

ТӘЖІРИБЕЛІК АСПАПТАР МЕН ТЕХНИКА ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 537.533.34

А.О.Саулебеков, Ж.Т.Камбарова, С.Н.Асылбекова, У.С.Кубаева, А.Т.Махабаева

Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова

КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Корпускулярно-оптикалық электростатикалық жүйелер электрондық спектроскопияның әр түрлі облыстарында, мысалы, микрондық электрондық спектроскопияда, фотоэлектрондық спектроскопияда, сканерлеу ауданы арттырылған оже-спектроскопияда, энергобұрыштық ажыратуға ие болатын фотоэлектрондық спектроскопияда, кедір-бұдырлы беттердің электрондық оже-спектроскопиясында, қос фильтрлі типті анализаторды қолдануымен жүретін электрондық спектроскопияда қолданылады. Мақалада екі ақырғы жағдайлар үшін нақты конструкциялары келтірілген. Бұрын бұл сұлбалардың электронды-оптикалық параметрлері есептелінген болатын. Ұсынылған жүйелердің аналитикалық мүмкіндіктерінің жақсартылғаны көрсетілген.

Different area of electron spectroscopy uses corpuscular-optical electrostatic systems. For example, such areas as microprobe electron spectroscopy, photoelectron spectroscopy, auger-spectroscopy with increased scanned area, photoelectron spectroscopy with power angle resolution, electron auger spectroscopy of rough surfaces, electron spectroscopy using a double filter type analyzer. In the work the definite designs for the last two cases are shown. Earlier the electron-optical parameters of these schemes have been calculated. It has been shown, that analytical possibilities of the offered systems are improved.

Конструкция оже-спектрометра для анализа сильно шероховатых поверхностей твердого тела

В основу разработки положена идея создания оже-спектрометра, который, будучи смонтирован на стандартном фланце ДУ-200, может подсоединяться к сверхвысоковакуумным установкам исследовательского или технологического характера. Конструкция должна обеспечивать послойный оже-анализ [1, 2] поверхности металлических и полупроводниковых материалов при оптимальных углах скольжения распыляющего ионного пучка как в случае образцов с гладкой поверхностью, так и с шероховатой. Известно, что для образцов с гладкой поверхностью (монокристаллов) максимальная скорость ионного травления и минимальное возмущающее воздействие бомбардирующих ионов на приповерхностный слой достигается при углах скольжения 20–30°. В случае образцов с сильно шероховатой поверхностью ситуация иная: оптимальные условия послойного оже-анализа достигаются при сближении направлений ионного пучка и пучка анализируемых вторичных электронов.

В настоящей работе предложена конструкция оже-спектрометра для анализа сильно шероховатой поверхности с использованием сферического зеркала (СЗ) с внешним отражением пучка заряженных частиц [3–5]. Прежде чем приступить к ее описанию, рассмотрим работу и конструкции аналогичных оже-спектрометров для гладкой и шероховатой поверхности твердого тела, предложенные ранее (рис. 1 и 3) [6]. Аналогом прибора для сильно шероховатой поверхности является оже-спектрометр фирмы «Аналва».

На рисунке 1 изображена конструкция оже-спектрометра для послойного элементного анализа образцов с гладкой поверхностью. На рисунке 2 показано сечение АА этого спектрометра. Оже-спектрометр для послойного элементного анализа состоит: из базового фланца 1, на котором собраны все функциональные элементы, фланец 1 пристыковывается к фланцу высоковакуумной камеры 2;

цилиндрического зеркального анализатора (ЦЗА) [7], состоящего из внутреннего 3 и наружного 4 цилиндрических электродов; электродов электростатической защиты рабочего поля ЦЗА 5; коаксиальной электродам ЦЗА электронной пушки 6; ионной пушки 7; двухэлектродного электростатического дефлектора 8; выходной диафрагмы ЦЗА с приемником 9; образца 10, исследуемая поверхность которого перпендикулярна оси ЦЗА и пересекает ее в точке переднего фокуса; пермаллового экрана 11 для защиты анализатора от внешних электромагнитных полей.

