

Joint analysis of the spectra of Rutherford backscattering of ions and ion-induced characteristic X-rays from the thin films

Kibardin A.

Совместная обработка спектров резерфордовского обратного рассеяния ионов и индуцированного ионами характеристического рентгеновского излучения от

тонких пленок

Кибардин А. В.

Кибардин Алексей Владимирович / Kibardin Alexey - кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра вычислительной техники, физико-технологический институт, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Аннотация: в работе рассматриваются вопросы совместной регистрации и обработки спектров резерфордовского обратного рассеяния ионов и характеристического рентгеновского излучения, индуцированного падающими на мишень ионами, с целью проведения количественного анализа состава тонких пленок.

Abstract: the questions of the joint registration and processing of spectrums ion Rutherford backscattering and characteristic x-ray-induced drop onto the target ions, in order to conduct quantitative analysis of thin films.

Ключевые слова: тонкие пленки, ионы, упругое рассеяние ионов, характеристическое рентгеновское излучение, энергетические спектры, количественный анализ, элементный состав.

Keywords: thin film, ions, ion elastic scattering, x-ray emission characteristic energy spectra, quantitative analysis of elemental composition.

Анализ атомного состава с использованием резерфордовского обратного рассеяния (РОР) ионов в диапазоне энергий до 1 МэВ/нуклон наиболее эффективен для элементов малых и средних значений зарядового числа Z . Однако в области малых Z чувствительность метода ограничена малым значением сечения резерфордовского рассеяния. В области больших Z ограничением элементного анализа методом резерфордовского обратного рассеяния является функциональная зависимость кинематического фактора α , который стремится к единице (фактор α определяет долю энергии, с которой ион отражается от атома мишени) [1].

Использование в измерительном комплексе канала для регистрации характеристического рентгеновского излучения (ХРИ), индуцированного в образце падающими ионами позволяет существенно повысить количество извлекаемой при измерениях информации. Однако использование этого канала требует применения стандартных образцов для проведения количественного анализа. Предложенная нами методика совместного решения уравнений, описывающих спектры РОР и ХРИ, обеспечивает возможность количественного анализа без использования внешних стандартов, в качестве внутреннего стандарта используется подложка, на которую нанесены исследуемые тонкие слои [2].

Метод рентгеноспектрального анализа с ионным возбуждением подробно освещен в ряде работ, например [3-5]. Метод основан на представлении об атоме как о структуре электронных оболочек. В соответствии с положениями атомной физики электрон может занимать только определенные (дискретные) оболочки. Вид химического элемента, его характерные свойства определяются структурой атомных оболочек. Каждая электронная оболочка характеризуется определенным значением энергии связи электронов – минимальной энергией, необходимой для перевода электрона в свободное состояние. Энергия связи для каждой оболочки зависит от заряда ядра атома. Удаление электрона с оболочки вызывает возбуждение атома; переход его в стабильное энергетическое состояние путем заполнения образовавшейся вакансии электронами с более высоких энергетических уровней. Такие электронные переходы благодаря дискретному характеру оболочек предполагают вполне определенную потерю энергии атомом за счет испускания электромагнитного излучения с энергией, эквивалентной разности энергетических уровней оболочек, между которыми происходит электронный переход. В результате многократных переходов образуется спектр ХРИ. Совокупность рентгеновских линий, возникающих при переходе электронов с дискретного множества уровней на один общий более глубокий, называется характеристической серией рентгеновского спектра. Различают линии K -, L -, M - и т.д. серий. Значения энергий линий характеристического излучения для элементов с $Z=1$ до $Z=100$ приведены в ряде работ, например [3,4]. Таким образом, спектр ХРИ несет в себе информацию об элементном составе и количестве атомов каждого химического элемента в исследуемом образце. Выход J_s^i возбужденного ионами излучения i -ой линии s -ой серии из образца (в квантах на ион) в телесный угол $d\Omega$, охватываемый детектором, описывается формулой:

$$J_s^i = N \omega_s p_s^i d\Omega / 4\pi \int_0^t \sigma_s'(E(x)) dx / \cos \theta_1, \quad (1)$$

где N – атомная концентрация; ω_s – выход флуоресценции s -ой оболочки; p_s – относительная вероятность испускания S_i -го излучения; σ_s' – сечение ионизации S -ой оболочки ионами; t – толщина образца; θ_1 – угол между нормалью к образцу и направлением падения пучка частиц.

