
РАДИОФИЗИКА ЖӘНЕ ЭЛЕКТРОНИКА
РАДИОФИЗИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 537.533.34

А.О.Саулебеков, У.С.Кубаева, А.Т.Махабаева, Р.С.Турлыбекова

Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова

ОЖЕ-СПЕКТРОМЕТР С УВЕЛИЧЕННОЙ ПЛОЩАДЬЮ СКАНИРОВАНИЯ

Сканерлеудің ауданы үлкейтілген оже-спектрометр жасау үшін электронды-оптикалық жүйе ұсынылған. Ол электростатикалық, сфералық және цилиндрлік айналардан құралған. Сондай-ақ жоғары сапалы бұрыштық тоғыстауға ие, бұндай айналар үшін энергия бойынша дисперсия шамасы кәдімгі, ал бойлық үлкейту коэффициенті аздығымен ерекшеленеді. JAMP-10S оже-микронзондында энергоанализатор ретінде бірлік цилиндрлік айна қолданылады. Ондай айна үшін сызықтық бойлық коэффициенті 1-ге тең екендігі мәлім.

The electron-optical system that can be recommended to work out of an Auger-spectrometer of increased area of scanning is offered. The system consists of combination of electrostatic spherical and cylindrical mirrors. It has high quality of angular focusing, the magnitude of dispersion on energy ordinary for the given type of mirrors and, that it is remarkable, the small coefficient of longitudinal increase. In an Auger-microprobe JAMP-10S as an energy analyzer a single cylindrical mirror is used. It is known the coefficient of linear longitudinal increase of cylindrical mirror equal 1.

Метод оже-электронной спектроскопии (ОЭС) — один из наиболее распространенных методов исследования поверхности — основан на изучении распределения оже-электронов по энергиям. Поскольку большая часть электронных уровней носит дискретный характер, метод дает информацию об энергетическом расположении уровней, а следовательно, о химическом составе вещества. Измерение величины тока испускаемых оже-электронов позволяет производить не только качественные, но и количественные исследования, что делает метод ОЭС пригодным для анализа элементного состава. Низкоэнергетические оже-электроны сильно поглощаются уже в одном монослое вещества и могут испускаться только из нескольких поверхностных слоев. Таким образом, метод оже-спектроскопии является методом анализа элементного состава тонкой приповерхностной области толщиной 0,5–2,0 нм. Это свойство, а также быстрота получения информации, высокая чувствительность, возможность получения сведений обо всех элементах на поверхности при $z > 2$, о состоянии и количестве этих элементов делают ОЭС эффективным средством исследования. В основе метода ОЭС лежат такие процессы, как ионизация внутренних электронных уровней атома первичным электронным пучком, безызлучательный оже-переход и выход оже-электрона в вакуум, где он регистрируется при помощи электронного спектрометра. Приведем перечень возможностей метода ОЭС:

- качественный и количественный анализ состава поверхности и границ зерен с локальностью ~ 50 нм;
- профиль изменения концентрации по глубине (с использованием методики ионного травления или для клиновидных образцов);
- исследование химической связи;
- получение изображений поверхности образца во вторичных, обратнорассеянных и оже-электронах;
- исследование картин каналирования электронов (оценка кристалличности изучаемой поверхности);
- получение изображений в режимах композиционного и топографического контрастов;
- топография поверхности;
- исследования поверхности в режиме растрового электронного микроскопа.

Целью настоящей работы является расчет электростатического энергоанализатора потоков заряженных частиц на основе комбинации сферического и цилиндрического зеркал (СЗ и ЦЗ). То есть это касается пятого пункта (выделено полужирным курсивом) технических характеристик ожемикронзонда JAMP-10S (JEOL, Япония) или пункта 1 на рисунке 1. Для нахождения множества схем СЗ+ЦЗ, отвечающих требованию угловой фокусировки второго порядка, следует варьировать значения свободных параметров и относительно параметра отражения цилиндрического зеркала решать уравнение (1), затем по приведенным ниже формулам рассчитать электронно-оптические характеристики системы (параметры отражения СЗ и ЦЗ, угловую и линейную дисперсию по энергии, величину коэффициента продольного увеличения системы, величину абберационного размытия изображения, линейные и угловые размеры системы, радиус максимального вхождения пучка заряженных частиц в отклоняющее поле и т.д.).

