

Министерство образования и науки РФ
Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»

**МАТЕРИАЛЫ
XX КОНФЕРЕНЦИИ**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ**

Москва, НИЯУ МИФИ, 26-27 января 2017 г.

Москва
2017

ББК 22.333
УДК 533.9 (06)
В 40

Материалы XX конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью». Москва, 26-27 января 2017 г.
М.: НИЯУ МИФИ, 2017 г., 84 с.

Сборник содержит материалы, представленные в виде устных докладов на проводимой в НИЯУ МИФИ традиционной 20-ой конференции по взаимодействию плазмы с поверхностью. Тематика представленных в данном сборнике докладов посвящена результатам исследования и моделирования взаимодействия плазмы с поверхностью в установках управляемого термоядерного синтеза, а также физическим проблемам, сопровождающим такое взаимодействие. Сборник сформирован по мере поступления докладов, которые опубликованы в авторской редакции при минимальной редакционной правке.

Редакционная коллегия:

*Ю.М. Гаспарян,
В.А. Курнаев,
А.С. Шубина
Д.Н. Синельников*

ISBN 978-5-7262-2337-7

Подписано в печать 25.01.2017. Формат 60×84 1/16.
Печ. л. 5,25. Тираж 100 экз. Заказ № 10.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Типография НИЯУ МИФИ
115409, Москва, Каширское ш., 31*

В.П. АФАНАСЬЕВ¹, А.С. ГРЯЗЕВ¹, Д.С. ЕФРЕМЕНКО²,
П.С. КАПЛЯ¹, А.В. КУЗНЕЦОВА¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

²Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Methodik der Fernerkundung (IMF), Oberpfaffenhofen, Germany

РЕНТГЕНОВСКИЕ ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ СПЕКТРЫ ВОЛЬФРАМА, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ НЕУПРУГОГО РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ВОЛЬФРАМЕ

Методы Рентгеновской Фотоэлектронной Спектроскопии (РФЭС) находят широкое применение в задачах определения послойного и компонентного состава поверхностей мишеней в нанометровом диапазоне глубин. Интерес к РФЭС связан с возможностью определения химического состава покрытий. Материаловедческие задачи, возникающие в установках управляемого термоядерного синтеза, успешно решаются с использованием РФЭС методик. Для реализации ряда методик неразрушающего послойного состава образцов необходимы данные по дифференциальным сечениям неупругого рассеяния электронов в твердых телах $x_m(\Delta)$. Ограниченный набор данных по $x_m(\Delta)$ можно найти в работе Вернера [1].

Будем восстанавливать сечения вольфрама, воспользовавшись представлениями как РФЭС спектров, так и спектров характеристических потерь энергии электронами (ХПЭ) в виде разложений по кратностям неупругого рассеяния:

$$Q(\Delta) = Q_0 \cdot \delta(\Delta) + \sum_{k=1}^{\infty} Q_k \cdot x_m^k(\Delta), \quad (1)$$

$$R(\Delta) = R_0 \cdot \delta(\Delta) + \sum_{k=1}^{\infty} R_k \cdot x_m^k(\Delta).$$

Формула (1) является реализацией метода парциальных интенсивностей [2,3]. Уравнения для коэффициентов R_k , определяющих ХПЭ спектры и Q_k , определяющих РФЭС спектры, являются решением упругой альбедной задачи, процедура их определения подробно описана в работе [4].

