

АСПАПТАР ЖӘНЕ ЭКСПЕРИМЕНТ ТЕХНИКАЛАРЫ ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 537.533.34

Расчет аппаратной функции электронного спектрометра типа двухкаскадного цилиндрического зеркала

Calculation of instrumental function of the electron spectrometer of double-pass cylindrical mirror type

Саулебеков А.О.¹, Венос Д.², Трубицын А.А.³, Камбарова Ж.Т.¹

¹Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова (E-mail: saulebekov@mail.ru);

²Институт ядерной физики АН Чешской Республики, Прага;

³Рязанский государственный радиотехнический университет, Россия

Мақалада екікаскадты цилиндрлік айналық анализатордың моделі сандық есептеулер көмегімен зерттелген. Берілген электронды-оптикалық жүйеде зарядталған бөлшектер қозғалысының траекториялық талдауы жүргізілген. Анализатордың электронды-оптикалық параметрлері сандық түрде есептелген. Анализатордың ішкі цилиндр электродындағы диафрагмалар мен өткізуші терезешелерін оптимизациялау мақсатында нүктелік пен созылыңқы көздер жағдайларында спектрометрдің аппараттық функциялары алғашқы рет құрылып алынған, ал бұл аспаптың ажыратуын бағалауға мүмкіндік берді. Спектрометр құрылғы энергиялық ажырату 0,1–1 % құраған жағдайда 0,1–20 кэВ облыста радиоактивті көздерден ұшып шығатын электрондарды өлшеуге мүмкіндік береді.

We have studied the model of double-pass cylindrical mirror analyzer by numerical calculations. A trajectory analysis of the motion of charged particles in the electron-optical system is done. The electron-optical parameters of the analyzer are numerically calculated. To optimize the diaphragms and crossing windows in the inner cylindrical electrode of analyzer, there were firstly built the instrumental functions of the spectrometer in the case of point and continuous sources, which allowed us to estimate resolution of the instrument. The spectrometer allows to measure the electrons emitted by radioactive sources in the field of 0.1–20 keV with an instrumental energy resolution of 0.1–1 %.

В Институте ядерной физики Академии наук Чешской Республики (г. Ржеж под Прагой) был построен и длительное время эксплуатировался электронный спектрометр типа двухкаскадного цилиндрического зеркала с фокусировкой второго порядка для применения в ядерной спектроскопии и атомной физике. На данный момент остро встал вопрос о модернизации этого прибора. В связи с этим возникла необходимость расчета аппаратной функции данного прибора, которая ранее никогда не рассчитывалась, с целью оптимизации диафрагм и пропускных окон во внутреннем цилиндрическом электроде.

Аппаратная функция является одной из основных характеристик как аксиальных электростатических энергоанализаторов, так и многих других электронно- и ионно-оптических приборов [1–3]. Аппаратная функция (кривая пропускания, приборная линия, инструментальная функция, функция отклика) аксиального электростатического энергоанализатора пропорциональна зависимости моноэнергетического электронного потока, проходящего через выходную щель энергоанализатора, от энергии электронов [1, 2].

Если известна аппаратная функция, то не составляет труда определить разрешающую способность и пропускание. В электронной оптике существует метод, имеющий название «траекторный»,

в результате применения которого можно получить основные характеристики изучаемого энергоанализатора.

Электронный спектрометр типа двухкаскадного цилиндрического зеркала с фокусировкой второго порядка был построен для применения в ядерной спектроскопии и атомной физике [4]. Энергетический диапазон электронного спектрометра лежит в области от 100 эВ до 20 кэВ. Разрешение можно плавно регулировать в пределах от 0,2 до 2 %, без нарушения вакуума. Лучшее разрешение, полученное с помощью замедляющего объектива перед входом в спектрометр, от 0,04 % при 1,4 кэВ при 93 % запаздывания. В статье [4] рассмотрена конструкция и дано подробное описание спектрометра, а также даны примеры проведенных на нем измерений.

Схема сечения анализатора показана на рисунке 1. Разрешение может быть скорректировано с помощью двух регулируемых кольцевых щелей: одна из них является входной, другая расположена перед детектором.