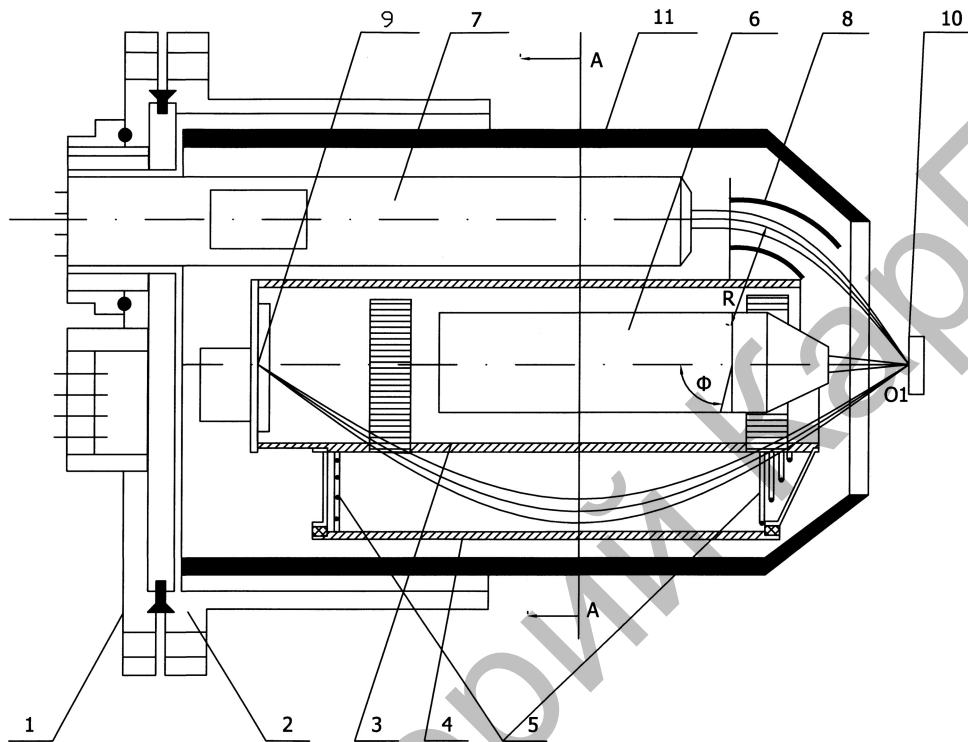


Рис. 1. Оже-спектрометр для анализа образцов с гладкой поверхностью

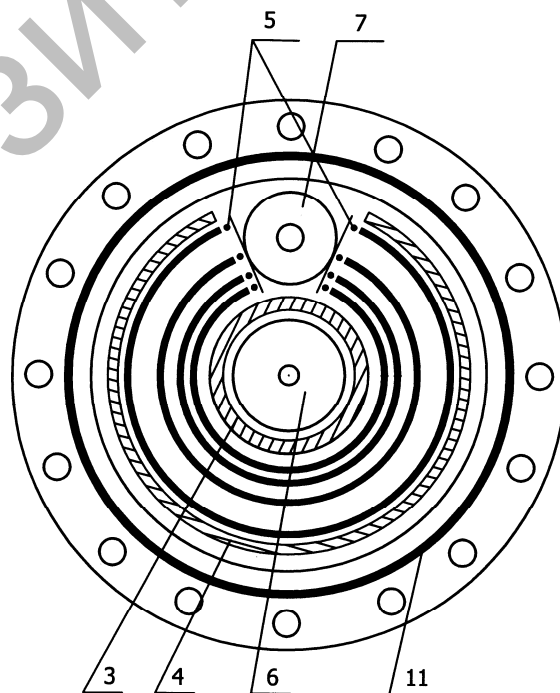


Рис. 2. Схема оже-спектрометра в сечении А-А

Из рисунка 2 видно, что наружный электрод 4 и торцевые щеки ЦЗА имеют вырезы, благодаря которым в корпусе ЦЗА образуется свободная от поля боковая полость с угловым раскрытием 60° , в которой размещена ионная пушка 7. На боковых границах полости, а также вблизи торцевых щек расположены электроды прямолинейной и кольцевой формы 5, на которые, с целью защиты рабочей области ЦЗА, подаются потенциалы в соответствии с логарифмическим законом для цилиндрического поля. В общем случае ось ионной пушки 7 наклонена к оси ЦЗА под некоторым углом, в варианте конструкции, изображенном на рисунках 1 и 2, она параллельна оси симметрии ЦЗА. Форма электродов электростатического дефлектора 8 может быть различной. Это, например, могут быть электроды цилиндрической формы, если ионное пятно на поверхности образца должно быть в виде полоски или в форме концентрических сферических сегментов различного радиуса, если необходимо сфокусировать ионный пучок в небольшое овальное пятно на поверхности образца 10. Центр кривизны электродов дефлектора 8 расположен на биссектрисе угла между осью ионной пушки и прямой, соединяющей передний фокус ЦЗА с центром O_1 выходного отверстия дефлектора 8. Угол раствора электродов дефлектора равен $\Phi = 90^\circ - \beta$, где β — угол скольжения оси ионного пучка у поверхности образца. Выбором этих величин можно варьировать геометрические параметры дефлектора и физические условия травления поверхности образца.

Оже-спектрометр работает следующим образом. Ионная пушка 7 формирует ионный пучок, параллельный оси симметрии ЦЗА. Подчей потенциалов противоположного знака на электроды дефлектора 8 ионный пучок отклоняется и направляется к образцу 10 под скользящим углом $\beta = 20\text{--}30^\circ$, соответствующим оптимальному условию ионного распыления гладкой поверхности. Периодическим изменением потенциалов на отклоняющих пластинах ионной пушки 8 осуществляется сканирование ионным пучком поверхности образца 10 и послойное ее распыление. Оже-анализ осуществляется следующим образом: под воздействием острогофокусированного электронного пучка, сформированного пушкой 6, возбуждаются