Уравнение, выражающее условие угловой фокусировки второго порядка рассматриваемой системы, выглядит следующим образом:

$$A_I \left\{ \frac{\phi(\alpha, \alpha_1, \chi_1)}{\operatorname{ctg} \alpha_1 - \frac{\operatorname{ctg} \alpha}{k}} - 2 \operatorname{ctg} \alpha_1 \cdot k^2 + \frac{\sin(\alpha - \alpha_1)}{\cos^2(\alpha - \chi_1) \sin^2 \alpha} \left[\frac{\cos(\alpha - \alpha_1) \cos^2 \alpha}{\cos^2(\alpha - \chi_1)} - 1 + 2 \operatorname{tg}^2(\alpha - \chi_1) \cos^2 \alpha \right] \right\} = 2k^2 A_{II}, \quad (1)$$

где

$$\phi(\alpha, \alpha_1, \chi_1) = 1 - k^2 - \frac{\sin(\alpha - \alpha_1) \operatorname{ctg} \alpha_1}{\cos^2(\alpha - \chi_1) \sin^2 \alpha} \left[\frac{\cos(\alpha - \alpha_1) \cos^2 \alpha}{\cos^2(\alpha - \chi_1)} - 1 + 2 \operatorname{tg}^2(\alpha - \chi_1) \cos^2 \alpha \right], \quad (2)$$

$$k = 1 - \frac{\sin(\alpha - \alpha_1)}{\cos^2(\alpha - \chi_1)} \operatorname{ctg} \alpha. \quad (3)$$

Соотношение между параметрами СЗ и ЦЗ μ , α , α_1 , χ_1 и p в условиях угловой фокусировки первого порядка системы

$$A_I = \mu \frac{\sin(\alpha - \chi_1)}{\sin \alpha_1} \left[\operatorname{ctg} \alpha_1 - \frac{\operatorname{ctg} \alpha}{k} \right], \quad (4)$$

A_I и A_{II} — коэффициенты угловой абберации первого и второго порядка ЦЗ, фокусирующего по схеме типа «ось-ось» [2]:

$$A_I = 2 \left\{ -1 - 2p\theta + \left[-1 + 2p^2(1 + 2p\theta) \right] \operatorname{ctg}^2 \alpha_1 \right\}, \quad (5)$$

$$A_{II} = 2 \operatorname{ctg} \alpha_1 \left\{ 1 - 3p^2(1 + 2p\theta) - p\theta + \left[1 + 2p^3\theta + 2p^4(1 + 2p\theta) \right] \operatorname{ctg}^2 \alpha_1 \right\}. \quad (6)$$

Согласно [3]

$$p = \sqrt{\frac{E}{qu} \ln \frac{r_1}{r_0}} \sin \alpha \text{ — параметр отражения ЦЗ,}$$

$$\theta(p) = e^{p^2} \int_0^{p^2} e^{-x^2} dx,$$

где r_0 и r_1 — радиусы внутреннего и наружного цилиндрических электродов; q — заряд частиц; u — тормозящая разность потенциалов, приложенная между цилиндрическими электродами; E — кинетическая энергия анализируемых частиц.

Формула для расчета величины линейной дисперсии по энергии комбинированной системы СЗ+ЦЗ имеет вид

$$D = A_2 + 2 \left[A_I - \mu \frac{\sin(\alpha - \chi_1) \operatorname{ctg} \alpha_1}{\sin \alpha_1} \right] \frac{\sin \left(\frac{\alpha - \alpha_1}{2} - \chi_1 \right) \cos \frac{\alpha - \alpha_1}{2}}{\cos(\alpha - \chi_1)}, \quad (7)$$

где A_2 — коэффициент линейной дисперсии по энергии ЦЗ

$$A_2 = 2p \operatorname{ctg} \alpha_1 \left[p + (1 + 2p^2)\theta(p) \right]. \quad (8)$$

Продольное линейное увеличение системы

$$\Gamma_{np} = -\frac{2}{\mu} \left[A_I - \mu \frac{\sin(\alpha - \chi_1) \cos \alpha_1}{\sin^2 \alpha_1} \right] \frac{\sin \alpha \sin(\alpha - \alpha_1)}{\sin 2(\alpha - \chi_1) \cos(\alpha - \chi_1)} + \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_1}. \quad (9)$$

Уравнение (1) содержит четыре параметра p , α , α_1 и χ_1 , три из них являются свободными, варьированием которых можно получить множество различных электронно-оптических схем. Рассмотрим схему СЗ+ЦЗ с внутренним отражением пучка от СЗ (заход и выход пучка осуществляется через внутренний сферический электрод), представляющую практический интерес.

