

10;12
©1994ТОРОИДАЛЬНОЕ И СФЕРИЧЕСКОЕ
ЗЕРКАЛО ДЛЯ ЭНЕРГОУГЛОВОГО
АНАЛИЗА ФОТОЭЛЕКТРОНОВ*А.А.Трубицын, Б.А.Полонский, О.Д.Протопопов*

Все большее влияние на развитие теоретических представлений о физике поверхности твердого тела оказывает фотоэлектронная спектроскопия. Ее возрастающая роль стимулирует разработку современного физико-аналитического оборудования. Уникальные электронно-оптические характеристики электростатического сферического зеркала (СЗ) и систем на его основе ставят его в ряд наиболее перспективных приборов для анализа характеристик потоков фотоэлектронов.

Настоящая работа посвящена численному исследованию электронно-оптических свойств электростатического зеркала с электродами, имеющими некоторые отклонения от сферичности и являющимися торами. В работе показана возможность использования СЗ и тороидального зеркала (ТЗ) в качестве приборов для энергоуглового анализа потоков фотоэлектронов.

Уникальное свойство СЗ — идеальная угловая фокусировка — было установлено в работе Сар-Эля [1]. Было показано, что для параметра отражения $S = 1$ точечный источник отражается в диаметрально противоположную точку без сферической аберрации. Здесь

$$S = \frac{q \cdot V}{2 \cdot E} \cdot \frac{1}{-R_{in}/R_{out}},$$

где q и E — заряд и кинетическая энергия частицы, V — отклоняющийся потенциал, приложенный между наружным электродом с радиусом R_{out} и внутренним электродом с радиусом R_{in} . Однако автор указанной работы ограничился рассмотрением лишь электронно-оптических схем с близкой к нулю линейной дисперсией по энергии, к тому же зависящей от угла влета частицы.

Более полное исследование характеристик СЗ было проведено в ряде работ В.В.Зашквары и сотр. (например, [2,3]), где была установлена схема, для которой дисперсия по энергии не зависит от угла вылета и равна удвоенному радиусу внутреннего сферического электрода. В данной

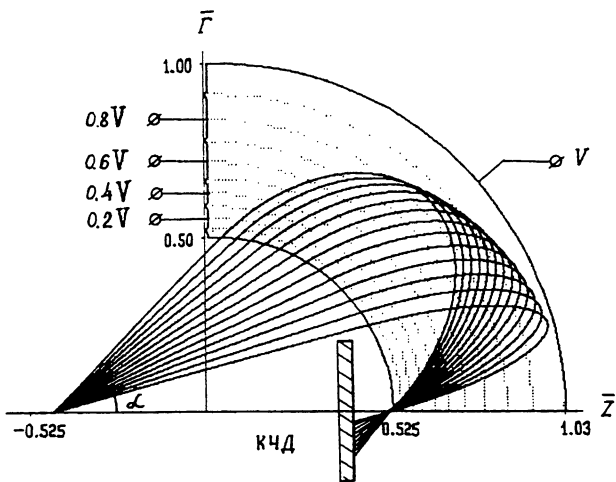


Рис. 1. Сферическое зеркало с энергоугловым разрешением.

схеме параметр отражения $S = 1$, а источник и изображение находятся в диаметрально противоположных точках на поверхности внутреннего сферического электрода. Практически пригодная конструкция, предложенная авторами, представляет собой две полусферы с выходной диафрагмой в центре внутренней полусферы, мелкоструктурной сеткой в местах пролета электронного пучка и коррекцией краевого поля с помощью нескольких корректирующих колец. Такое устройство обеспечивает светосилу, значительно превышающую светосилу практически используемых в настоящее время конструкций, при неограниченном снизу значении энергетического разрешения.