Физические основы процессов потерь энергии электронов в твердых телах хорошо известны. Это локальные потери энергии на ионизацию, или на реализацию связано-свободных переходов электронов ионного остова твердого тела. Это потери энергии на возбуждение коллективных,

ленгмюровских колебаний свободных электронов твердого тела. В работе потери энергии на ионизацию описываются в рамках классической, теории Томсона [5], потери энергии на коллективные, плазменные возбуждения свободных электронов описываются в рамках классической дисперсионной теории. Дифференциальные сечения неупругого рассеяния электронов будет восстанавливать в виде:

$$x_m(\Delta) = \left[\sum_{i=1}^{N_{pl}} \lambda_{pl,i} x_{pl,i}(\Delta) + \sum_{j=1}^{N_{ion}} \lambda_{ion,j} x_{ion,j}(\Delta) \right]; \quad \sum_{i=1}^{N_{pl}} \lambda_{pl,i} + \sum_{j=1}^{N_{ion}} \lambda_{ion,j} = 1, \quad (2)$$

$$x_{pl,i}(\Delta) = \frac{A_{pl,i} \Delta^\beta}{(\Delta^2 - \epsilon_{pl,i}^2)^2 + \Delta^\alpha b_i^{4-\alpha}}, \quad x_{ion,j}(\Delta) = \frac{A_{ion,j}}{\Delta^{2+\alpha_j}} \eta(\Delta - J_{ion,j}).$$

Определение подгоночных параметров в сечениях $x_m(\Delta)$ выполняется в процессе выполнения процедуры подбора.

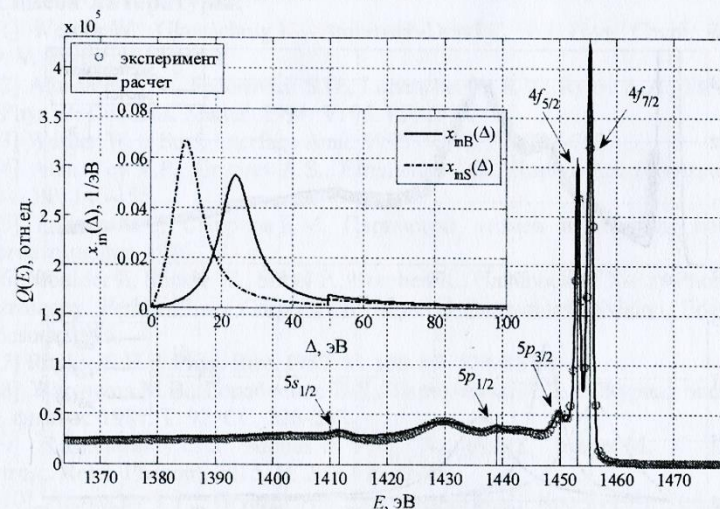


Рис. 1. Энергетический спектр РФЭС эмиссии W. Рентгеновское зондирование монохроматическим излучением линии Al K_α. Эксперимент – [6]. На вставке: восстановленные сечения $x_m(\Delta)$ в двухслойной модели

Сечения восстанавливаются в трех областях: поверхности – S, промежуточной – G и удаленной от поверхности – В. Выбор двух поверхностных областей связан с наличием двух, хорошо различимых, в спектрах, измеренных с высоким энергетическим разрешением пиков потерь энер-

гии соответствующих двум плазмонным энергиям и частотам ($\omega = 2\pi/T$). Считаем, что процессы потерь энергии на возбуждение коллективных плазменных колебаний $\hbar\omega_S$ и $\hbar\omega_G$ происходят независимо. Двум периодам, согласно [7], соответствуют две области с размерами

$$d_S = T_S v_e, \quad d_G = T_G v_e, \quad (3)$$

где v_e – скорость электрона. Наличие в приповерхностной области двух слоев с различным законом потерь энергии характерно для переходных металлов, к которым относится вольфрам. Аналогичные особенности наблюдались в сечениях ниобия.

На рис. 1 наблюдается плохо читаемая область потерь энергии, прилегающая к $4f$ пикам, из-за наличия множества фотоэлектронных пиков в анализируемой области спектра. В этом случае восстановление сечений велось в двухслойной модели мишени.

