

# АСПАПТАР ЖӘНЕ ЭКСПЕРИМЕНТ ТЕХНИКАЛАРЫ ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 537.533.34

## Компьютерное моделирование электростатического гексапольно-цилиндрического зеркального энергоанализатора

### Computer modeling of the electrostatic hexapole-cylindrical mirror energy analyzer

Саулебеков А.О.<sup>1</sup>, Трубицын А.А.<sup>2</sup>, Камбарова Ж.Т.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова (E-mail: saulebekov@mail.ru, kambarova@bk.ru);

<sup>2</sup>Рязанский государственный радиотехнический университет, Россия (E-mail: assur@bk.ru)

Сыртқы электроды қисықсызықты пішінге ие болатын электростатикалық гексапольді-цилиндрлік айналық энергоанализатордың электронды-оптикалық сұлбасының компьютерлік моделі өңделген. Ұсынылған сұлбада зарядталған бөлшектердің траекторияларының талдауы жүргізілген. «Сақина-сақина», «ось-сақина» типтері бойынша екінші ретті бұрыштық тоғыстау режимдері үшін энергоанализатордың электронды-оптикалық параметрлері сандық түрде есептелінген. Зарядталған бөлшектер шоқтың тоғыстауының қарастырылған режимдері үшін салыстырмалы энергиялық ажырату, жарық күші мен аппараттық функция анықталған. Энергоанализатордың электронды-оптикалық сұлбасын есептеу электродтардың кез келген пішініне ие болатын аксиалды-симметриялық жүйелерді модельдеудің «Фокус» бағдарламасы көмегімен жүргізілген.

The computer model of the electron-optical scheme of the electrostatic hexapole-cylindrical mirror energy analyzer with a curved profile of the outer electrode was developed. The trajectory analysis of the motion of charged particles in these electron-optical schemes has been given. The electron-optical parameters of the energy analyzer in the regimes of second-order angular focusing on a type of «ring-ring» and «axis-ring» are numerically calculated. The relative energy resolution, luminosity and instrumental function for the considered regimes of a beam of charged particles focusing were calculated. Calculation of electron-optical scheme of the energy analyzer with the program «Focus» through modeling of axial-symmetrical systems of corpuscular optics with arbitrary geometry of electrodes has been done.

Спектроскопия потоков заряженных частиц играет важную роль в физических исследованиях и контроле технологических процессов ряда современных производств. Энергетический анализ осуществляется спектрометрами, пространственно разделяющими пучки заряженных частиц по энергии и фокусирующими на приемные устройства доли выделенных потоков. В связи с интенсивным развитием методов электронной спектроскопии возникла необходимость дальнейшего улучшения корпускулярно-оптических характеристик и расширения функциональных возможностей спектрометров. Возросшие требования к уровню эксперимента диктуют необходимость повышения требований к чувствительности и разрешающей способности обеспечивающего его оборудования, усложнения геометрии электродов, необходимости одновременного применения нескольких методов исследования, сокращения времени эксперимента, тем более все это подкреплено возросшими технологическими возможностями. В настоящее время в аналитическом приборостроении принята ориентация на зеркальную осесимметричную оптику. Такой выбор обусловлен тем, что в условиях высокой светосилы энергоанализаторы зеркального типа позволили получить высокие характеристики разрешения и чувствительности.

Возникает вопрос о дальнейших путях развития аналитического приборостроения, в том числе о расчете электростатических зеркальных анализаторов, более эффективных по сравнению с уже известными. Поэтому энергоанализ потоков заряженных частиц, как эффективный метод исследования

поверхности твердых тел, требует дальнейшей модернизации существующих или создания качественно новых анализирующих систем на основе дальнейшего развития теории.