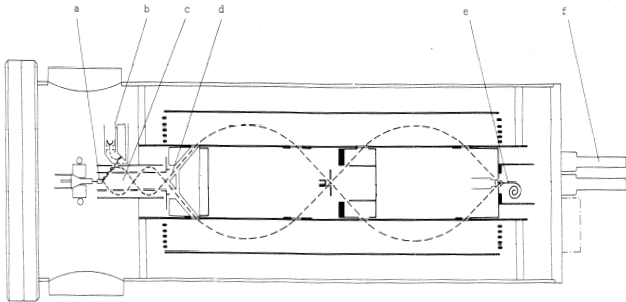


Рис. 1. Схема поперечного сечения спектрометра, рентгеновской трубки и электронного усилителя: а — образец, b — рентгеновская трубка, с — электронный усилитель, d — тормозящий объектив, e — детектор, f — винтовой микрометр

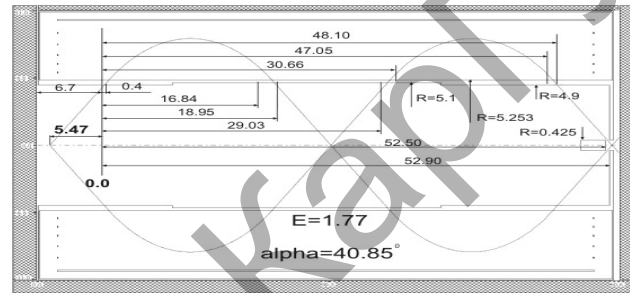


Рис. 2. Продольное сечение верхней части конструкции

Двухкаскадный прибор имеет преимущество: значительно уменьшается количество рассеянных электронов, т.е. при этой конфигурации только третья часть рассеянных электронов может достичь детектора, а также имеет оптимальные диаметры относительно к длине коаксиальных цилиндров.

Кольцевая входная щель, выступающая в качестве виртуального электронного оптического объекта, вместе с большими размерами анализатора позволяет использовать источники с большой площадью. Это имеет важное значение для низкоэнергетической электронной спектроскопии радиоактивных образцов. Форма источника может быть либо в виде диска диаметром 6–8 мм, либо цилиндра длиной и диаметром 6–8 мм. Электроны, испускаемые в неаксиальной плоскости, фильтруются щелью во внутреннем цилиндре. Диафрагма расположена в центре спектрометра.

Тормозящий объектив состоит из конических электродов. Они размещаются между источником (образец) и входной щелью. Лучшее разрешение, полученное в ходе корректировки спектрометра, $1,6 \times 10^{-3}$ без задержки, а также 4×10^{-4} с задержкой.

На первом этапе работы проведено моделирование электронно-оптической схемы двухкаскадного цилиндрического зеркала с помощью 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].

На рисунке 2 представлено продольное сечение конструкции двухкаскадного цилиндрического анализатора. Схема конструкции построена в масштабе 1:10. Параметры спектрометра, размеры, радиусы щелей и диафрагм соответствуют данным статьи [4]. Как видно из рисунка 2, частица с энергией $E=1,77$ (точнее E/V , где V — потенциал внешнего цилиндра) из точечного источника под центральным углом $40,85^\circ$ пролетает сквозь середины всех апертур.

Рисунок 3 представляет ход траекторий заряженных частиц в указанной электронно-оптической схеме. Точечный источник расположен на оси энергоанализатора. Диапазон начальных углов — от $38,85$ до $42,85^\circ$. Отношение энергии заряженной частицы к потенциалу электрода — 1,77. Положение источника в используемой для расчетов системе координат — $x = 1,23$; $y = 0$, т.е. оптимальное поло-

жение источника относительно левого края входной апертуры Z (ист.) = -54,7 мм. Потенциал внешнего цилиндрического электрода равен 1. При расчетах шаг изменения угла был равен $0,2^\circ$. Пучок заряженных частиц выходит из точечного источника, расположенного на оси симметрии, дважды отражается в поле зеркала и фокусируется в точечное изображение. Линейная дисперсия составляет $D=250$, разрешение диафрагмы $R = \Delta E / E = 0.0113$.

На рисунке 4 показано увеличенное изображение траекторий движения частиц при прохождении выходной диафрагмы.

