

Д.Г. БУЛГАДАРЯН, В.А. КУРНАЕВ, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ,  
Н.Е. ЕФИМОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ОТРАЖЕНИЕ ИОНОВ ВОДОРОДА ОТ МНОГОСЛОЙНЫХ МИШЕНЕЙ**

Возможность анализа толщины тонких слоев материалов с резко различающимися атомными номерами методом рассеяния легких ионов основана на резком отличии сечения рассеяния ионов водорода для веществ с большим и малым атомным номером. Методика анализа тонкого слоя тяжелого вещества внутри вещества с малым атомным номером для ионов низких энергий (несколько кэВ) по энергетическому спектру отраженных частиц была продемонстрирована в [1].

Представляет интерес проанализировать возможности исследования тонких слоев с разным атомным номером с помощью ионов водорода кэВных энергий. Такая ситуация часто возникает в плазменных установках, когда в ней для разных целей используются материалы с легкими и тяжелыми атомными номерами. Например, для съема тепла в диверторе токамаков используется вольфрам, а в качестве материала первой стенки бериллий (ИТЭР, JET). Для кондиционирования стенок на разных установках используются элементы с малым атомным номером: бор и литий.

В работе для изучения процессов отражения ионов водорода кэВных энергий от многослойных мишеней проведено моделирование с помощью кода SCATTER [2], использующем метод Монте-Карло и приближение парных соударений для расчетов энергетических и угловых распределений отраженных от многослойных мишеней и выбитых из них частиц. В качестве материалов слоев в моделировании использовались вольфрам, бор и бериллий. Для каждого энергетического спектра отраженных частиц рассчитывалось  $10^8$  траекторий, а угол падения пучка ионов на мишень во всех расчетах равен половине угла рассеяния. При расчетах учитывалось также изменение зарядовой фракции отраженных ионов в зависимости от энергии  $E$  частиц, покидающих поверхность мишени, в соответствии с аппроксимацией  $\eta^+ = 0,08 E^{1/2}$  [3]. Диапазон начальных энергий частиц выбран от 1 до 20 кэВ как наиболее просто реализуемом в лабораторных условиях и не требующем ускорителей с защитой от излучения (в отличие от широко распространенного метода обратного резерфордского рассеяния). Исследовались зависимость формы спектра от угла рассеяния, начальной энергии и толщины слоев легкого вещества на тяжелом, и наоборот.

При увеличении энергии падает сечение рассеяния и увеличивается глубина проникновения, и одновременно с ростом энергии возрастает доля положительно заряженных частиц в спектре отраженных частиц.

Эволюция спектра частиц от отраженных многослойной мишени (3 нм В/0,6 нм W/100 нм В) при изменении их энергии приведена на рис.1.

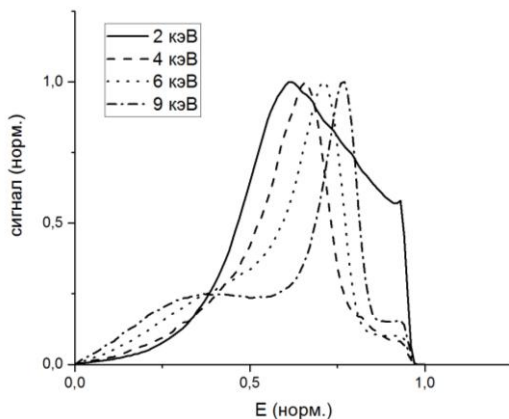


Рис. 1. Нормированные на одинаковую амплитуду и приведенные к начальной энергии спектры протонов, отраженных на угол  $\Psi = 38^\circ$  от многослойной мишени (3 нм В/0,6 нм W/100 нм В) при разных энергиях бомбардирующих частиц

Видно, что если судить о глубине, на которой расположен слой тяжелого элемента, по положению пика энергетического спектра, то максимальная чувствительность к этому параметру будет для пучка низкой энергии, если же нужно измерять толщину слоя, то предпочтение следует отдать более высоким энергиям. Таким образом, энергия анализируемого пучка может выбираться исходя из задач анализа.

Так как потери энергии для тонких слоев пропорциональны их толщине, то, соответственно, с увеличением угла рассеяния уменьшаются и потери энергии в этом слое, что соответствует сдвигу пика (рис. 2). Также с увеличением угла падает интенсивность отраженного потока частиц и растет погрешность определения толщины, составляя, например, 0,6 нм при угле рассеяния  $\Psi = 60^\circ$ . Однако относительная величина пика над фоном возрастает.

