная схема гексапольно-цилиндрического анализатора, фокусирующего по схеме "кольцо—ось", с параметрами $P = 0,7045$, $\alpha_0 = 44,8600^\circ$, $\Delta_1 + \Delta_2 = 1$ не представляет практического интереса. Для нее коэффициент кубической угловой aberrации, соответствующий aberrации прибора, довольно велик $A_{III} \sim 33,16$.

Наиболее оптимальные по электронно-оптическим характеристикам зеркальные анализаторы с ГЦП реализуются в области значений $0,52 < P < 64$, для которых aberrационные коэффициенты третьего порядка невелики. Определены две схемы с параметрами $P = 0,5754$, $\alpha_0 = 40,9766^\circ$ и $P = 0,6242$, $\alpha_0 = 46,5065^\circ$, обеспечивающие режим угловой фокусировки третьего порядка

$$\frac{dl}{d\alpha} = \frac{d^2l}{d\alpha^2} = \frac{d^3l}{d\alpha^3} = 0. \text{ Однако наибольший интерес}$$

представляет электронно-оптическая схема гексапольно-цилиндрического анализатора, соответствующая следующим параметрам: $P = 0,60$, $\alpha_0 = 43,7420^\circ$, $D = 1,7967$, $A_{III} = 0,7340$. Кубическая aberrация A_{III} в этой схеме не равна нулю, но она мала и в то же время имеет максимальную величину в области значений параметра отражения $0,52 < P < 64$. Это значит, что коэффициент пространственной aberrации следующего порядка A_{IV} в этой точке равен нулю. Все это позволяет сделать вывод о том, что угловая фокусировка анализатора близка к идеальной. Угол входа в поле зеркала осевой траектории равен $\alpha_0 = 43,7420^\circ$, начальный угловой разброс для боковых ветвей траектории составляет 16° ($\Delta\alpha = \pm 8^\circ$).

Размытие изображения в фокусе зеркального энергоанализатора, вызванное угловой расходимостью пучка в аксиальной плоскости в 16° , определяется кубической угловой aberrацией $\Delta l = A_{III}(\Delta\alpha)^3$ [3] и $\Delta l = 0,004$.

Это значит, что энергоанализатор с ГЦП способен обеспечить острую фокусировку заряженных частиц с большим угловым разбросом в аксиальной плоскости. Для сравнения, ширина линии изображения пучка частиц с таким же угловым разбросом в ЦЗА, примерно, в 20 раз больше и равна $\Delta l = 0,084$.

Если кольцевые щели А и Б узкие, а угловая расходимость пучка велика, то мерой разрешаю-

щей способности анализатора может служить величина удельной дисперсии по энергии. Она равна отношению линейной дисперсии по энергии к ширине линии изображения в фокусе зеркала

$$\delta = \frac{D}{\Delta l} = \frac{D}{A_{III} (\Delta\alpha)^3}. \quad (2)$$

Величина удельной дисперсии по энергии гексапольно-цилиндрического анализатора для частиц с начальным угловым разбросом в 16° равна $\delta = 449,68$. Это примерно в 7 раз превышает удельную дисперсию ЦЗА.

Программа моделирования "Фокус"

Для подтверждения достоверности расчетов траекторий заряженных частиц приближенно-аналитическим методом проведен анализ электронно-оптической схемы гексапольно-цилиндрического анализатора с помощью программы "Фокус" моделирования аксиально-симметричных систем корпускулярной оптики с произвольной геометрией электродов [4].

На рис. 2 представлено продольное сечение конструкции. Общая протяженность электронно-оптической системы — 11,4 усл. ед. Потенциал внешнего электрода с криволинейным профилем равен 1. Внутренний цилиндрический электрод находится под нулевым потенциалом.

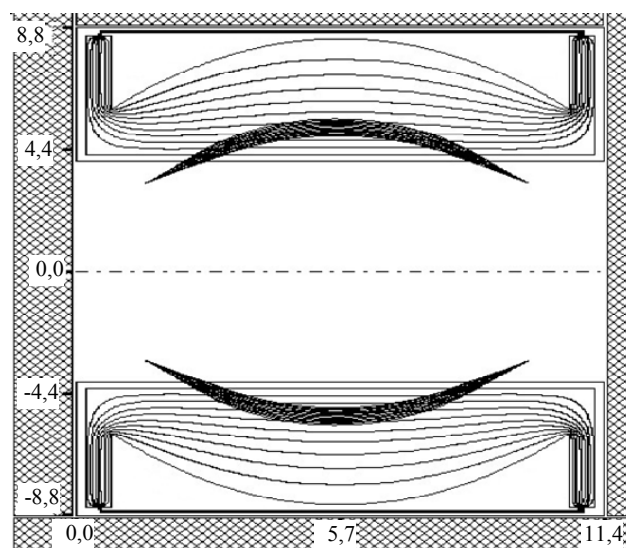


Рис. 2. Траектории движения частиц в ГЦП энергоанализаторе. Все размеры в усл. ед.

