

## РАССЕЯНИЕ НЕГОМОЯДЕРНЫХ ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩИХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ИОНОВ ПОВЕРХНОСТЬЮ МЕТАЛЛА

В.П.Власов, С.А.Евстигнеев, С.Н.Звонков,  
С.Ю.Лукьянов, В.М.Чичеров

При облучении металла двадцатикэвными ионами  $Ag\ H^+$  кинетическая энергия бомбардирующих протонов составляла 500 эВ. Энергетические спектры рассеянных протонов в этих условиях оказываются узкими,  $\Delta E / E \sim 30\%$ , в противоположность тому, что получается при рассеянии быстрых протонов.

Для экспериментов, в которых моделируется взаимодействие горячей плазмы, со стенкой, нужны пучки легких ионов, протонов или дейтронов, с энергиями в сотни электронвольт и с интенсивностью в несколько мкА/см<sup>2</sup>. Получение таких пучков встречает значительные трудности и чтобы увеличить плотность тока иногда применяют молекулярные ионы  $H_2^+$  или  $H_3^+$ . В этом случае можно увеличить ускоряющее напряжение, соответственно, в два или три раза сохранив, тем самым, прежнюю энергию на нуклон, но увеличив, по закону Ленгмюра плотность тока в пучке. В этом направлении целесообразно, однако, пойти гораздо дальше и использовать негомоядерные молекулярные ионы, содержащие водород и тяжелое ядро. Например, в ионах  $AgH^+$  кинетическая энергия, приходящаяся на долю протона, составляет всего лишь 1/40 от кинетической энергии всего иона и ускоряющее напряжение на ионном источнике может быть резко увеличено.

Разумеется, воспользоваться этим приемом можно не всегда, а лишь в таких случаях, когда удается уверенно разделить эффекты, вызываемые легкими и тяжелыми ионами, например, если изучается процесс рассеяния ионов и в центре внимания находятся энергетические спектры отраженных частиц. Несомненно, однако, что как в этом случае, так и при любых других обстоятельствах, когда для бомбардировки применяются молекулярные ионы, необходимо иметь четкий ответ на вопрос: не отличается ли взаимодействие молекулярного иона с поверхностью от взаимодействия с этой поверхностью его атомарных фрагментов, прибывающих на нее по-

одиночке. Между тем, различия в рассеянии молекулярных и атомарных ионов практически не исследовались.

Схема эксперимента понятна из рис. 1. Бомбардировка мишени производилась монокинетическими пучками ионов, выделенных и сформированных с помощью магнитного масспектрометра. Для получения ионов использовался газоразрядный ионный источник типа дуоплазматрона, работавший на смеси аргона с водородом. При ускоряющем напряжении 20 кэВ легко получались пучки ионов  $\text{ArH}^+$  с силой тока  $\sim 5$  мкА в районе мишени. Анализ рассеянных ионов по энергиям производился при помощи электростатического анализатора, для регистрации ионов применялся электронный умножитель. Давление остаточных газов в камере мишени не превышало  $1 \cdot 10^{-8}$  тор. В опытах применялись поликристаллические мишени, изготовленные из золота, платины, серебра, меди и скандия. Для очистки поверхности мишени использовался вспомогательный пучок ионов аргона. Отметим, что в ряде случаев для этого было достаточно бомбардировки ионами аргона, входящими в состав молекулярного иона  $\text{ArH}^+$ .

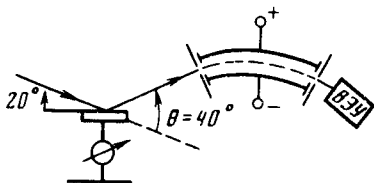


Рис. 1. Схема эксперимента

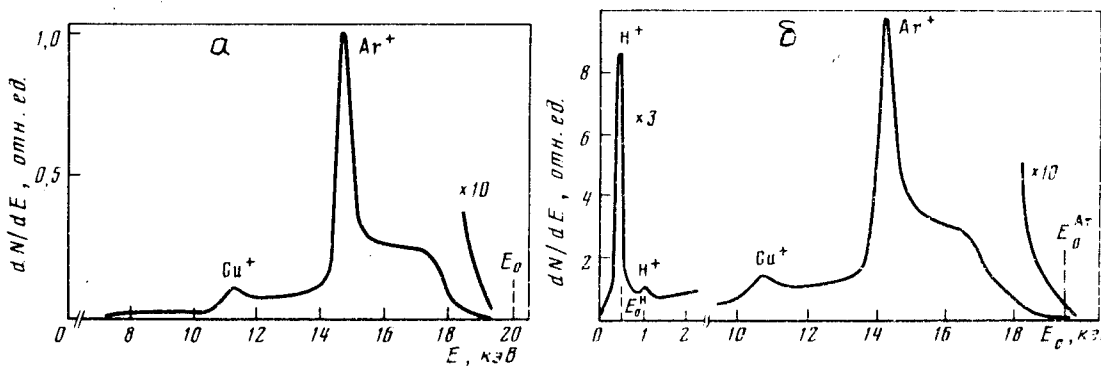


Рис. 2, а. Энергетический спектр рассеянных ионов при бомбардировке мишени ионами  $\text{ArH}^+$  с энергией 20 кэВ,  $\theta = 40^\circ$ , медная мишень

