Определение послойных профилей изотопов водорода в углероде и бериллии на основе методик электронной спектроскопии [[1]](#footnote-1)\*)

1Афанасьев В.П., 1Лобанова Л.Г., 2Ефременко Д.С.

1Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия,  
 [universe@mpei.ac.ru](mailto:universe@mpei.ac.ru)  
2Германский центр авиации и космонавтики, Оберпфаффенхофен, Германия,  
 [contact-dlr@dlr.de](mailto:contact-dlr@dlr.de)

В настоящей работе развита количественная методика расчета профилей изотопов водорода в бериллии и углероде на основе расшифровки спектров СПУОЭ и СОЭ.

Спектроскопия пиков упруго отраженных электронов (СПУОЭ) или Elastic Peak Electron Spectroscopy (EPES) – методика анализа содержания изотопов водорода в конструкционных материалах, часто называемая электронным Rutherford Back Scattering (ERBS) по аналогии с известным методом анализа поверхности, основанным на анализе процессов рассеяния легких ионов [1]. Спектроскопия пиков упруго отраженных электронов реализуется на установках, обладающих высоким энергетическим разрешением, удовлетворяющем критерию Рэлея. Глубина зондирования мишени определяется средней длиной свободного неупругого пробега электронов между двумя соударениями – lin [1,2]. Величина lin растет с ростом энергии зондирующего пучка E0 по закону: lin ⁓ E00.8. Определяя среднее содержание изотопа водорода в слое толщиной порядка lin, при различных значениях энергии зондирующего пучка E0, возможно определить послойный профиль интересующего изотопа водорода в слоях порядка нескольких нанометров, при энергии зондирующего пучка E0, порядка нескольких кэВ.

Эффективным методом анализа водорода на глубинах порядка транспортного пробега – ltr является спектроскопия отраженных электронов – СОЭ [3]. Отметим, что величина ltr для электронов с начальной энергией E0 = 5 кэВ, зондирующих мишень из бериллия, составляет примерно 700 нм. При увеличении энергии зондирующего пучка E0 до 30 кэВ ltr составит 15 мкм. Таким образом, методика СОЭ позволяет определять водород на глубинах, варьирующихся в диапазоне от нескольких сотен нм до нескольких десятков мкм, однако недостатком СОЭ методики является определение элементного состава по зарядам ядер, т.е., в отличие от СПУОЭ, измерение суммарного по изотопному составу водорода.

Расшифровка экспериментальных результатов методик СПУОЭ и СОЭ представляет сложную процедуру. Для определения интенсивностей пиков упруго отраженных электронов в спектре СПУОЭ необходимо выполнить нетривиальную процедуру вычитания фона, созданного неупруго рассеянными электронами, а затем связать интенсивность пика, являющуюся результатом процессов многократного упругого рассеяния электронов в многокомпонентном материале, с концентрацией исследуемого элемента. Для определения концентрации водорода в бериллии или углероде методом СОЭ необходимо построить множество расчетных спектров с различным послойным профилем водорода для проведения процедуры фитинга с экспериментальными данными.

Исследование проведено в Национальном исследовательском университете «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № FSWF-2020-0023.

Литература

1. Vos M., Went M.R. Surf. Interface Anal., 2007, Vol. 39, P. 871-876.
2. Afanas’ev V.P., Gryazev A.S., Kaplya P.S., Köppen M., Ridzel O.Yu., Subbotin N.Yu., Hansen P. J. Phys.: Conf. Ser., 2017, Vol. 891, P. 012303.
3. Afanas’ev V.P., Bodisko Yu.N., Kaplya P.S., Lobanova L.G., Ridzel O.Yu., Strukov A.N. J. Phys.: Conf. Ser., 2020, Vol. 1713, P. 012001.

1. \*) [DOI – тезисы на английском](http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/L/Pt/en/GM-Afanas'ev_e.docx) [↑](#footnote-ref-1)