Свойство идеальной угловой фокусировки позволяет расширить область применения СЗ. При использовании двумерного координатно-чувствительного детектора (КЧД), как это показано на рис. 1, появляется возможность экспрессного анализа угловых характеристик потока фотоэлектронов в практически полном $0 - 2\pi$ диапазоне азимутальных углов (за исключением участков затенения перемычками жесткости во внутреннем электроде) и в достаточно широком диапазоне полярных углов. Здесь и далее электростатическое поле в системе рассчитывалось методом граничных элементов [4], а вычисление траекторий производилось методом, предложенным в работе [5].

К недостатку указанной выше конструкции следует отнести невозможность регистрации фотоэлектронов, имеющих близкий к 90° полярный угол α вылета из образца. Данный участок углов является наиболее информативным в фото-

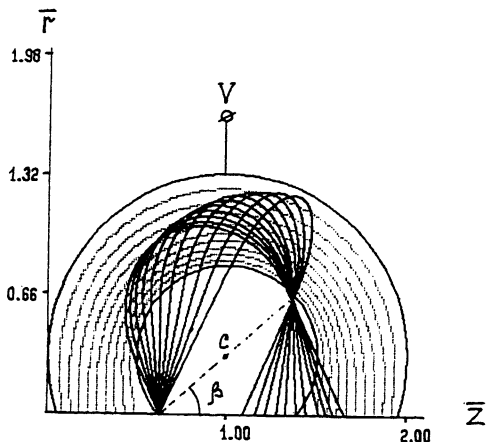


Рис. 2. Траектории электронов с энергией $E = V$ в тороидальном зеркале. ($\beta = 40^\circ$).

электронной спектроскопии с угловым разрешением. Расширение диапазона полярных углов за счет уменьшения сегмента, вырезаемого из внутренней и внешней сфер, создает проблемы с подводом возбуждающего излучения к объекту и питающих напряжений к системе регистрации.

Идея создания конструкции, позволяющей регистрировать фотоэлектроны в широком диапазоне полярных углов α вплоть до 90° , заключалась в искажении идеальной сферичности электродов СЗ таким образом, чтобы соответствующая схема обладала фокусировкой типа "ось-кольцо", в отличие от идеального СЗ, где обеспечивается фокусировка типа "ось-ось". В таком случае появляется свободное пространство, которое и может быть использовано для разрешения поставленной проблемы.

Результаты расчета электронно-оптических систем, образованных электродами, являющимися фигурами вращения сегментов окружностей, центры C которых лежат на луче, выходящем из осевого источника и имеющем некоторый угол наклона $\beta > 0$ по отношению к оси \bar{z} , показали, что в таких системах сохраняется высокий порядок фокусировки (однако идеальная фокусировка исчезает), а источник и соответствующее изображение лежат на диаметре образующей окружности. На рисунке 2 представлен пример траекторного анализа тороидального зеркала с $\beta = 40^\circ$.

В работе было проведено детальное исследование фокусирующих свойств ТЗ следующим образом. Для тороидального зеркала с параметром β строилась зависимость $d(\alpha)$ расстояния между источником и точкой пересе-

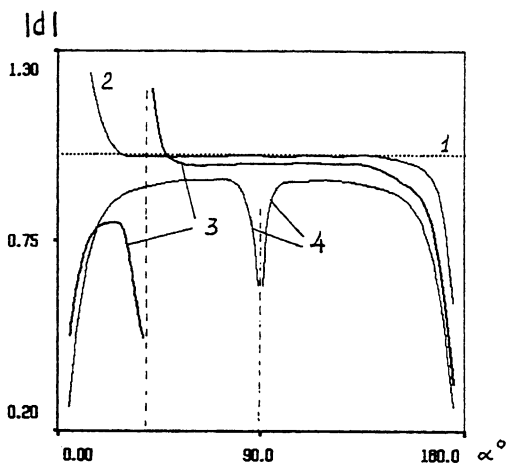


Рис. 3. Зависимость расстояния $|d|$ между источником и точкой пересечения траектории электрона с лучом, выходящим из источника под углом β , от угла эмиссии электрона α для тороидального зеркала с параметром β : 1 — $\beta = 0^\circ$ (сферическое зеркало), 2 — $\beta = 10^\circ$, 3 — $\beta = 40^\circ$, 4 — $\beta = 90^\circ$.

