

- [3] Yamada H., Sakamoto S., Nakao Y. // J. Electrostatics. 1979. V. 7 P. 155-166
- [4] Clements J.S., Sato M., Davis R.H. // IEEE Trans, Industry Application, 1987, V. 23. N 2. P. 224-234.
- [5] Каляцкий И.И., Кривко В.В. В сб.: Пробой диэлектриков и полупроводников. Томск, 1964. С. 249-251.
- [6] Климкин В.Ф., Пономаренко А.Г. // ЖТФ. 1979. Т. 49. В. 9. С. 1896-1904.

Новосибирский
государственный
университет
им. Ленинского комсомола

Поступило в Редакцию
5 июня 1989 г.
В окончательной редакции
29 декабря 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 16 вып. 4
02; 11; 12

26 февраля 1990 г.

© 1990

МОНОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ РАСПАДЫ КЛАСТЕРОВ Al_n^+ ($n < 25$)
И Si_n^+ ($n < 12$), РАСПЫЛЕННЫХ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКОЙ

А.Д. Беккерман, Н.Х. Джемилев,
В.М. Ротштейн

Распыление поверхности твердых тел в виде кластерных ионов — явление, природа которого до конца не выяснена. Исследования последних лет показали, что кластерные ионы, покидающие область бомбардировки, могут испытывать мономолекулярные распады, происходящие вследствие избыточной энергии, накопленной кластером в процессе его образования [1, 2].

В данной работе приводятся экспериментальные результаты изучения роли мономолекулярных распадов кластерных ионов в формировании масс-спектра частиц, распыленных с поверхности Al и Si . Уделено особое внимание определению наиболее вероятных направлений мономолекулярных распадов кластерных ионов Al_n^+ и Si_n^+ и установлению связи между регистрируемыми осколочными ионами и спектром основных ионов. Методика измерений подробно описана в работе [3]. Измерения проводились при бомбардировке поликристаллических образцов ионами He^+ с энергией 8,5 кэВ, плотностью тока в пучке 1 мА/см². Пучок разворачивался в растр 500x500 мкм на поверхности образца. Для устранения влияния неоднородности травления поверхности образца на точность измерений отбор вторичных ионов производился из центрального участка растра травления размером 200x200 мкм.

На рис. 1 представлена зависимость вероятности распадов кластерных ионов Al_n^+ в бесполовой зоне масс-спектрометра (до входа

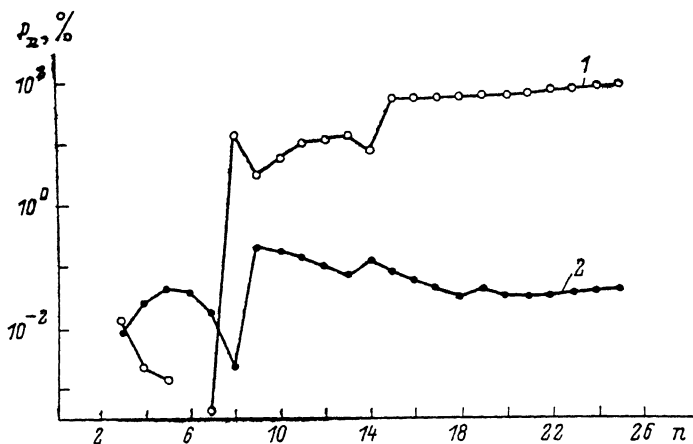


Рис. 1. Зависимость вероятности распада кластерных ионов (P%) от числа атомов AL_n^+ в ионе. 1 - вид распада $AL_n^+ \rightarrow AL_{n-1}^+ + AL$, 2 - вид распада $AL_n^+ \rightarrow AL^+ + AL_{n-1}$.

в масс-анализатор) от числа атомов в материнском ионе. Вероятность вычисляется как:

$$P = I_f(AL_k^+) / [I(AL_n^+) + I_f(AL_k^+)] \times 100\%, \quad (1)$$

где $I(AL_n^+)$ - интенсивность пика основных ионов, $I_f(AL_k^+)$ - интенсивность осколочных ионов, n и k - число атомов в материнском и осколочном ионах соответственно.

