

02; 10; 11; 12

© 1992

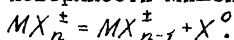
ИОНЫ „ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ЭНЕРГИЙ“  
ВО ВТОРИЧНО-ИОННОЙ ЭМИССИИА.А. Д о р о ж к и н, А.П. К о в а р с к и й,  
А.В. Л и-Ф а т у

Одним из важных источников информации о процессах вторично-ионной эмиссии являются энергетические спектры распыленных ионов. На характер получаемой информации влияет и методика измерений спектров. В приборах с источниками вторичных ионов, базирующихся на статических магнитных анализаторах, между бомбардируемой мишенью и вытягивающим электродом создается электростатическое поле с достаточно высокой напряженностью. В частности, в семействе ионных микроанализаторов *CAMECA* (приборы *IMS 300*, *IMS 3f*, *IMS 4f*) напряженность этого поля составляет 900 В/мм [1]. Измерения энергоспектров в таких приборах приводит к появлению „отрицательных“ хвостов, анализ которых позволяет получить дополнительную информацию о процессах образования вторичных ионов. Анализу причин появления „хвостов“ в энергетических спектрах вторичных ионов и посвящена данная работа.

Измерения проводили на ионном микроанализаторе *IMS 4f*, схема которого изображена на рис. 1. Для отбора и ускорения ионов между образцом (1) и вытягивающим электродом иммерсионной линзы (2) прикладывается потенциал  $\pm 4.5$  кВ, магнитный анализатор (6) настраивается на значение анализируемой массы, энергетическая щель (5) устанавливается на ширину 70 мкм, что соответствует полосе пропускания 3эВ и запись энергоспектра, осуществляется автоматически, с помощью ЭВМ, путем сканирования ускоряющего напряжения в интервале  $\pm 130$  В [2].

На рис. 2 в качестве примера даны энергетические спектры ионов  $Al^+$  (кривая 1),  $Al^{++}$  (кривая 2) и  $AlO^+$  (кривая 3), записанные в указанном режиме. Мишень-образец поликристаллического алюминия, бомбардировалась положительными ионами кислорода с энергией 5,5 кэВ и плотностью тока  $100 \text{ мкА/см}^2$ . Появление ионов в энергоспектре, регистрируемых при потенциале мишени меньшем 4,5 кВ (ионы с „отрицательной начальной энергией“) может быть обусловлено, в основном, следующими механизмами:

1. Поверхность покидает молекулярный ион  $MX_n^{\pm}$  в колебательно возбужденном состоянии, который на некотором расстоянии от поверхности мишени распадается по реакции:



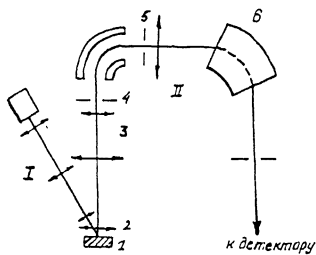


Рис. 1. Схема прибора *IMS-4F (CAMECA*, Франция). I – система формирования первичного пучка, II – масс-спектрометр: 1 – образец, 2 – иммерсионная линза, 3 – оптика переноса изображения, 4 – полевая апертура, 5 – энергетическая щель, 6 – магнитный анализатор.

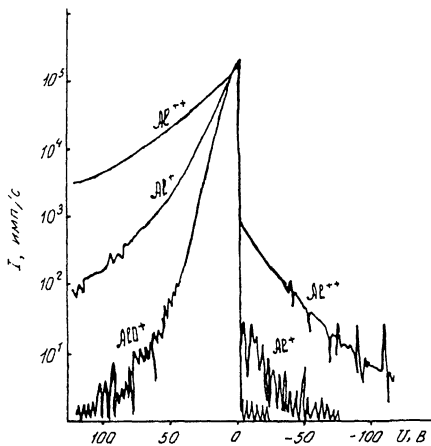


Рис. 2. Измеренные энергоспектры положительных ионов, выбиваемых из алюминиевой мишени. Бомбардировка ионами  $O_2$  ( $E=5.5\text{ keV}$ ,  $J=100\text{ mA/cm}$ ). Кривые: 1 – ионы  $Al^+$ , 2 – ионы  $Al^{++}$ , 3 – ионы  $AlO^+$ . (Спектры приведены к одинаковому сигналу в максимуме).