Моделирование ситуации, когда тонкий слой тяжелого элемента оказывается на легкой подложке, показывает, что определить толщину поверхностного слоя оказывается значительно труднее, так как из-за большого атомного номера частицы успевают рассеяться на самом поверхностном слое и их проникновение вглубь мишени этим слоем экранируется.

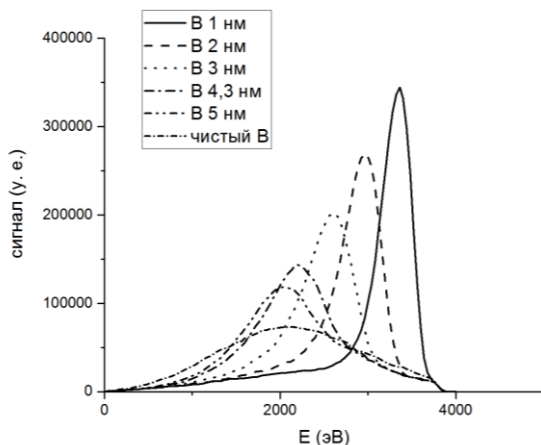


Рис. 2. Энергетические спектры пучка ионов  $H^+$  с начальной энергией  $E_0=4000$  эВ, отраженного на угол  $\Psi=60^\circ$  от многослойной мишени, состоящей из поверхностного слоя бора разной толщины, слоя  $W$  толщиной 1,2 нм под ним и подложки из бора толщиной 100 нм

Из рис.3 видно, что ширина спектра отраженных частиц достаточно быстро перестает увеличиваться с ростом толщины слоя тяжелого элемента. Увеличить диапазон регистрации толщины слоя тяжелого элемента на поверхности легкого можно, увеличив угол рассеяния (рис.4). Как видно, в этом случае быстрого насыщения не происходит, а самый тонкий слой (0,5 нм  $W$ ) на поверхности хорошо отделяется от куполообразного спектра, формируемого бериллиевой подложкой.

Таким образом, из приведенных спектров следует, что в принципе, спектроскопия отражения ионов водорода кэвных энергий позволят определить в определенном интервале толщину легких элементов на поверхности тяжелых и наоборот. Следует, однако, иметь в виду, что данные результаты получены для идеально гладких слоев вещества со строго определенной толщиной. Ионное перемешивание при осаждении энергетических частиц, а также шероховатость поверхности в определенной степени повлияют на спектры отраженных частиц.

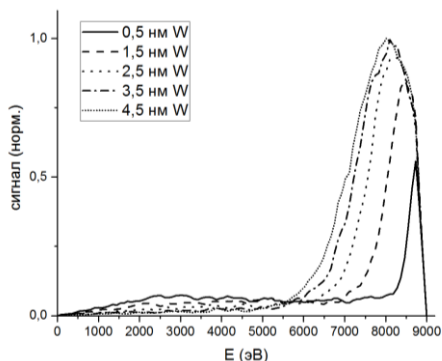


Рис. 3. Энергетические спектры ионов  $H^+$  с начальной энергией  $E_0=9000$  эВ, отраженных на угол  $\Psi=38^\circ$  от мишени, состоящей из поверхностного слоя W разной толщины и подложки из Be толщиной 100 нм

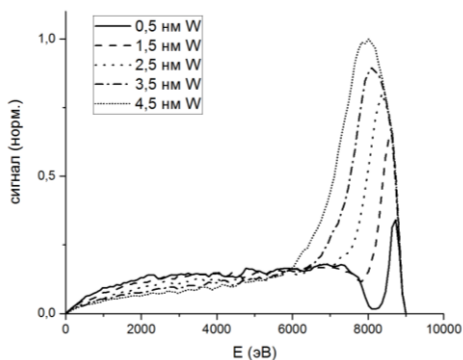


Рис. 4. Энергетические спектры ионов  $H^+$  с начальной энергией  $E_0=9000$  эВ, отраженных на угол  $\Psi=60^\circ$  от мишени, состоящей из поверхностного слоя W разной толщины и подложки из Be толщиной 100 нм

### Список литературы:

- [1] Kurnaev V.A. et al. Possibility of nondestructive layer-by-layer analysis of multilayer structures of ultrathin films using low-energy hydrogen ions. 1999. Vol. 25, № 6. P. 6–7.
- [2] Курнаев В.А., Трифонов Н.Н. // ВАНТ, серия «Термоядерный синтез». 2002, выпуск 3-4, с. 76.
- [3] Курнаев В. А., Машкова Е. С., Молчанов В. А. Отражение легких ионов от поверхности твердого тела. — Энергоатомиздат Москва, 1985.