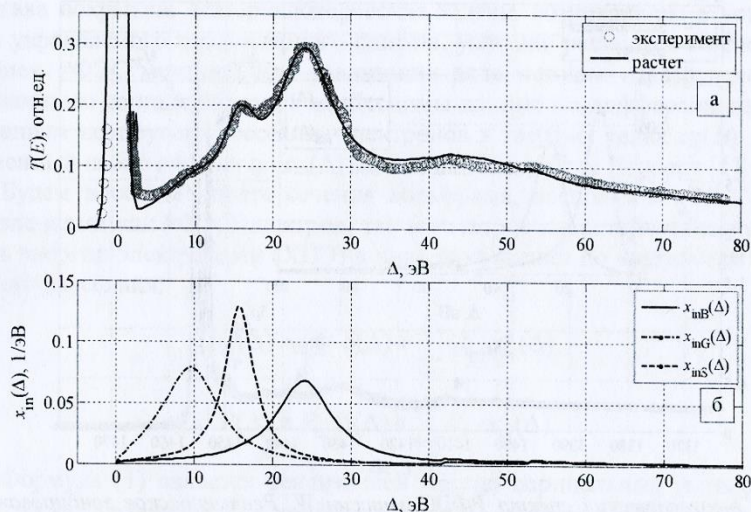


Рис. 2. Зондирование W фольги толщиной ~ 30 нм электронами с энергией 25 кэВ. Визирование в направлении зонда. а) ХПЭ спектр W. Эксперимент – [8]. б) Восстановленные сечения $x_{in}(\Delta)$ в трёхслойной модели

На рис. 2 в области малых потерь энергии, сформированной электронами с малой кратностью неупругих рассеяний, в отличие от РФЭС спектра, хорошо видны особенности на энергиях 9 и 16 эВ. Высокая четкость

ХПЭ сигнала объясняется геометрией эксперимента, в котором наблюдение ведется вдоль направления зонда, что дает высокую интенсивность сигнала. Для интерпретации ХПЭ сигнала необходимо выделять две приповерхностные области с различными законами потерь энергии $x_{inS}(\Delta)$ и $x_{inG}(\Delta)$.

Полученные результаты по дифференциальным сечениям неупругого рассеяния позволяют с уверенностью говорить о возможности описания РФЭС спектров материалов, в которых присутствует W. Данное обстоятельство позволяет выполнять неразрушающий послойный анализ образцов. Отмеченная необходимость более детального описания ХПЭ спектров W, важна для ситуаций, в которых необходимо зондирование изотопов водорода. Определение количественного определения изотопов водорода на основе ХПЭ анализа указано в работах [9,10].

Список литературы:

- [1] Werner W., Glantschnig K., Ambrosch-Draxl C. // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2009. V. 38. PP. 1013-1092.
- [2] Afanas'ev V.P., Fedorovich S.D., Lubenchenko A.V., Ryjov A.A., Esimov M.S. // Z. Phys. B: Condens. Matter. 1994. V. 96. PP. 253-259.
- [3] Werner W. // Surf. Interface Anal. 1995. V. 23. PP. 737-752.
- [4] Afanas'ev V.P., Gryazev A.S., Efremenko D.S., Kaplya P.S. // Vacuum. 2017. V. 136. PP. 146-155.
- [5] Радциг А.А., Смирнов Б.М. Параметры атомов и атомных ионов. М.: Энергоатомиздат. 1986. 344 с.
- [6] Moulder J., Stickle W., Sobol P., Bomben K., Handbook of X-Ray Photoelectron Spectroscopy, Perkin-Elmer Corporation, Physical Electronics Division, Eden Prairie, Minnesota, 1995.
- [7] Ritchie R.H. // Phys. Rev. 1957. V. 106. PP. 874-881.
- [8] Жарников М.В., Горобченко В.Д., Серпученко И.Л. // Журнал эксперим. и теор. физики. 1987. Т. 92. СС. 228-237.
- [9] Kostanovskiy I.A., Afanas'ev V.P., Naujoks D., Mayer M. // J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 2015. V. 202. PP. 22-25.
- [10] Afanas'ev V.P., Gryazev A.S., Efremenko D.S., Kaplya P.S., Ridzel O.Y. // J. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 748. P. 012005.