Часть энергии ускоренного иона уносится отщепившейся нейтральной частицей, и „дочерней“ ион получает энергию, меньшую номинального ускоряющего напряжения.

2. Мишень покидает частица в нейтральном состоянии, которая приобретает заряд на некотором расстоянии от поверхности. Механизмы такой ионизации могут быть описаны следующими реакциями:

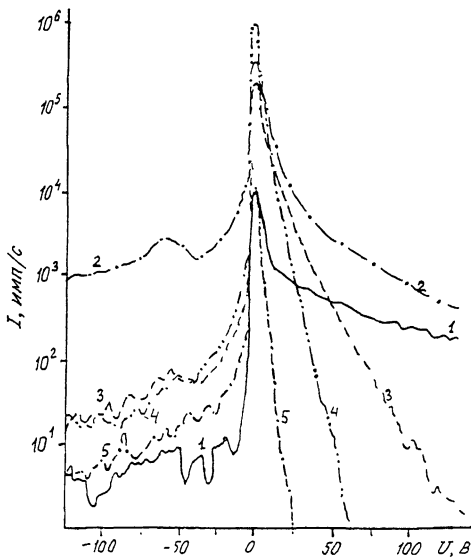


Рис. 3. Измеренные энергоспектры отрицательных ионов, выбиваемых из ванадиевой мишени. Бомбардировка ионами  $Cs^+$  ( $E = 14.5 \text{ keV}$ ,  $J = 100 \text{ mA/cm}$ ). Кривые 1 ( $^{51}$ ), 2 ( $^{52}$ ); 3 ( $^{53}$ ); 4 ( $^{54}$ ); 5 ( $^{55}$ );

2.1  $A^* = A^+ + e$  ( $A^*$  атом в автоионизованном состоянии);

2.2  $A X^0 = A^+ + X^-$  (в частном случае  $A = X$ );

2.3  $A^0 + N^+ = A^+ + N^0$  (ионизация атома либо первичными, либо вторичными частицами).

В настоящее время считают, что вероятность последнего процесса, в силу отсутствия определяемых в эксперименте ряда зависимостей, в частности, от плотности тока бомбардировки, углов падения первичных и регистрации вторичных, крайне мала.

Образование ионов по предлагаемым механизмам приводит к тому, что такие ионы „не добирают“ часть энергии, находясь вначале в нейтральном состоянии. В приближении однородного поля между мишенью и вытягивающим электродом иммерсионной линзы для „отрицательной“ части энергоспектра можно написать следующие выражения

Для процесса реализуемого по механизму 1:

$$\frac{dN}{dE} = N_0 \exp[-\sqrt{2mE} \cdot L / eU_0 \tau] \cdot L \sqrt{m} / eU_0 \tau \sqrt{2E}. \quad (1)$$

Для процесса по механизму 2:

$$\frac{dN}{dE} = N_0 \exp[-E \cdot L / eU_0 \tau \bar{U}] \cdot L / eU_0 \tau \bar{U}, \quad (2)$$

где  $L$  и  $U_0$  — расстояние и разность потенциалов между вытягивающим электродом и мишенью,  $\tau$  — время жизни (распада) нейтральной частицы,  $E$  — энергия ионов,  $N_0$  — поток частиц, покидающих мишень в колебательном (или автоионизованном) состоянии,  $m$  — масса отщепившегося атома,  $\bar{v}$  — средняя скорость распыленной нейтральной частицы.

Из приведенных выражений следует, что форма рассматриваемой части спектра зависит от механизма его образования: для 1 случая  $\ln(dN/dE) \sim C - k\sqrt{E}$ , для 2 случая  $\ln(dN/dE) \sim C - kE$ . Измерив экспериментально величину „ $k$ “, можно оценить время  $\tau$ , а зная время, можно подсчитать  $N_0$ , исходя из значения  $dN/dE$  для  $E=0$ . Таким образом, анализ „отрицательных хвостов“ измеряемых энергоспектров позволяет, в принципе, получить достаточно обширную информацию о процессах ионообразования при распаде распыленных частиц.