Ранее, в работах [1–3], был предложен новый класс осесимметричных лапласовых полей, построенных на основе синтеза мультиполей и цилиндрического поля и представляющих практический интерес для решения задачи энергоанализа пучков заряженных частиц. Интерес представляет суперпозиция цилиндрического поля  $U_c = \ln r$  и кругового гексаполя. При сложении полей центральная окружность мультиполя совмещается с нулевой эквипотенциалью логарифмического поля.

Потенциал в гексапольно-цилиндрическом поле описывается в системе координат  $r, z$  следующим выражением [4]:

$$U(r, z) = \mu \ln r + \gamma U_h(r, z), \quad (1)$$

где

$$U_h(r, z) = \frac{1}{2} \left\{ \ln r \left[ z^2 - \frac{1}{2} r^2 - \frac{1}{2} \right] + \frac{1}{2} r^2 - \frac{1}{2} \right\} - \quad (2)$$

круговой гексаполь;  $\mu$  — коэффициент, задающий весовой вклад цилиндрического поля  $\ln r$ ;  $\gamma$  — весовая составляющая кругового гексаполя. Как следует из уравнения (1), можно варьированием коэффициентов  $\mu$  и  $\gamma$  получить неограниченное количество вариантов различных гексапольно-цилиндрических полей.

Схема энергоанализатора с гексапольно-цилиндрическим полем (1) для составляющей цилиндрического поля  $\mu = 2$  и кругового гексаполя  $\gamma = 1$  приведена на рисунке 1.

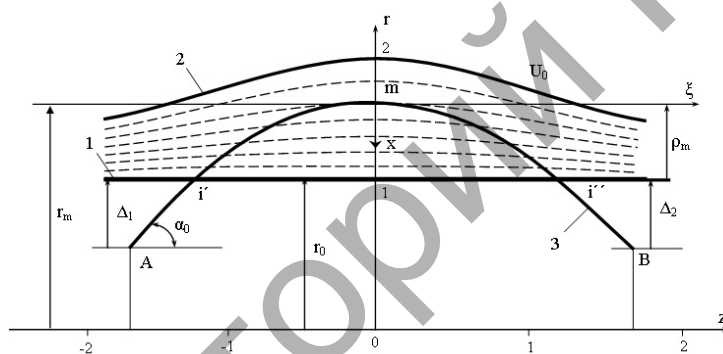


Рис. 1. Схема энергоанализатора на основе ГЦП: А — источник;  $i'$  — входная кольцевая щель;  $i''$  — выходная кольцевая щель; В — приемник

Электростатическое поле формируется в пространстве между двумя осесимметричными коаксиальными электродами, внутренний из которых имеет цилиндрическую форму (радиуса  $r_0$ ) и находится под потенциалом земли. На внешний электрод, профиль которого повторяет эквипотенциальную линию поля, имеющую криволинейный профиль, подается отклоняющий потенциал  $U_0$ . Профиль внешнего электрода определен из расчета эквипотенциальных линий гексапольно-цилиндрического поля с помощью программы MathCAD.

В работе проведено моделирование электронно-оптической схемы энергоанализатора на основе гексапольно-цилиндрического поля с выпуклым профилем внешнего электрода при  $\mu = 2, \gamma = 1$  посредством программы «Фокус» моделирования аксиально-симметричных систем корпускулярной оптики с произвольной геометрией электродов. Программа позволяет в графическом режиме осуществить ввод и модификацию конструкции, вычислить распределение потенциала в выделенной области и провести траекторный анализ системы [5].

Синтез электронно-оптических систем сложной структуры, отвечающих заданным требованиям, практически неосуществим без этапа предварительного численного моделирования и анализа. Это позволяет в реальное время рассмотреть десятки вариантов искомой конструкции электронно-оптической системы, не прибегая при этом к созданию опытных образцов. Таким образом, значительно расширяются границы возможного поиска оптимальной конструкции электронно-оптических систем, что позволяет оценить ее параметры, которые трудно измерить или невозможно измерить с требуемой точностью [6].