атомы на поверхности образца, часть потока вторичных электронов подвергается энергоанализу в ЦЗА, регистрируется приемником 9, в результате синхронного детектирования в спектре вторичных электронов выделяются характерные оже-пики, по которым устанавливается элементный состав поверхности на данной стадии ионного распыления. Осуществляя одновременно или поочередно ионное распыление и регистрацию спектров оже-электронов, получают профиль распределения химических элементов по глубине приповерхностного слоя.

На следующем рисунке 3 приведена схема конструктивного размещения основных функциональных элементов спектрометра при оже-анализе сильно шероховатой поверхности исследуемого образца. Отличие ее от предыдущей заключается в переносе двух элементов. Ионная пушка 7 и дефлектор 8 в этом случае перенесены в положение, в котором оси электронного и ионного пучков совпадают. Это, как видно из рисунка 3, реализуемо, если ось электронного пучка совмещена с прямой, соединяющей передний фокус ЦЗА с центром O_1 выходного отверстия дефлектора 8. Поскольку дефлектор находится в зоне прохождения электронного пучка, то внешний электрод дефлектора снабжен небольшим отверстием для пропускания электронного пучка, которое не нарушает работу дефлектора. Режим работы спектрометра остается тем же.

Предложенное конструктивное решение оже-спектрометра для послойного элементного анализа позволило в небольшой по объему боковой полости ЦЗА разместить ионную пушку и дефлектор, с помощью которого ионный пучок направляется к поверхности исследуемого образца под углом скольжения, варьируемым в широком диапазоне. Благодаря этому оптимизированы условия ионного распыления, как в случае оже-анализа гладких поверхностей, так и сильно шероховатых. Существенно увеличена по сравнению с прототипом область рабочего поля ЦЗА (угол азимутального раскрытия анализируемого пучка вторичных электронов составляет 300° вместо 180°), пропускание и чувствительность возросли в 1,6 раза. Энергетическое разрешение анализатора составляет 0,12 %, светосила — 3 % от 4π, диапазон измеряемых энергий электронов — до 2000 эВ. Параметры электронной пушки: энергия первичных электронов 3000 эВ, диаметр пучка электронов 50 мкм, ток электронного пучка на образце составляет 10^{-7} – 10^{-9} А. Диапазон энергии ионов аргона 600–2000 эВ для ионной пушки.