Физически реальным схемам отвечают те решения уравнения (1), которые удовлетворяют условию, следующему из выражения (4)

$$\mu(\alpha, \alpha_1, \chi_1) = \frac{A_I(\alpha_1, p)}{\frac{\sin(\alpha - \chi_1)}{\sin \alpha_1} \left[\text{ctg} \alpha_1 - \frac{\text{ctg} \alpha}{k} \right]} > 0. \quad (10)$$

Функция $\mu(\alpha, \alpha_1, \chi_1)$ является сложной. В окрестности точки $\alpha_1^0 = 42,306^\circ$ характер зависимости $\mu(\alpha, \chi_1)$ резко изменяется: если в области $\alpha_1 < \alpha_1^0$ $\mu > 0$ в широком диапазоне значений α и χ_1 , то в области $\alpha_1 > \alpha_1^0$ функция $\mu(\alpha, \alpha_1, \chi_1) < 0$ везде, за исключением участка, в котором $\chi_1 > \alpha$. Графики функций $\mu(\alpha, \chi_1)$ для различных значений α_1 , а также таблицы значений рассчитанных характеристик системы содержатся в работе [4]. При стремлении α_1 к α_1^0 кривые $\mu = \mu(\alpha, \chi_1)$ приближаются к оси абсцисс, в пределе $\alpha_1 = \alpha_1^0 = 42,306^\circ$ и уравнения (1) и (4) допускают единственное решение, для которого $\mu \neq 0$ и принимает любое положительное значение. В этом случае СЗ находится в режиме идеальной угловой фокусировки [5, 6] (параметр отражения

$$S = \frac{1}{2} \frac{u_{om}}{u_{yck}} \frac{1}{1 - \frac{R_{en}}{R}} = 1,$$

$\alpha = \alpha_1$), а ЦЗ — в режиме угловой фокусировки второго порядка. Полагая $\text{ctg} \alpha_1 - \frac{\text{ctg} \alpha}{k} = 0$, приходим к формулам для расчета точек, в которых μ обращается в ноль:

$$\chi_1 = \alpha - \arccos \left[\sin(\alpha - \alpha_1) \text{ctg} \alpha \right]^{1/2} \quad (11)$$

или терпит разрыв

$$\chi_1 = \alpha - \arcsin \left[\frac{\sin(\alpha - \alpha_1)}{\text{tg} \alpha - \text{tg} \alpha_1} \right]^{1/2}. \quad (12)$$

Установлено, что изображения точечного источника, расположенного на оси симметрии СЗ, в режиме угловой фокусировки второго порядка являются кольцевыми, что на практике усложняет регистрацию [7]. В нашей системе СЗ+ЦЗ — это ограничение снимается. На рисунке 2 и в дальнейшем на других рисунках штриховыми линиями намечены контуры исследуемого образца и источника первичного возбуждения вторичных электронов. Характерная особенность схемы СЗ+ЦЗ, представленной на рисунке 2, состоит в том, что источник O_1 вынесен за пределы внутреннего сферического электрода СЗ $|\lambda_1| > R$ (что удобно с практической точки зрения), промежуточное изображение является уменьшенным и для системы в целом $\Gamma_{np} < 1$. Расчет существенно упрощается, если в плоскости промежуточного изображения системы совмещены фокусы второго порядка СЗ и ЦЗ. Тогда число свободных параметров системы сокращается до двух, удобно в качестве таковых выбирать значения α и α_1 ($\alpha < \alpha_1$) и характеристики системы находить в следующей последовательности: по формулам рассчитываем параметры СЗ в режиме угловой фокусировки второго порядка, входным параметром для расчета ЦЗ является угол α_1 , который в условиях угловой фокусировки второго порядка связан с параметром отклонения p следующим соотношением:

$$\text{ctg}^2 \alpha_1 = \frac{\frac{\theta}{2} + F(p)}{1 + 2p\theta - F(p)}, \quad (13)$$

где

$$F(p) = \frac{1 + \frac{\delta}{2}}{2p^2} = \frac{3p + (1 + 10p^2)\theta + 8p^3\theta^2}{5p + 2p^3 + (3 + 12p^2 + 4p^4)\theta}. \quad (14)$$