Рис. 2 представляет ход траекторий заряженных частиц в предлагаемой электронно-оптической системе. Точечный источник и его изображение находятся в области внутреннего цилиндрического электрода. Из точечного источника в интервале полярных углов от 31 до 44° вылетают частицы и под действием внешнего электрода на-

правляются на детектор. В системе выполняется фокусировка "кольцо—кольцо". Отношение энергии заряженной частицы к потенциалу электрода $E/V = 1$, положение источника — $x = 1,6$; $y = 3,2$, шаг изменения угла равен 1° .

Из расчетов фокусирующих свойств установлено, что в данной электронно-оптической схеме для широкого интервала изменения входных углов ($31\text{—}44^\circ$) реализуется режим угловой фокусировки второго порядка с центральным углом $37,3^\circ$.

Для данной системы определены две схемы, обеспечивающие режим угловой фокусировки третьего порядка. В интервале входных углов $39\text{—}42^\circ$ с центральным углом фокусировки, равным $40,95^\circ$, и в интервале входных углов $45\text{—}48^\circ$ с центральным углом фокусировки — $46,55^\circ$.

Для расчета аппаратной функции электронно-оптической схемы запускаются частицы из точечного источника в диапазоне начальных углов $31\text{—}44^\circ$ и в диапазоне энергий $0,99\text{—}1,01$. Шаг изменения угла при расчете аппаратной функции равен $0,5^\circ$. На рис. 3 представлена аппаратная функция электронно-оптической схемы ГЦП-анализатора.

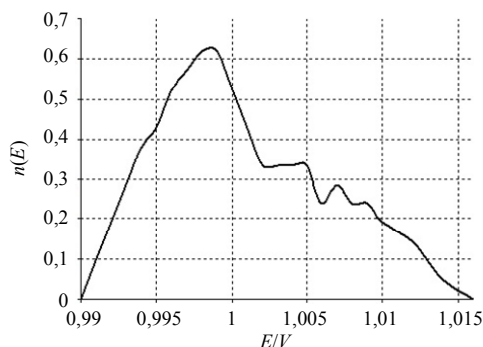


Рис. 3. Аппаратная функция ГЦП-анализатора.
Все величины в отн. ед.

Относительное энергетическое разрешение на полувысоте аппаратной функции анализатора с радиусом выходной диафрагмы $0,012R_{in}$ составляет $1,1\%$ при светосиле $\Omega/2\pi = 0,1$.

Заключение

Рассчитаны электронно-оптические параметры зеркального энергоанализатора на основе электростатического гексапольно-цилиндрического поля. Установлено, что на основе этого поля могут быть построены светосильные энергоанализаторы с угловой фокусировкой 2-го и 3-го порядков, если источник и его изображение находятся в области внутреннего цилиндрического электрода. Определены электронно-оптические характеристики гексапольно-цилиндрического зеркального анализатора с угловой фокусировкой, близкой к идеальной, обеспечивающей режим работы в условиях высокой разрешающей способности и большой светосилы.

Литература

1. Zashkvara V. V., Tyndyk N. N. // Nucl. Instrum. and Meth. 1996. V. A370. P. 452.
2. Ashimbaeva B. U., Chokin K. Sh., Saulebekov A. O. // J. of Electron Spectr. and Rel. Phen. 2005. V. 143. P. 29.
3. Зашквара В. В., Редькин В. С. // ЖТФ 1969. № 39. С. 1452.
4. Trubitsyn A. A. // Charged Particle Optics: 8th Intern. conf. handbook. Singapore. 2010. P. 208.

Modeling of electron-optical scheme of hexapole-cylindrical analyzer

B. U. Ashimbaeva, K. Sh. Chokin

Institute of Physics and Technology.

2 Ibragimov str., Almaty, 480082, Kazakhstan

E-mail: bagilya@satsun.sci.kz, kanat@hotmail.ru

A. O. Saulebekov, Zh. T. Kambarova

Karaganda State University.

28 Universitetskaya, Karaganda, 100028, Kazakhstan

E-mail: saulebekov@mail.ru, kambarova@bk.ru

In the article the calculation of the electrostatic energy analyzer of the charged particles beams with help of the approximate analytical method for calculating trajectories and by the numerical program "Focus" modeling axially symmetric electron-optical schemes with an arbitrary configuration of electrodes has been presented. The energy analyzer with hexapole-cylindrical field has been considered.

PACS: 29.30.Dn

Keywords: hexapole-cylindrical energy analyzer, cylindrical field, instrumental function.

Bibliography — 4 references.

Received September 22, 2011