Вернемся к зависимостям, приведенным на рис. 2, где показаны энергетические спектры ионов  $Al^+$ ,  $Al^{++}$  и  $AlO^+$ , измеренные при бомбардировке металла ионами  $O_2^+$  (8 кэВ). Для молекулярных ионов  $AlO^+$  „отрицательных хвостов“ не наблюдается, в пределах погрешности измерений, что можно рассматривать как указание на то, что образования таких ионов в результате распада более сложных оксидных комплексов не происходит. В какой-то мере это подтверждается тем, что в масс-спектре выход таких ионов, как  $Al_2^+$  или  $Al_2O^+$ , много меньше, чем  $AlO^+$ . Для  $Al^+$  наблюдаются ионы „отрицательных“ энергий, причем зависимость  $\lg(dN/dE)$  от  $E$  близка к линейной, т. е. образование этих частиц происходит в результате распада изначально нейтральных частиц. Происходящие процессы могут быть представлены реакциями:  $Al^* = Al^+ + e$ , либо  $AlO^0 = Al^+ + O^-$ . Из эксперимента „ $\tau$ “ для такого процесса составляет  $10^{-9}$ – $10^{-10}$  с, что позволяет исключить из рассмотрения автоионизацию атома алюминия и в качестве основного механизма рассматривать распад молекулы  $AlO^0$ . Для двухзарядных ионов „отрицательный хвост“ также имеет место, но в этом случае  $\lg(dN/dE) \sim C - k\sqrt{E}$ , что говорит о распаде над поверхностью заряженных частиц  $Al^{*++} = Al^{++} + (Oже-процесс)$ . Однако оценка величины „ $\tau$ “ дает  $10^{-9}$  с, что существенно выше времени Оже-процесса ( $\sim 10^{-14}$  с). Это заставляет предполагать следующий процесс:  $AlO = Al^{++} + O^-$ . Можно полагать, что и для других элементов при бомбардировке ионами  $O_2^+$  такой процесс имеет место.

Для некоторых мишеней мы наблюдали спектры ионов „отрицательных энергий“ весьма специфической формы, на первый взгляд не объяснимой в рамках изложенных представлений. Так, на рис. 3 приведены энергетические спектры отрицательных ионов ванадия и водородсодержащих комплексов этого металла. Сходные по форме спектры наблюдались для ниобия и тантала. Для ряда молекулярных ионов каждого из этих металлов вместо плавно спадающих в области „отрицательных энергий“ хвостов наблюдаются два отчетливо выраженных максимума. Появление особенностей такого типа связано с распадом иона  $MeH_n^x$ , причем с отщеплением только одного

или двух протонов. При этом время такого распада достаточно велико ( $> 5 \cdot 10^{-8}$  с). Соответственно, уносимая протонами энергия, равна  $eU_0/A_{MeH_n}$  или  $2eU_0/A_{MeH_n}$  (где  $A_{MeH_n}$  - молекулярный вес соответствующего гидридного комплекса). Анализ таких спектров также позволяет получать информацию о формировании комплексных ионов в возбужденном состоянии и их распаде. Более подробно эти результаты и их интерпретация будут рассмотрены позднее.

В заключение отметим, что анализ структуры энергетических спектров вторичных ионов „отрицательных энергий“ может стать источником нетривиальной информации о процессах их образования, хотя эта структура во многом определяется конструктивными особенностями используемого прибора.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] B e n n i n g h o v e n A., R u d e n a u e r F.G., W e r n e r H.W. Secondary Ion Mass Spectrometry; NY; John Wiley & Sons. 1987.
- [2] R u d a t M.A., M o r r i s o n G.H. //Surf.Sci. 1979. V. 82. P. 549.

Поступило в Редакцию  
28 июля 1992 г.