

ДВУХЗАРЯДНЫЕ ИОНЫ В МАСС-СПЕКТРАХ ВТОРИЧНО-ИОННОЙ ЭМИССИИ

© А.А.Дорожкин, А.П.Коварский, А.В.Филимонов

Санкт-Петербургский государственный технический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия
(Поступило в Редакцию 23 февраля 1995 г.)

Проблема генерации многозарядных ионов в настоящее время один из наименее изученных вопросов во вторично-ионной эмиссии и вторично-ионной масс-спектрометрии. Количество экспериментальных и теоретических исследований здесь весьма ограничено [1,2], что связано, по-видимому, с незначительным практическим применением этого явления. Однако задача об образовании многозарядных ионов с физической точки зрения совсем нетривиальна. Можно утверждать, что механизм формирования зарядового состояния таких частиц принципиально отличен от однозарядных, а это дает основание предполагать, что наблюдение за многозарядными ионами позволит получить новую информацию как о физических процессах, так и о поверхности твердого тела. В связи с этим нами проведено систематическое исследование эмиссии двухзарядных ионов для широкого набора материалов при облучении их ионами аргона.

Все измерения проведены на ионном микроанализаторе IMS-4f фирмы САМЕСА. Исследуемые образцы облучались отсепарированным пучком ионов Ar^+ с энергией 6.5кэВ, вторичные частицы отбирались линзой-экстрактором (потенциал мишени 4.5кВ, линзы — 0В) и анализировались по массам спектрометром с двойной фокусировкой. Обычное разрешение $M/\Delta M = 500$. Предусмотрена возможность анализа вторичных ионов по энергиям путем изменения потенциала мишени в пределах ± 130 эВ. Все образцы подвергались предварительной очистке ионной бомбардировкой до тех пор, пока результаты измерений переставали зависеть от времени предварительной очистки ($\approx 10-20$ мин). Для сравнения были проведены измерения с использованием ионов O_2^+ . Наряду со значениями тока вторичных ионов для описания эмиссии двухзарядных ионов вводим относительный выход двухзарядных ионов (I^{++}/I^+). Введение этой величины связано со следующим обстоятельством. Отношение $I^{++}/I^+ = (S \cdot k \cdot I_0 \cdot \beta^{++}) / (S \times k \cdot I_0 \cdot \beta^+)$, где S — коэффициент распыления материала, I_0 — ток первичных ионов, k — приборная функция, β — коэффициент ионизации распыленных частиц (однократной или двукратной), т.е. $R = I^{++}$ (более чем на два порядка), тогда как I^+ практически не изменяется. Отмеченная особенность имеет более общий характер (не только для кислорода). Изменение состояния и состава поверхности образцов (адсорбция, окисление и т.д.) очень сильно влияют на степень ионизации для однозарядных частиц и практически не меняют эту величину для двух (и более) зарядных ионов.

Были проведены измерения зависимости R от энергии первичных частиц E_0 . Характерный результат, полученный при облучении SiC

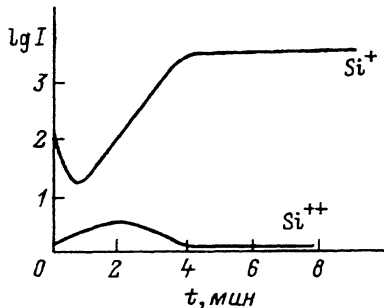


Рис. 1. Зависимость выхода ионов Si^+ и Si^{++} от времени облучения мишени (мишень SiC , первичные частицы O^+ с энергией 2 кэВ).

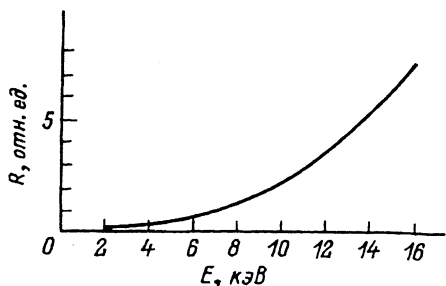


Рис. 2. Зависимость относительного выхода двухзарядных ионов R от энергии первичных частиц E_0 (мишень SiC , первичные частицы O^+).

ионами O^+ , представлен на рис. 2. Учитывая, что величина β^+ от энергии E_0 практически не зависит [3], можно полагать, что приведенная кривая отражает зависимость β^{++} от E_0 . Таким образом, вторая, характерная для двухзарядных ионов, особенность — β^{++} зависит от E_0 , возрастая с ростом этой величины, причем при малых энергиях β^{++} весьма мала и похоже, что зависимость $\beta^{++}(E_0)$ имеет пороговый характер ($E_{0\text{пор}}$ для $\text{Si} \approx 1$ кэВ).