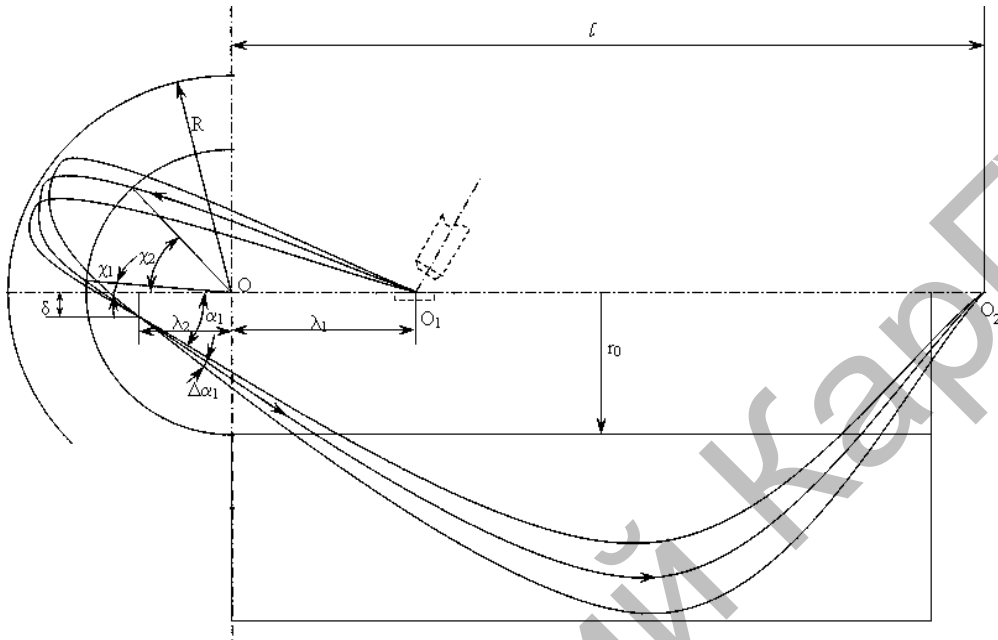


Рис. 2. Схема СЗ+ЦЗ, в которой достигается линейное уменьшение изображения источника

Определив величину p , по формуле (10) находим μ , а затем по формулам настоящей работы все остальные параметры ЦЗ и системы СЗ+ЦЗ в целом. Расчетные характеристики схемы, представленной на рисунке 2, в случае $\alpha = 20^\circ$ и $\alpha_1 = 42,29^\circ$ следующие: $\chi_1 = 54,66^\circ$, $\chi_2 = 7,63^\circ$, $\lambda_1 = -1,7304$, $\lambda_2 = -0,8717$, $\delta = 0,00712$, $s = 1,3984$, $p = 0,7695$, $\mu = 1,040$, $\ell = 5,2417$, $D = 4,7318$, $\Gamma_{np} = 0,2244$, $d\alpha_1/d\alpha = 2,5403$, $R_m = 1,4307R$, $r_m = 1,8078$. Все линейные размеры здесь выражены в долях r_0 . Если начальное угловое раскрытие пучка составляет $\Delta\alpha = \pm 2^\circ$, то после прохождения СЗ угловое раскрытие увеличивается до $\Delta\alpha_1 = \pm 5^\circ$, при этом относительное размытие изображения из-за угловой кубической аберрации не превышает $(\Delta\ell)/\ell = 0,0005$. Схему СЗ+ЦЗ (рис. 2) характеризуют высокое качество угловой фокусировки, обычная для СЗ и ЦЗ величина дисперсии по энергии и, что примечательно, малый коэффициент продольного увеличения. Первая ступень системы СЗ формирует уменьшенное изображение источника в промежуточном фокусе системы, которое затем с единичным продольным увеличением переносится в фокус ЦЗ.

В оже-микронде JAMP-10S (JEOL, Япония), представленном на рисунке 1, в качестве энергоанализатора используется одиночное ЦЗ. Как известно, коэффициент линейного продольного увеличения цилиндрического анализатора равен 1. В предложенной в настоящей работе комбинированной системе этот коэффициент составляет 0,2244. Таким образом, смещение источника будет меньше сказываться на настройке на фокус вследствие малой величины продольного увеличения системы. Схему можно рекомендовать для разработки оже-спектрометра с увеличенной площадью сканирования.