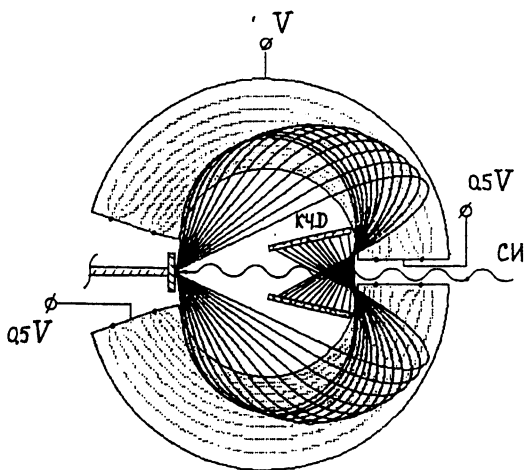


Рис. 4. Конструкция тороидального зеркала с энергоугловым разрешением. СИ — синхротронное излучение.

чения траектории электрона, эмиттированного под углом α , с лучом, выходящим под углом β из источника, в соот-

ветствии с формулой $d(\alpha) = [r_c^2(\alpha) + (z_c(\alpha) - z_s)^2]^{1/2}$. Здесь $r_c(\alpha)$, $z_c(\alpha)$ — координаты точек пересечения траекторий электронов, покидающих область градиента электростатического поля, с указанным лучом; z_s — координата источника на оси \bar{z} . Поскольку величина горизонтального участка на зависимости $d(\alpha)$ характеризует порядок фокусировки (в случае идеальной фокусировки зависимость d от α является константой), то из хода кривых на рис. 3 можно сделать заключение о том, что с ростом β происходит уменьшение порядка угловой фокусировки и некоторое уменьшение расстояния между источником и изображением. При этом вблизи угла $\alpha = \beta$ зависимость d от α терпит разрыв. Отмеченные свойства позволяют использовать ТЗ с малым параметром β ($\beta < 10^\circ$) в экспериментах, где требуются системы с высоким порядком фокусировки типа ось-кольцо.

Рис. 4 демонстрирует конструкцию анализатора с угловым и энергетическим разрешением на основе ТЗ с $\beta = 7^\circ$, позволяющего одновременно регистрировать фотоэлектроны в практически полном ($0 - 2\pi$) диапазоне азимутальных углов и широком ($15^\circ + 90^\circ$) диапазоне полярных углов. Система регистрации фотоэлектронов представляет собой конусообразный (либо цилиндрический) координатно-чувствительный детектор. Данное устройство может быть использовано в электронной спектроскопии с синхротронным возбуждением, например в методе голографической интерпретации фотоэлектронной дифракции [6].

Список литературы

- [1] *Sar-El H.Z.* // Nucl. Instr. Meth. 1966. V. 42. N 1. P. 71-76.
- [2] *Зашквара В.В., Юрчак Л.С., Былинкин А.Ф.* // ЖТФ. 1988. Т. 58. В. 10. С. 2010-2020.
- [3] *Зашквара В.В., Максимов В.К., Былинкин А.Ф., Бок А.А.* // Тез.докл. XI семинара "Методы расчета электронно-оптических систем". Алма-Ата. 1992. С. 43.
- [4] *Трубицын А.А.* // Деп. в ВИНТИ. 1993. N 169-B93. 28 с.
- [5] *Трубицын А.А.* // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1990. Т. 30. N 7. С. 1113-1115.
- [6] *Shirley D.A.* // Abstracts of the 5th International Conference on Electron Spectroscopy (ICES-5). Ukraine, Kiev. 1993. 0101.

Научно-исследовательский
технологический институт,
Рязань

Поступило в Редакцию
29 мая 1994 г.