Для микроанализа сильно шероховатых поверхностей твердого тела может быть применена система, изображенная на рисунке 4 [8–9]. Отличительными особенностями этой системы является угловая фокусировка второго порядка в сочетании с большой линейной дисперсией по энергии и малым коэффициентом продольного увеличения. Продольное смещение источника в этом случае меньше сказывается на разрешении по энергии, чем в классическом ЦЗА, т.е. сохраняется настройка на фокус в большом интервале глубин впадин и высот выступов шероховатой поверхности (например, поверх-

ности разрыва). Кроме того, за счет значительного уменьшения входного угла (до 10°) глубина зондируемых впадин увеличивается в несколько раз в сравнении с ЦЗА (для которого входной угол равен 42.3° , т.е. глубина зондируемых впадин приблизительно равна их ширине). Увеличение глубины зондирования показано на рисунке 5 и определяется по следующей формуле:

$$n = \frac{h_2}{h_1} = \frac{\operatorname{tg} 42,3^\circ}{\operatorname{tg} 10^\circ} = 5,16.$$

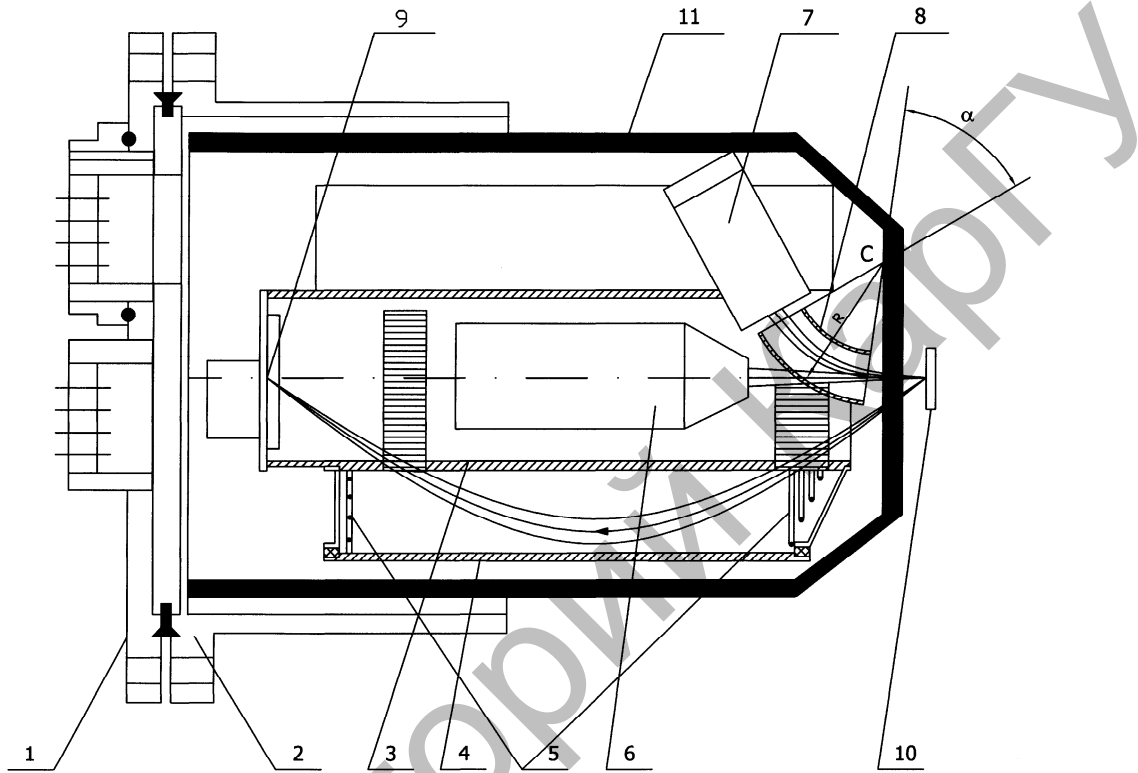


Рис. 3. Оже-спектрометр для анализа образцов с шероховатой поверхностью

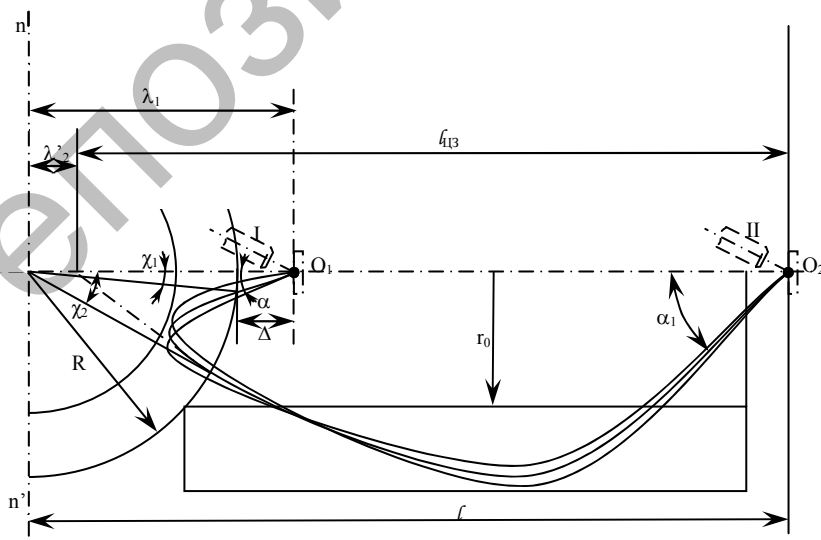


Рис. 4. Электронно-оптическая схема электростат-анализатора на базе ЦЗ и СЗ с внешним отражением пучка

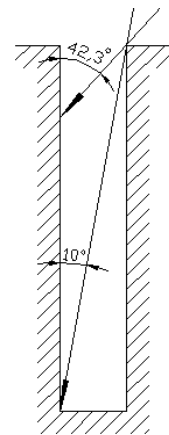


Рис. 5.