Список литературы

1. Еловигов С.С. Оже-электронная спектроскопия // Соросовский образовательный журнал. — 2001. — Т. 7. — № 2. — С. 82–88.
2. Заиквара 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.
3. Заиквара В.В., Редькин В.С. К вопросу о фокусировке пучка заряженных частиц электростатическим зеркалом в цилиндрическом поле // Журн. техн. физики. — 1969. — Т. 39. — № 8. — С. 1452–1456.

4. Заиквара В.В., Юрчак Л.С., Саулебеков А.О., Верменичев Б.М., Часников А.И. Энергоанализаторы на основе системы из сферических и цилиндрических зеркал // Деп. ВИНТИ. — № 3413-В89. — 1989. — 26 с.
5. Заиквара В.В., Юрчак Л.С., Былинкин А.Ф. Электронно-оптические свойства электростатического зеркального энергоанализатора со сферическим полем. — М., 1985. — 26 с. — Деп. в ВИНТИ 23.08.85, № 6637-85.
6. А.с. 1205709. СССР. Сферический зеркальный анализатор пучков заряженных частиц / В.В.Заиквара, Л.С.Юрчак; опубл. 1986. Бюлл. № 2. — 4 с.
7. Заиквара В.В., Юрчак Л.С., Былинкин А.Ф. Электронно-оптические свойства сферического зеркала и систем на его основе // Журн. техн. физики. — 1988. — Т. 58. — № 10. — С. 2010-2020.

УДК 537.533.34

А.О.Саулебеков, С.Н.Асылбекова, Р.С.Турлыбекова, М.Е.Шадский, А.С.Жанасбаева
Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ПРИМЕРЕ РАСЧЕТА АНАЛИЗАТОРА С ГИПЕРБОЛИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

Мақалада электростатикалық өрістерді және осы өрісте зарядталған бөлшектердің ағынын модельдеу үшін MathCAD Professional және Borland Delphi компьютерлік бағдарламаларды қолдану мүмкіндіктері қарастырылған. Мысал ретінде гиперболалық өріс және оның цилиндрлік өріспен үлестірілуі зерттелген. Комбинацияланған өрістегі зарядталған бөлшектердің траекториялары динамикада алынған. Гиперболалық айнадағы еркін параметрлері үшін рұқсат етілген мәндерінің облысы анықталған. Бұл практикалық тұрғыдан рұқсатты сұлбаларды ізденудің облысын жеткілікті түрде тарылтуға жағдай туғызды.

In the work the possibilities of MathCAD professional and Borland Delphi applications to model electrostatic fields and fluxes of the charged particles in them have been considered. The hyperbolic field, and as well as its combination with cylindrical field are considered. The trajectories of the charged particles in the combined field are received in dynamics. The ranges of admissible values for free parameters in a hyperbolic mirror have been studied. It has allowed narrowing essentially the area of schemes searching which are proper from the practical point of view.

Ранее рассмотрены частные случаи фокусировки пучков заряженных частиц в электростатическом осесимметричном гиперболическом поле, описываемом потенциалом

$$U(r, z) = a \left(\frac{r^2}{2} - z^2 \right). \quad (1)$$

В работе [1] анализируется возможность фокусировки в поле (1) осесимметричных пучков заряженных частиц, эмитируемых точечными источниками, расположенными на оси. Поле (1) формируется между коническими электродами $r = \pm\sqrt{2}z$, находящимися под нулевым потенциалом, и электродом гиперболической формы под потенциалом, одноименным по знаку заряда частиц. Считаются прозрачными участки поверхности конических электродов, через которые пучки заряженных частиц проникают в область поля. В результате фокусирующего действия предложенного поля на пучок осуществляется кольцевое изображение на поверхность конического электрода.

В предлагаемом для рассмотрения случае поле, сформированное между коническими электродами и электродом гиперболической формы, является промежуточным между двумя каскадами в цилиндрическом электростатическом зеркале [2]. Соответственно проникновение пучка заряженных частиц в область отклоняющего поля и выход из него осуществляются через гиперболический электрод (рис. 1), находящийся под нулевым потенциалом, что подразумевает прозрачность участков гиперболического электрода [3].

Рассмотрим случай:

$$U = -a \left(\frac{r^2}{2} - z^2 \right) + C. \quad (2)$$