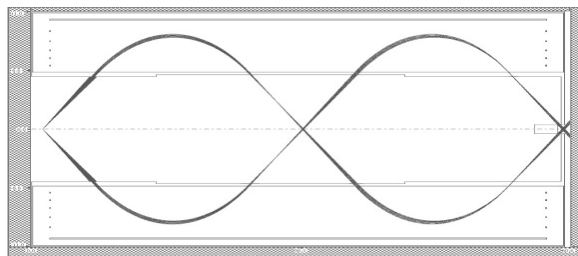


Рис. 3. Траектории движения заряженных частиц в энергоанализаторе

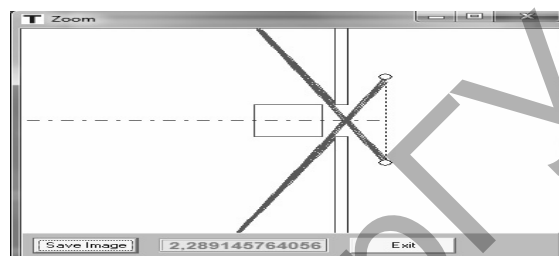


Рис. 4. Увеличенное изображение траекторий движения частиц при прохождении выходной диафрагмы

На рисунке 5 представлена конструкция в трехмерном виде, полученная с помощью программы AutoCAD 2010.

Для расчета аппаратной функции системы запускаются частицы из точечного источника в диапазоне начальных углов $38,85-42,85^\circ$ и в диапазоне энергий (а точнее E/V) 1.75–1.79. На рисунке 6 показаны траектории заряженных частиц в указанных диапазонах углов и энергий.

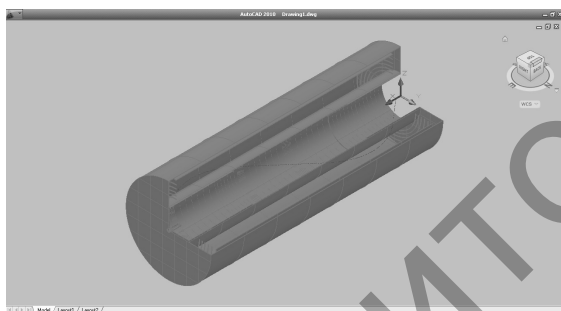


Рис. 5. 3D — вид конструкции двухкаскадного цилиндрического зеркального энергоанализатора

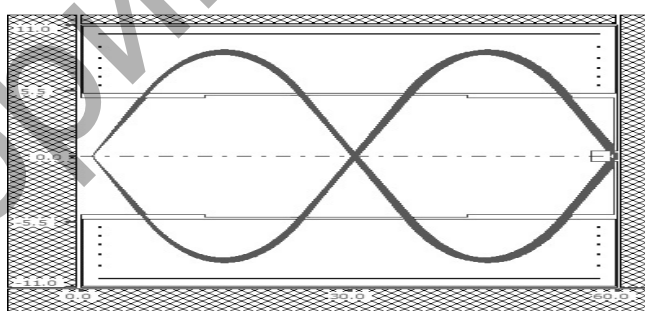


Рис. 6. Траектории движения заряженных частиц

На рисунке 7 представлена аппаратная функция системы при точечном источнике. Относительное энергетическое разрешение на полувысоте аппаратной функции анализатора составляет 0,9 % при светосиле $\Omega/2\pi=2,2\%$.

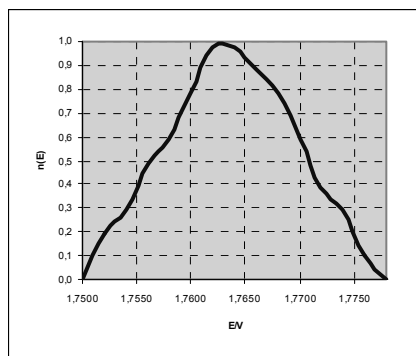


Рис. 7. Аппаратная функция двухкаскадного цилиндрического зеркального энергоанализатора при точечном источнике

