

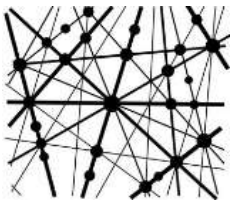
Влияние процессов многократного упругого рассеяния в многокомпонентных мишенях на интенсивность пиков упруго отраженных электронов

В.П. Афанасьев¹, Д.С. Ефременко², Л.Г. Лобанова¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия
 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Methodik der Fernerkundung (IMF), Oberpfaffenhofen, Germany



e-mail: lida.lobanova.2017@mail.ru



ВВЕДЕНИЕ

Традиционные методы определения содержания изотопов водорода в конструкционных материалах (Метод ядерных реакций – Nuclear Reaction Analysis, Метод быстрых атомов отдачи – Elastic Recoil Detection) требуют наличия дорогостоящих ускорителей, сложных систем детектирования сигналов и методики их расшифровки. Спектроскопия пиков упруго отраженных электронов (Elastic Peak Electron Spectroscopy) и спектроскопия отраженных электронов (Reflected Electron Spectroscopy) выполняется на серийно выпускаемом оборудовании для электронной спектроскопии. EPES позволяет выполнять послойный анализ изотопов водорода на глубинах порядка l_{in} – средней длины свободного неупругого пробега, составляющей порядка нм. RES позволяет проводить послойный анализ содержания водорода на глубинах порядка транспортного пробега – l_{tr} , достигающей десятки мкм. Совместное использование EPES и RES дает полную информацию о послойных профилях водорода и его изотопах в исследуемых материалах.

ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛА EPES И RES

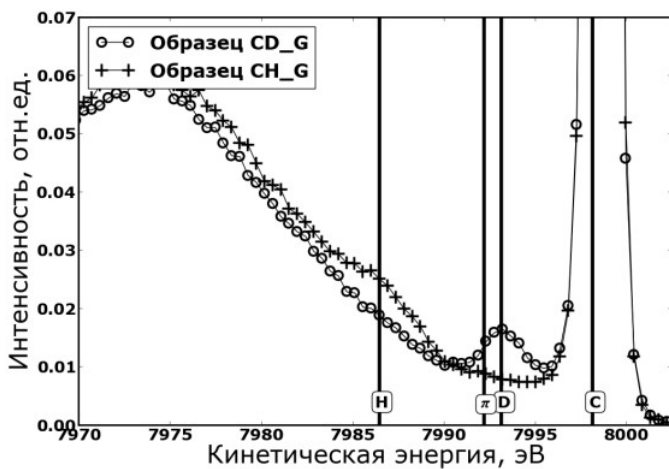


Рис. 1. EPES спектр образцов углеводородных покрытий. Начальная энергия 8 кэВ. Угол рассеяния 120°.

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

Упругие потери энергии

$$\Delta E = \frac{2m}{M} E_0 (1 - \cos \theta) \quad (1)$$

Приближение однократного отклонения (Straight Line Approximation)

$$R_j = \frac{\mu_0 |\mu|}{\mu_0 + |\mu|} \frac{\beta_j \cdot \lambda \cdot x_j(\mu_0, \mu)}{1 - \lambda} \quad (2)$$

Развитая методика

$$R_j = \frac{\mu_0 |\mu|}{\mu_0 + |\mu|} \beta_j \cdot \lambda \cdot \alpha \quad (3)$$

$$\sum_{l=0}^{\infty} \frac{2l+1}{2} P_l(\mu_0 \mu + \sqrt{1-\mu_0^2} \sqrt{1-\mu^2}) \frac{x_j^l [\lambda + \alpha(1-\lambda)] - x^l \lambda}{[(1-x^l)\lambda + \alpha(1-\lambda)][\lambda + \alpha(1-\lambda)]}$$

ОБРАБОТКА СИГНАЛА EPES И RES

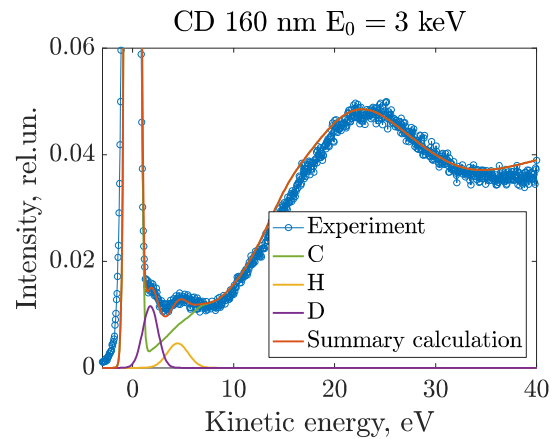


Рис. 2. EPES спектр углеводородного образца, содержащего водород и дейтерий. $n_D/n_C = 0.6$; $n_H/n_C = 0.7$.

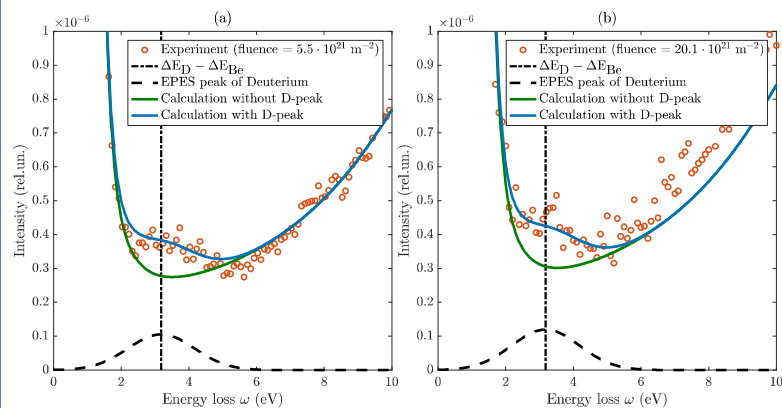


Рис. 3. EPES спектр бериллия, имплантированного дейтерием. Начальная энергия 5 кэВ. (a): $n_D/n_{Be} = 0.12$; (b): $n_D/n_{Be} = 0.15$.

ВЫВОДЫ

EPES спектроскопия, фиксирующая потери энергии электронов при их взаимодействии с ядрами атомов мишени (квазиупругие потери), позволяет определять атомы мишени по их массе, а не заряду. Положение пика упруго отраженных электронов в энергетическом спектре определяется формулой (1).

Интенсивность сигнала EPES определяется площадью под пиком. Сложности в ее расчете связаны с наличием особенностей в спектре, обусловленных характеристическими потерями энергии электронов. Интенсивность EPES сигнала является результатом многократного упругого рассеяния электронов.

В работе развита методика расчета интенсивностей сигналов EPES, базирующаяся на решении граничных задач для уравнения переноса методом инвариантного погружения в малоугловом приближении.

[1] M. Vos, M. R. Went // Surf. Interf. Anal. 39 (2007) 871.

[2] V. P. Afanas'ev, A. S. Gryazev, P. S. Kaplya, M. Köppen, O. Yu. Ridzel, N. Yu. Subbotin // J. Phys.: Conf. Ser. 891 (2017) 012303.

[3] V. P. Afanas'ev, Yu. N. Bodisko, P. S. Kaplya, L. G. Lobanova, O. Yu. Ridzel, A. N. Strukov // J. Phys.: Conf. Ser. 1713 (2020) 012001.