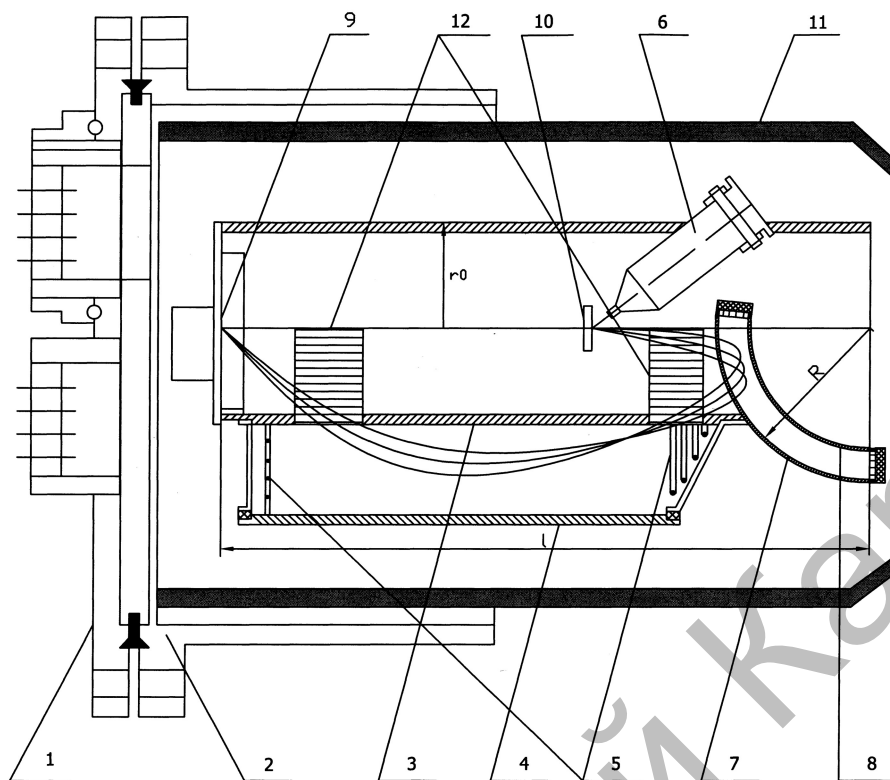


Рис. 6. Оже-спектрометр для анализа сильно шероховатых поверхностей

Оже-спектрометр для микрондирования сильно шероховатых поверхностей изображен на рисунке 6. Он состоит из бокового фланца 1, на котором собраны все функциональные элементы, фланец пристыковывается к фланцу вакуумной камеры 2; двух цилиндрических электродов (внутреннего 3 и наружного 4); электродов 5 электростатической защиты рабочего поля ЦЗА; электронной пушки 6; внешнего 7 и внутреннего 8 сферических электродов; выходной диафрагмы диаметром порядка 0,1–0,5 мм (обычно используемых в спектрометрах) с приемником 9; образца 10, исследуемая поверхность которого перпендикулярна оси ЦЗА и пересекает ее в точке переднего фокуса; пермаллового экрана 11 для защиты анализатора от внешних электромагнитных полей; окон 12 для прохождения пучка заряженных частиц через внутренний цилиндрический электрод, затянутых одномерной сеткой. Светосила энергоанализатора составляет порядка 0,15 % от 4π , а энергетическое разрешение порядка 0,02 %.

*Конструкция энергоанализатора типа двойного фильтра
на основе системы из цилиндрического и сферического зеркал*

Широкое применение бездисперсионных электростатических анализаторов типа двойного фильтра обусловлено тем, что пониженные требования к угловой фокусировке анализируемого пучка в области приемника делают эти приборы менее чувствительными к возмущающим электромагнитным полям и позволяют работать с источниками больших размеров. Энергоанализатор, работающий по принципу двойного фильтра, может быть построен на основе схемы с обратным отражением пучка заряженных частиц, представленной на рисунке 4. Конструкция спектрометра представлена на рисунке 6. Конструктивные элементы с 1 по 12 те же, что в оже-спектрометре для шероховатых поверхностей (рис. 3). Функцию фильтра заряженных частиц высокой энергии 13 выполняет сферическое поле между двумя сетками на входе в ЦЗ, при прохождении пучка заряженных частиц через этот фильтр отсекается низкоэнергетическая часть спектра. Далее пучок поступает в ЦЗ и испытывает диспергирующее действие цилиндрического электростатического поля. Второй фильтр, функцию которого выполняет СЗ, между двумя электродами 7 и 8 отражает заряженные частицы с энергией из малого интервала, примыкающего к низкоэнергетическому краю спектра, выделенного первым фильтром. В результате действия двух фильтров энергоанализатор СЗ+ЦЗ+СЗ выделяет узкую полосу спектрального интервала.