Численное моделирование электронно-оптических систем традиционно включает в себя такие разделы, как моделирование электростатических полей и вычисление траекторий заряженных частиц в этих полях. Численное моделирование, в отличие от аналитического, обладает рядом преимуществ, основным из которых является более низкий уровень идеализации реальных конструкций [7].

На рисунке 2 представлена верхняя часть продольного сечения конструкции энергоанализатора. Общая протяженность электронно-оптической системы 11,4. Потенциал внешнего электрода с криволинейным профилем равен 1. Радиус внутреннего цилиндрического электрода равен 4,2. Внутренний цилиндрический электрод под нулевым потенциалом. Электроды выбраны прозрачными для прохождения заряженных частиц.

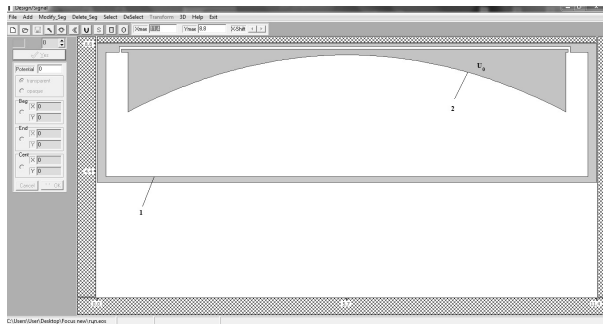


Рис. 2. Продольное сечение верхней части конструкции в схеме гексапольно-цилиндрического энергоанализатора: 1 — внутренний цилиндрический электрод, 2 — внешний электрод с криволинейным профилем

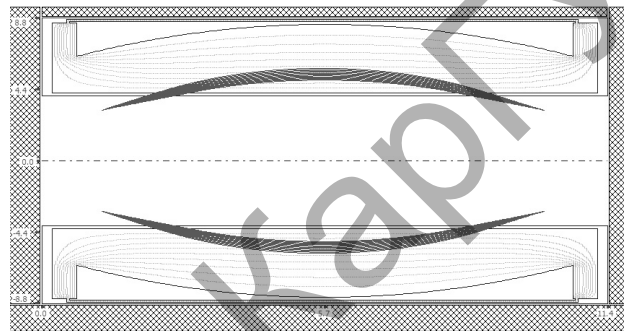


Рис. 3. Траектории движения заряженных частиц в электронно-оптической схеме гексапольно-цилиндрического энергоанализатора

Рисунок 3 представляет ход траекторий заряженных частиц в указанной электронно-оптической системе. Точечный источник и его изображение находятся в области внутреннего цилиндрического электрода. Из точечного источника в интервале полярных углов от  $31^\circ$  до  $44^\circ$  вылетают частицы и под действием потенциала на внешнем электроде криволинейного профиля направляются на коллектор. В системе выполняется фокусировка «кольцо-кольцо». Отношение энергии заряженной частицы к потенциалу электрода  $E/V = 1$ . Положение источника —  $x = 1,2$ ;  $y = 3,120$ . Шаг изменения угла был равен  $1^\circ$ .

Рассчитаны линейная дисперсия и разрешение выходной диафрагмы. Для этого рассмотрены траектории движения заряженных частиц с различными энергиями:  $\Delta x = 0,0519194$ ;  $\Delta E = 0,01$ ;  $E = 1$  (эВ);  $D = \Delta x \cdot E / \Delta E$  — линейная дисперсия;  $D = 5,16$ ;  $R = \Delta E / E$  — разрешение диафрагмы;  $R = 0,01$ .

Для расчета аппаратной функции электронно-оптической схемы гексапольно-цилиндрического энергоанализатора для случая угловой фокусировки типа «кольцо-кольцо» запускаются частицы из точечного источника, помещенного вблизи внутреннего цилиндрического электрода, в диапазоне начальных углов  $31^\circ$ – $44^\circ$  и в диапазоне начальных энергий (а точнее  $E/V$ )  $0,995$ – $1,005$ , где  $V$  — максимальный потенциал. Шаг изменения угла при расчетах аппаратной функции равен  $0,5^\circ$ . На рисунке 4 представлена аппаратная функция электронно-оптической схемы гексапольно-цилиндрического энергоанализатора для угловой фокусировки второго порядка типа «кольцо-кольцо».