Формула (1) справедлива только для тонких образцов, когда поглощением ХРИ в образце можно пренебречь. С учетом того, что тормозная способность ионов определяется как $S(E)=dE/dx$, формула (1) приводится к виду:

$$J_s^i = N \omega_s p_s^i d\Omega / 4\pi \int_{E_1}^{E_0} \sigma_s'(E(x)) \frac{dE}{dx / \cos \theta_1}, \quad (2)$$

Экспериментально определяемое число отсчетов в пике N_s^i зарегистрированного S_i -го излучения будет определяться как:

$$N_s^i = Q \varepsilon_s^i J_s^i \quad (3)$$

где Q – интегральная доза ионов; ε_s^i – эффективность регистрации S_i -го излучения детектором. Сделаем следующие упрощения.

1. Будем считать тормозную способность dE/dx постоянной. Для толщины пленок порядка нескольких сотен ангстрем в интервале энергий ионов, используемых для анализа тонких слоев, это приближение выполняется с погрешностью не более 10%.

2. Энергетическую зависимость сечения ионизации аппроксимируем зависимостью вида:

$$\sigma_s'(E) = \sigma(E_0) \left[\frac{E}{E_0} \right]^\alpha, \quad (4)$$

где

$$\alpha = \frac{\ln \left[\sigma_s'(E_0) / \sigma_s'(E_0 / 2) \right]}{\ln 2} \quad (5)$$

Эта аппроксимация приведена в работе [4] и σ_s' описывает сечение ионизации с погрешностью не более 5%. Согласно [4] сечение возбуждения k -серии $\sigma_k(E_0)$ связано с сечением ионизации этой серии σ_k' формулой:

$$\sigma_k = \sigma_k' \omega_k \quad (6)$$

где ω_k – выход флуоресценции k -ой оболочки.

Подставляя (2) в (3) с учетом (5) и (6), получаем для k -серии:

$$N_k^i = \frac{N p_k^i \sigma_k(E_0) (d\Omega / 4\pi)}{E^\alpha \cos \theta_1 S(E_0) (\alpha + 1)} (E_0^{\alpha+1} - E_1^{\alpha+1}) Q \varepsilon_k^i \quad (7)$$

Как уже отмечалось выше, метод обратного рассеяния эффективен в области средних Z , однако для соседних элементов и в области больших зарядовых чисел идентификация элементов и определение концентраций атомов затруднена. Тогда расчеты организуем следующим образом.

Относительную концентрацию N_A/N_B определяем согласно (7) из спектров ХРИ (при условии разделения на спектрах ХРИ вкладов от элементов «А» и «В»):

$$\frac{N_A}{N_B} = \frac{N_{kA}^i p_{kB} \sigma_{kB}(E_0) \varepsilon_{kB}^i E_0^{\alpha_A} (\alpha_A + 1) (E_0^{\alpha_A} - E_1^{\alpha_A})}{N_{kB}^i p_{kA} \sigma_{kA}(E_0) \varepsilon_{kA}^i E_0^{\alpha_B} (\alpha_B + 1) (E_0^{\alpha_B} - E_1^{\alpha_B})} \quad (8)$$

Спектры РОР ионов позволяют получить информацию о поверхностной концентрации компонентов:

$$A_{A+B} = nd\Omega(\sigma_A N_A + \sigma_B N_B)t = nd\Omega(\sigma_A \frac{N_A}{N_B} + \sigma_B) N_B t \quad (9)$$

где A_{A+B} – площадь пика в спектре РОР ионов, обусловленного общим вкладом компонентов A и B (отдельные вклады которых не разделяются на спектрах РОР); σ_A, σ_B – сечения упругого рассеяния ионов на атомах сорта A и B .

Для перехода к абсолютным концентрациям достаточно воспользоваться методом внутреннего стандарта, используя вклад от подложки в спектрах резерфордского рассеяния ионов. На рис.1 и рис.2 представлены энергетические спектры РОР и ХРИ протонов с начальной энергией 600 кэВ от пленки, представляющей собой резистивный сплав Si, Ni, Cr на подложке Al_2O_3 . Вклады Ni и Cr в обратное рассеяние от пленки по спектрам РОР разделить не удастся, но спектры ХРИ дают информацию об относительном составе Ni и Cr . Полученное значение позволяет определить величины абсолютных концентраций Ni и Cr .