Рис. 2, б. То же при бомбардировке ионами  $\text{Ar}^+$  с энергией 20 кэВ

Энергетический спектр рассеянных ионов, полученный при бомбардировке меди молекулярными ионами  $\text{ArH}^+$  приведен на рис. 2, а. Кинетическая энергия иона  $\text{ArH}^+$  составляла 20 кэВ, из которых на долю протона приходилось 488 эВ. Для сравнения на рис. 2, б приведен спектр, полученный в тех же самых условиях при облучении атомарными ионами  $\text{Ar}^+$ , энергия которых была 20 кэВ. Этот спектр имеет вполне обычный вид: в нем присутствует пик ионов  $\text{Ar}^+$ , испытавших рассеяние на атомах мишени и пик ионизованных атомов отдачи мишени. В низкоэнергетической части спектра никаких дополнительных пиков не обнаружено.

В спектрах, полученных при использовании ионов  $\text{ArH}^+$  два типичных пика также присутствуют, но они оказываются слегка сдвинутыми влево. Этот сдвиг близок к тому, который обусловлен простой разницей в начальных энергиях ионов аргона, однако, несколько превосходит его. Кроме "обычных" пиков, обусловленных рассеянием ионов аргона, в низкоэнергетической части спектра появляются два новых пика. Эти максимумы не могут происходить от парных соударений ионов аргона с атомами меди. В противном случае пришлось бы предположить исключительно высокую для данных условий кратность заряда ионов, ответственных за эти пики (13 для аргона и 22 -- для меди). Между тем, в спектрах не было обнаружено ни-

каких других многозарядных ионов, кроме двухзарядных. Подчеркнем снова, что в спектрах, полученных при облучении ионами аргона эти пики отсутствуют.

Положение правого из этих пиков совпадает с расчетным положением пика протонов отдачи, если партнерами соударения являются ионы аргона с энергией 19512 эВ и покоящиеся протоны. Вообще говоря, выбиваемыми частицами могут быть как протоны, прибывающие на поверхность вместе с ионами аргона, т.е., находящиеся в составе молекулярного иона  $ArH^+$ , так и протоны, внедренные в мишень на более ранних этапах ее облучения ионами  $ArH^+$ .

Левый пик обусловлен рассеянием тех протонов, энергия которых равнялась 488 эВ, когда они входили в состав 20 килоэлектровольтового молекулярного иона с тяжелым ядром. Ширина этого пика на половине высоты составляет около 30 % и он расположен в высокоэнергетической части "своего" спектра. Напомним, что подобный результат совершенно нехарактерен для рассеяния протонов более высоких энергий, когда получаются не пики, а, скорее, широкие купола, простирающиеся практически через весь спектр (см. <sup>1</sup>). Таким образом, снижение энергии протонов, бомбардирующих мишень, приводит к сужению их энергетических спектров в рассеянном потоке.

Обратим внимание на то, что полученные спектры несут отчетливые следы "молекулярного" происхождения бомбардирующих протонов. Положение правого края пика рассеянных протонов свидетельствует о том, что в потоке рассеянных частиц присутствуют протоны с энергией, заметно превышающей их начальную кинетическую энергию. В свою очередь, к высокоэнергетическому склону пика аргона примыкает длинный пологий "хвост", входящий в область энергий, больших 19512 эВ. При облучении атомарными ионами аргона "хвосты" отсутствуют и в спектре не наблюдается ионов с энергией, превышающей их начальную кинетическую энергию. Наблюдаемые особенности спектров говорят о том, что при рассеянии молекулярных ионов происходит значительный обмен энергией между их компонентами. Этот обмен может происходить либо вследствие рассеяния ядер друг на друге, либо вследствие диссоциации, при которой внутренняя энергия иона переходит в дополнительную кинетическую энергию его фрагментов. Для того, чтобы установить, какой из этих механизмов реализуется в действительности, нужны детальные измерения тех участков спектра, которые различаются в случае молекулярных и атомарных бомбардирующих ионов.

Авторы признательны О.Б.Фирсову за полезную дискуссию.

#### Литература

1. *Машкова Е.С., Молчанов В.А.* Рассеяние ионов средних энергий поверхностями твердых тел. М.: Атомиздат, 1980 г., стр. 106.