Относительное энергетическое разрешение на полувысоте инструментальной функции анализатора с радиусом выходной диафрагмы  $0,0085 R_{in}$  составляет  $0,55\%$  при светосиле  $\Omega/2\pi = 10\%$ . В данной электронно-оптической системе также выполняется угловая фокусировка второго порядка типа «ось-кольцо». В этом случае точечный источник располагается от системы  $Z = -3,6$  на оси симметрии. В таблице представлены результаты расчетов электронно-оптических параметров энергоанализатора.

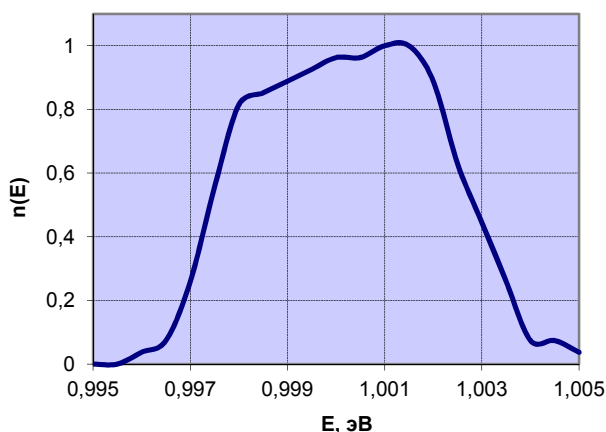


Рис. 4. Аппаратная функция гексапольно-цилиндрического энергоанализатора (фокусировка типа «кольцо-кольцо»)

Т а б л и ц а

**Электронно-оптические параметры гексапольно-цилиндрического энергоанализатора для различных типов угловой фокусировки второго порядка**

Тип фокусировки	«Кольцо-кольцо»	«Ось-кольцо»
Порядок фокусировки	2	2
Центральный угол фокусировки	34°	41,37°
X координата фокусировки	10,18	15,48
Y координата фокусировки	3,072	3,65
Параметр отражения	1	1

На рисунке 5 представлен ход траекторий заряженных частиц в указанной электронно-оптической системе для режима угловой фокусировки второго порядка типа «ось-кольцо». Интервал начальных углов вылета заряженных частиц от 31 до 43°. Отношение энергии заряженной частицы к потенциалу электрода  $E/V = 1,4$ . Положение точечного источника —  $x = 0$ ;  $y = 0$ . Шаг изменения угла был равен 0,5°. Частицы вылетают из точечного источника, попадая в поле, отражаются от него и далее фокусируются в кольцевое изображение на поверхности внутреннего цилиндрического электрода.

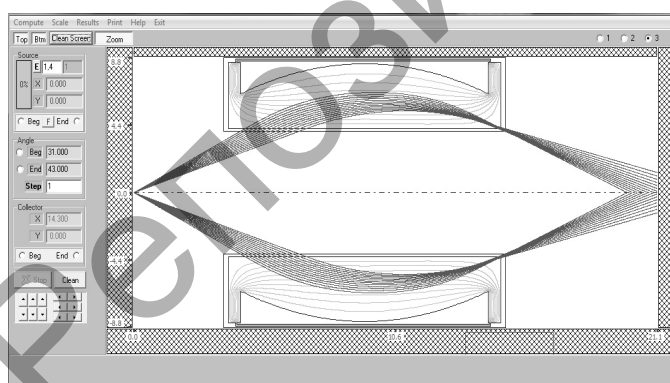


Рис. 5. Траектории заряженных частиц в электронно-оптической схеме гексапольно-цилиндрического энергоанализатора (фокусировка типа «ось-кольцо»)