Как видно из рис. 1, были зарегистрированы переходы двух видов:



Следует отметить, что мономолекулярные распады вида (2), когда заряд остается на большем фрагменте, были ранее найдены для кластерных ионов $Ta_n^+, Nb_n^+, Cu_n^+, Ag_n^+$ ($n \leq 25$) [1-3]; Cu_n^+, AL_n^+, Si_n^+ ($n \leq 21$) [4]. Однако распады вида (3), т.е. с отрывом атомарного иона, удалось наблюдать впервые благодаря специальным мерам, принятым при разработке прибора для эффективного сбора и формирования потока распыленных вторичных ионов.

Из рис. 1 видно, что кластерные ионы AL_n^+ с числом атомов $n \leq 7$ преимущественно распадаются с отрывом атомарного иона AL^+ , тогда как для $n > 7$ преобладают реакции типа (2). Фрагментация с отрывом атомарного иона наблюдается вплоть до самых

больших номеров кластеров, и вероятность этой реакции имеет заметную корреляцию с вероятностью обратного процесса, т.е. с увеличением вероятности фрагментации по реакции типа (2) вероятность фрагментации по реакции типа (3) уменьшается, и наоборот. При исследовании фрагментации кластерных ионов Si_n^+ также были зарегистрированы реакции с выбросом атомарного иона, но лишь для кластеров, содержащих 3, 4 и 6 атомов. Вероятность этих реакций несколько ниже, чем для соответствующих ионов Al_n^+ и составляет $6 \cdot 10^{-4}\%$, $10^{-3}\%$, $2 \cdot 10^{-3}\%$ соответственно.

Характер распада можно объяснить если исходить из энергетических соображений, согласно которым преимущественный канал распада соответствует минимальному значению энергии, требуемой для разрыва связи и стабильности структур образующихся осколков. Кроме того, распад с сохранением заряда на меньшем осколке из общих соображений должен быть маловероятен. Следовательно, наличие обнаруженных нами распадов свидетельствует о том, что структура нейтральных кластеров Al_n с $n \leq 7$ энергетически более выгодна, чем кластерных ионов Al_n^+ с $n > 7$.

Реакции фрагментации кластерных ионов, рассмотренные выше, имеют место на далеких расстояниях от мишени и соответствуют временному интервалу $5 \cdot 10^{-7} - 10^{-5}$ с. Как было показано нами ранее [5], большая часть возбужденных кластеров распадается в зоне ускорения вторичных ионов, с временами жизни $\tau \leq 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-9}$ с. Об этом свидетельствуют затяжные „хвосты“ в низкоэнергетической части спектральных линий кластеров [5].

Доказательством наличия распадов кластеров Al_n^+ и Si_n^+ в зоне ускорения могут служить результаты, представленные на рис. 2, где показаны энергетические спектры ионов Al^+ , Al_6^+ , Al_7^+ и Si^+ , Si_5^+ . Обращает на себя внимание наличие длинных хвостов в области отрицательных энергий у исследованных ионов (рис. 2). Очевидно, что количество ионов распадного происхождения, регистрируемых с соответствующим дефицитом энергии, можно охарактеризовать высотой и наклоном левой ветви энергоспектра относительно оси абсцисс. Если предположить, что здесь имеют место те же процессы, что и в бесполовой зоне, и наиболее вероятные направления реакций фрагментации те же, что становится понятным более существенный подъем и протяженность хвоста распределения ионов Al_7^+ по сравнению с Al_6^+ . Это связано с тем, что ионы Al_7^+ являются продуктами реакции фрагментации $Al_8^+ \rightarrow Al_7^+ + Al$, вероятность которой почти на 4 порядка выше, чем реакции $Al_7^+ \rightarrow Al_6^+ + Al$. Для ионов Al_n^+ с $n \leq 7$ преимущественным направлением распадов является распад с выбросом атомарного иона (рис. 1). Именно это приводит к тому, что в энергетическом спектре атомарных ионов Al^+ появляется протяженный хвост в области отрицательных энергий. Атомарные ионы Si^+ имеют подобный энергетический спектр, но с менее выраженной левой ветвью распределения, что связано с существенно меньшей вероятностью реакции (3) для ионов Si_n^+ .