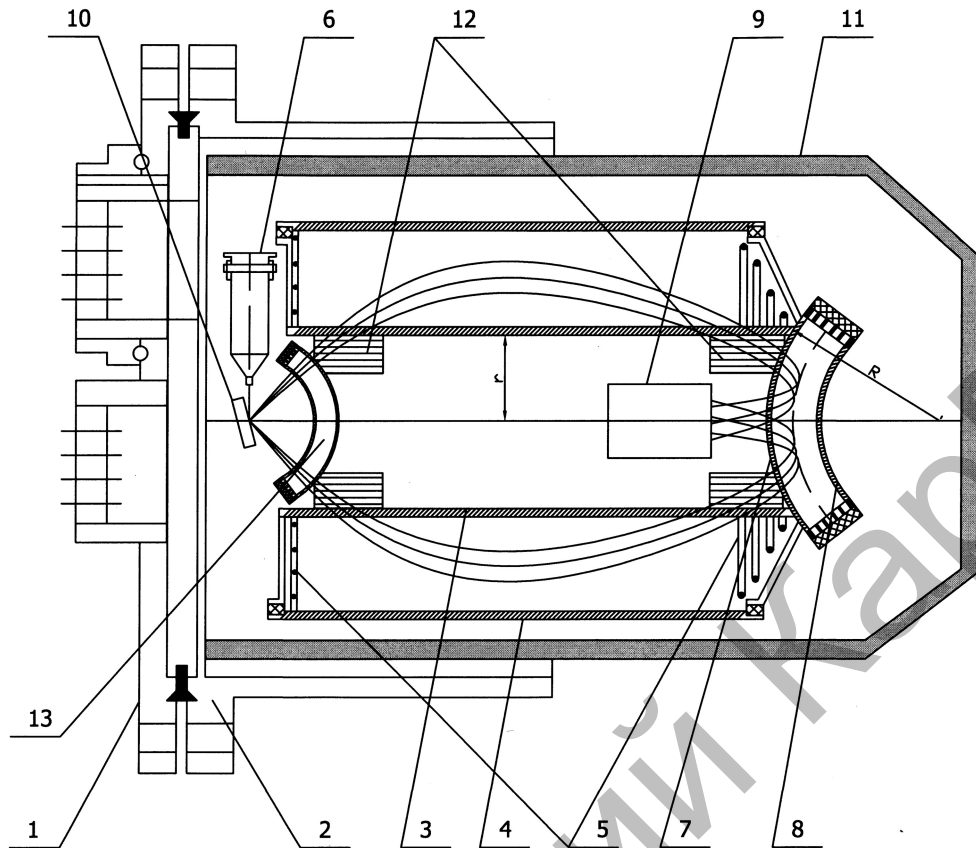


Рис. 7. Конструкция энергоанализатора типа двойного фильтра

На практике удобно, чтобы осевая траектория пучка выходила из поля СЗ в точке пересечения сферического электрода с осью симметрии. На рисунке 7 представлена схема двойного фильтра, рассчитанная для случая $p = 0,85$ и $\mu = 2,2$. Параметры осевой траектории такие: $\alpha_1 = 44,39^\circ$, $\chi_2 = 19,38^\circ$, $\alpha = 25,01^\circ$, $s = 2,066$, $R_m = 0,8463$. Для побочных траекторий, ограничивающих пучок углами $\alpha_1 = \pm 5^\circ$, значения R_m составляют $0,84711(+)$ и $0,84553(-)$ соответственно. Тогда $\Delta R_m / R_m = 0,1907\%$ и $|(\Delta E) / E| = 1,37\%$. Светосила прибора $6,1\%$ от 4π [10].

Список литературы

1. Еловигов С.С. Оже-электронная спектроскопия // Соросовский образовательный журнал. — 2001. — Т. 7. — № 2. — С. 82–88.
2. Жумадилов Е.К., Саулебеков А.О., Тажибаева С.Д. Некоторые аспекты применения ОЖЕ-электронной спектроскопии для анализа поверхности // Интенсификация и повышение эффективности использования научно-производственного потенциала: Материалы науч.-практ. конф. (6–7 декабря 1989 г.). — Караганда, 1989. — С. 126–127.
3. Заишваря В.В., Юрчак Л.С. и др. Энергоанализаторы на основе системы из сферических и цилиндрических зеркал // Деп. ВИНТИ. — № 3413-B89. — 1989. — 26 с.