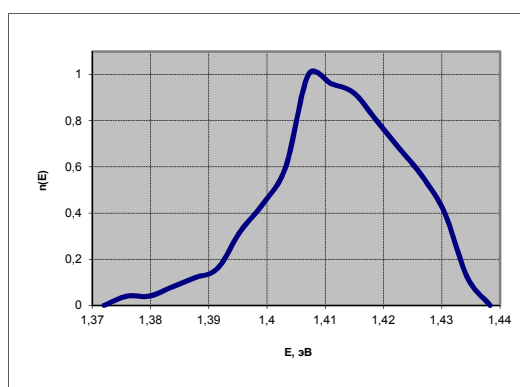


Рис. 6. Аппаратная функция гексапольно-цилиндрического энергоанализатора (фокусировка типа «ось-кольцо»)

Для расчета аппаратной функции диафрагму расположили на поверхности внутреннего цилиндрического электрода. Диапазон начальных углов 31–43°, диапазон начальных энергий (а точнее  $E/V$ ) 1,37–1,45. Шаг изменения угла при расчетах аппаратной функции равен 0,5°.

На рисунке 6 представлена аппаратная функция электронно-оптической схемы гексапольно-цилиндрического энергоанализатора с угловой фокусировкой второго порядка типа «ось-кольцо».

Относительное энергетическое разрешение на полувысоте инструментальной функции анализатора с радиусом выходной диафрагмы  $0.058 R_{in}$  составляет 0,57 % при светосиле  $\Omega/2\pi=12,6$  %.

Таким образом, получена численная модель электронно-оптической схемы гексапольно-цилиндрического энергоанализатора с выпуклым профилем внешнего электрода. Рассчитаны аппаратные функции анализатора при точечном источнике в режимах угловой фокусировки второго порядка типа «кольцо-кольцо», «ось-кольцо». Определены электронно-оптические параметры гексапольно-цилиндрического зеркального энергоанализатора для угловой фокусировки второго порядка типа «кольцо-кольцо», «ось-кольцо». Установлено, что на основе гексапольно-цилиндрического поля могут быть построены светосильные энергоанализаторы с угловой фокусировкой второго порядка. Предлагаемый зеркальный анализатор на основе гексапольно-цилиндрического поля за счет возможности острой фокусировки широких пучков заряженных частиц имеет значительное преимущество в разрешающей способности по сравнению с существующими аналогичными электронными зеркалами.

### References

1. *Zashkvara V.V., Tyndyk N.N.* Axial-symmetrical multipoles, their application // *Zh. Tech. Phys.* — 1991. — Vol. 61. — № 4. — P. 148–157.
2. *Zashkvara V.V.* On circular multipole calculations // *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. Section A.* — 1995. — A354. — P. 171–174.
3. *Zashkvara V.V., Tyndyk N.N.* Potential fields based on circular multipole series // *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. Section A.* — 1996. — A370. — P. 452–460.
4. *Ashimbaeva B.U., Masyagin B.E., Saulebekov A.O., Tyndyk N.N., Chokin K.Sh.* Electron-optical parameters of a mirror analyzer with hexapole cylinder field // *Eurasian Physical Technical Journal.* — 2006. — Vol. 3. — № 2 (6). — P. 51–55.
5. *Trubitsyn A.A.* The software «FOCUS» to simulate axi-symmetrical and planar electron (ion) optical systems // *Charged Particle Optics: 8th International conference handbook.* — Singapore, 2010. — P. 208.
6. *Demin S.K., Safronov S.I., Tarasov R.P.* Numerical analysis and syntheses of the electron-optical systems of the complex structure. I // *Zh. Tech. Phys.* — 1998. — Vol. 68. — № 2. — P. 97.
7. *Trubitsyn A.A.* Modeling of ion-optical systems for mass-spectrometer with quadropole filter of the masses // *Zh. Tech. Phys.* — 2003. — Vol. 73. — № 6. — P. 136.