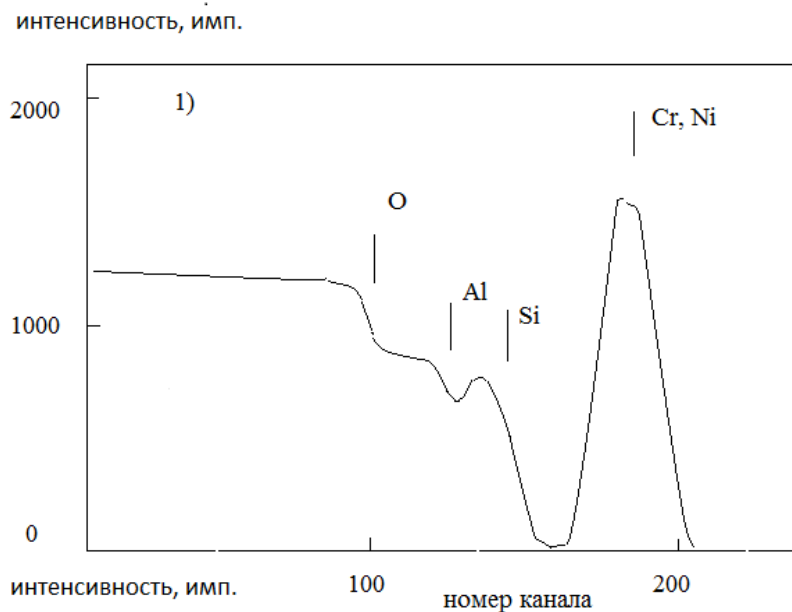


Рис. 1. Спектр РОР протонов (начальная энергия 600 кэВ) от пленки резистивного сплава (Ni, Cr) на подложке Al_2O_3

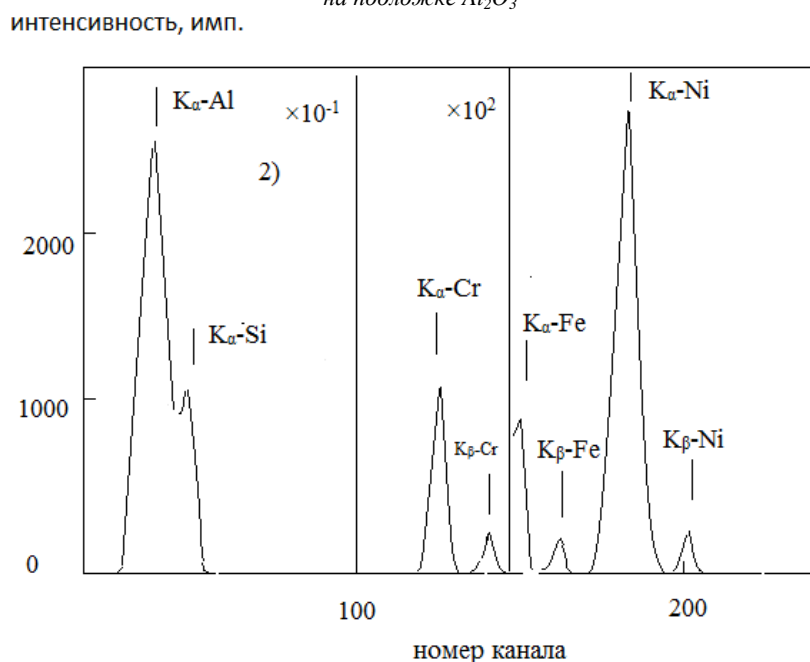


Рис. 2. Спектр ХРИ индуцированного протонами (начальная энергия 600 кэВ) от пленки резистивного сплава (Ni, Cr) на подложке Al_2O_3

Литература

1. *Chu W. K., Mayer J. W., Nicolet M. A.* Backscattering spectrometry. N.-Y.: Academic Press. 1978. 384 p.
2. *Кибардин А. В.* Изменение профилей концентрации атомов в тонкопленочных структурах Me-Si при тепловом и радиационном воздействиях: Дисс... канд. физ.-мат. наук. Екатеринбург: УГТУ. 1996.
3. *Вольдсет Р.* Прикладная спектрометрия рентгеновского излучения. М., 1977. С. 215.
4. *Муминов В. А., Хайдаров Р. А.* Рентгенофлуоресцентный анализ возбуждением ускоренными легкими ионами. Ташкент, 1980. С. 272.
5. *Коляда В. М., Зайченко А. К., Дмитриенко Р. В.* Рентгеноспектральный анализ с ионным возбуждением. М., 1978. С. 247.