4. Заишваря В.В., Саулебеков А.О., Ашимбаева Б.У. Электронно-оптические свойства электростатического сферического зеркала и систем на его основе. 2. Электростатическое сферическое зеркало в режиме внешнего отражения пучка заряженных частиц // Журн. техн. физики. — 1989. — Т. 59. — № 7. — С. 1–9.
5. Заишваря В.В., Саулебеков А.О. и др. Электронно-оптические свойства электростатического сферического зеркала и систем на его основе. 3. Системы из сферического и цилиндрического зеркал. // Журн. техн. физики. — 1992. — Т. 62. — № 6. — С. 189–204.
6. Заишваря В.В., Ашимбаева Б.У. и др. Разработка электронных спектрометров для исследования поверхности твердых тел // Физика твердого тела и новые области ее применения: Тез. докл. 2-й республ. конф. (15–17 мая, 1990 г.). — Караганда, 1990. — С. 213.
7. Заишваря В.В., Корсунский М.И., Космачев О.С. Фокусирующие свойства электростатического зеркала с цилиндрическим полем // Журн. техн. физики. — 1966. — Т. 36. — № 1. — С. 132–138.

8. Саулебеков А.О. Электронный спектрометр для микроанализа сильно шероховатых поверхностей // НТП-основа развития рыночной экономики: Тр. междунар. науч. конф. (26–27 июня 1997 г.). — Караганда: КарГТУ, 1997. — С. 61–63.
9. Тажибаева С.Д., Саулебеков А.О. и др. Исследования зависимости химического состава поверхности сплава 12Х18Н10Т от температуры и растягивающих напряжений ОЖЕ-методом // Вестник КарГУ. — 1998. — № 3. — С. 45–52.
10. Саулебеков А.О. Электростатический энергоанализатор заряженных частиц типа двойного фильтра // Вестн. ЕНУ им. Л.Н.Гумилева. — 2005. — № 2 (42). — С. 55–60.

Репозиторий КарГУ