Становится ясно, что линии атомарных ионов Al^+ и Si^+ в масс-спектрах вторичной ионной эмиссии (ВИЭ) алюминия и крем-

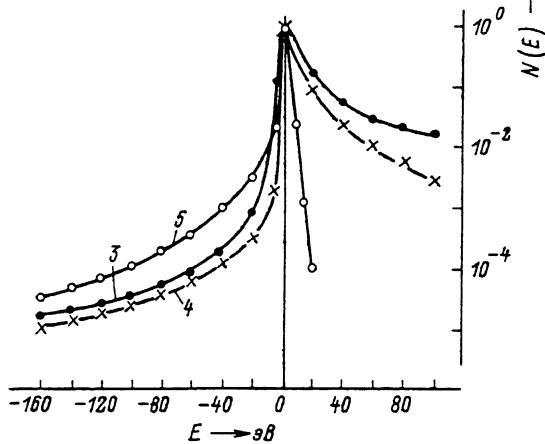
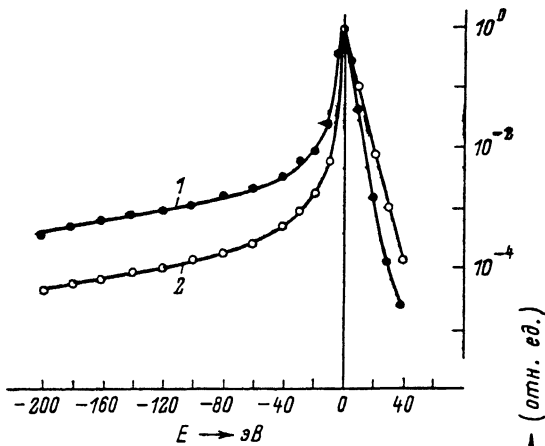


Рис. 2. Энергетические спектры вторичных ионов, распященных из алюминия и кремния ионами Xe с энергией 8,5 кэВ. 1 - ионы Al_7^+ , 2 - Al_6^+ , 3 - Al^+ , 4 - Si^+ , 5 - Si_5^+ .

ния представляют собой наложение линий осколочных ионов на линии атомарных ионов исходного происхождения. В нашем эксперименте применяется первичное ускорение эмиттированных ионов с поверхности мишени ($eU \approx 5000$ эВ), позволяющее на энергосекторах отделить кластерные ионы, претерпевающие распады, с $T \leq 10^{-7}$ с. Во вторично-ионных масс-спектрометрах, в которых первичное ускорение мало, (квадрупольные масс-спектрометры), обязательно линии атомарных ионов (также, как кластерных ионов) представляют собой суммарные линии фрагментов и ионов исходного происхождения. По-видимому, этим обстоятельством можно объяснить, что алюминий и кремний - вещества, имеющие аномаль-

но высокий выход атомарных ионов по сравнению с другими исследованными материалами [6]. Поскольку при разработке модели процесса ионизации атомов во ВИЭ часто для сравнения теории с экспериментом привлекаются и экспериментально найденные коэффициенты ВИЭ без учета вклада в атомарный поток фрагментных ионов, то трудно ожидать согласия теории с экспериментом, по крайней мере для исследованных металлов (Al и Si) [6].

Результаты, приведенные выше, позволяют также сделать другой важный вывод: при распылении алюминия и кремния тяжелыми ионами в результате реакции фрагментации вида (3) в потоке частиц, эмиттируемых с поверхности, в значительном количестве должны присутствовать нейтральные кластеры Al_n с числом атомов $n=2-7$ и Si_n с $n=2-5$.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Джемилев Н.Х., Верхотуров С.В. // Изв. АН СССР. 1985. Т. 49. № 9. С. 1831-1837.
- [2] Dzhemilev N.Kh., Rasulev U.Kh., Verkhoturov S.V. // Nucl. Instr. and Meth., ser. B. 1987. V. 29. P. 531.
- [3] Джемилев Н.Х., Верхотуров С.В., Расулев У.Х. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1986. № 2. С. 86-91.
- [4] Vegemann W., Meiwes-Bröer K.H., Lutz H.O. // Phys. Rev. Lett. 1986. V. 56. N 21. P. 2248-2251.
- [5] Верхотуров С.В., Веревкин И.В., Джемилев Н.Х. // Изв. АН СССР. сер. физ. 1988. Т. 53. № 8. С. 1631-1635.
- [6] Векслер В.И. Вторичная ионная эмиссия металлов. М.: Наука, 1978. 239 с.

Институт электроники
им. К.А. Арифова
АН Узбекской ССР

Поступило в Редакцию
19 декабря 1989 г.