Цилиндрическое зеркало является двухступенчатым, поэтому для вычисления аппаратной функции при протяженном источнике была введена промежуточная диафрагма в центре спектрометра. Для этого при точечном источнике в диапазоне начальных углов $38,85\text{--}42,85^\circ$ и в диапазоне энергий (а точнее E/V) $1,75\text{--}1,79$ измерили ширину пучка в пересечении всех траекторий частиц в центре спектрометра. Таким образом, выяснили размеры промежуточной диафрагмы: радиус $0,33$, ширина $0,65$. Далее запустили частицы из протяженного источника в виде диска в диапазоне начальных углов $39,95\text{--}41,85^\circ$ и в диапазоне энергий (а точнее E/V) $1,75\text{--}1,78$. На рисунке 8 приведены траектории заряженных частиц в указанных диапазонах углов и энергий. Диапазоны начальных углов были изменены, так как только при начальных углах $39,95\text{--}41,85^\circ$ частицы долетают до детектора.

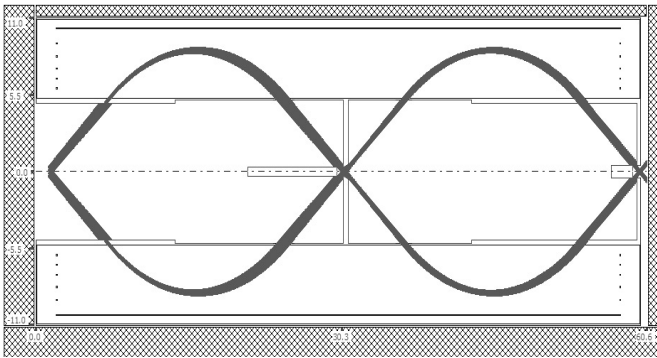


Рис. 8. Траектории движения заряженных частиц при расчете аппаратной функции

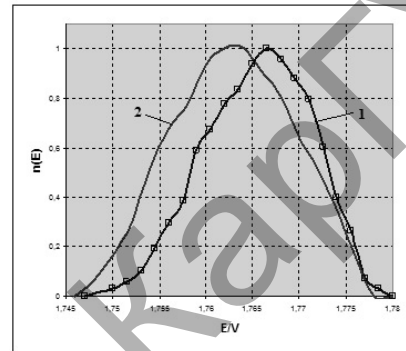


Рис. 9. Аппаратные функции двухкаскадного цилиндрического зеркального энергоанализатора при протяженных источниках в виде дисков: 1 — диск диаметром 4 мм; 2 — диск диаметром 8 мм

На рисунке 9 представлены аппаратные функции двухкаскадного цилиндрического зеркального энергоанализатора при протяженных источниках в виде дисков диаметрами 4 мм и 8 мм.

Относительное энергетическое разрешение на полувысоте аппаратной функции анализатора при протяженных источниках в виде дисков диаметрами 4 и 8 мм составляет соответственно $0,86$ и $1,03\%$.

Таким образом, получена численная модель двухкаскадного цилиндрического зеркального анализатора. Рассчитаны аппаратные функции анализатора при точечном и протяженных источниках. Параметры данного спектрометра удовлетворяют противоречащим требованиям двух различных областей применения по сравнению с другими спектрометрами типа цилиндрического зеркала с фокусировкой второго порядка, ранее известных в литературе. Спектрометр дает возможность измерять электроны, испускаемые радиоактивными источниками в области $0,1\text{--}20$ кэВ с инструментальным энергетическим разрешением $0,1\text{--}1\%$.

References

1. Afanasyev V.P., Yavor S.Ya. Electrostatic energy analyzers (Review) // Tech. phys. J. — 1975. — Vol. 45. — № 6. — P. 1137–1169.
2. Kozlov I.G. Modern problems of Electron spectroscopy. — M.: Atom publ., 1978. — 248 p.
3. Yavor M. Optics of Charged Particle Analyzer // Advances in Imaging and Electron Physics. Elsevier, 2009. — Vol. 157. — P. 677.
4. Varga D., Kadar I., Kover A., Kover L. and Morik G.Y. An electron spectrometer of double-pass cylindrical mirror type for Nuclear spectroscopy and Atom physics // Nuclear Instruments and Methods. — 154 (1978). — P. 473–483.
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.