Была предпринята попытка установить зависимость β^{++} от природы первичных частиц. Проведены измерения для ионов Ne^+ , Ar^+ , Xe^+ , O_2^+ , O^- , Cs^+ , однако установить более или менее однозначную зависимость пока не удалось.

Измерялись также и энергетические спектры вторичных ионов. Напомним, что при таких измерениях мишень находилась $I^{++}/I^+ = \beta^{++}/\beta^+$ и не зависит от величин I_0 , k и S .

В табл. 1 приведены результаты измерений для некоторых элементов и ионов Ar^+ .

Обычные значения $R \approx 10^{-3}$, хотя для некоторых элементов эта величина достигает 10^{-2} и даже 10^{-1} . Наименьшие значения R наблюдаются для Ga , но это связано в основном с большими значениями β^+ для этого элемента. Аналогичные данные для ионов O_2^+ приведены в табл. 2.

Двухзарядные ионы достаточно четко регистрируются и в этом случае, величины R существенно меньше, чем для ионов Ar^+ .

Таблица 1.

Элемент	R
As	$1.6 \cdot 10^{-2}$
Ga	$3.8 \cdot 10^{-5}$
Ge	$4.0 \cdot 10^{-3}$
Si	$1.8 \cdot 10^{-1}$
C	$2.0 \cdot 10^{-3}$
Ta	$1.6 \cdot 10^{-3}$

Таблица 2.

Элемент	R	Элемент	R
Al	$7.5 \cdot 10^{-5}$	In	$1.0 \cdot 10^{-5}$
Na	$3.6 \cdot 10^{-6}$	Ga	$1.3 \cdot 10^{-5}$
Ca	$4.5 \cdot 10^{-3}$	Ta	$5.0 \cdot 10^{-4}$
K	$5.0 \cdot 10^{-6}$	Cu	$6.0 \cdot 10^{-4}$
Si	$4.0 \cdot 10^{-5}$	Cd	$1.4 \cdot 10^{-3}$

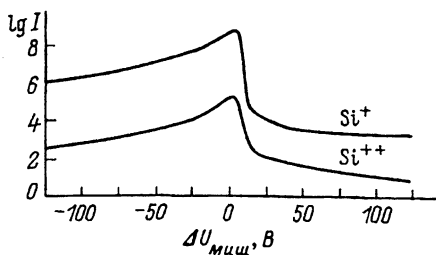


Рис. 3. Энергетические спектры Si^+ , Si^{++} при облучении SiC ионами Ar^+ с энергией 6.5 кэВ.

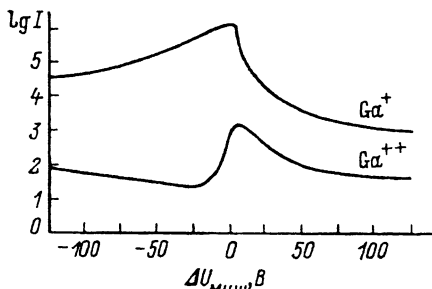


Рис. 4. Энергетические спектры Ga^+ , Ga^{++} при облучении Ga ионами Ar^+ с энергией 6.5 кэВ.

($\approx 10^{-4} - 10^{-6}$). Однако это обстоятельство обусловлено не уменьшением выхода двухзарядных ионов, а хорошо известным увеличением β^+ для однозарядных ионов [3].

Показателен с этой точки зрения результат, представленный на рис. 1, где приведены зависимости выхода ионов Si (I^{++} и I^+) при облучении SiC ионами O^+ от времени облучения образца. Изменения тока ионов на начальном участке зависимостей обусловлены насыщением приповерхностного слоя образца кислородом. При этом наблюдается характерный рост тока под потенциалом 4.5 ± 0.15 кэВ, тогда как линза-экстрактор — под потенциалом земли, т. е. во время измерений у поверхности мишени существовало достаточно сильное электрическое поле. Это, в частности, приводит к появлению в спектрах ионов “отрицательных энергий” [4]. Их возникновение связано с частицами, формирование окончательного состояния которых происходит над поверхностью мишени, и соответственно анализ этих частей спектров несет информацию об этих процессах.

На рис. 3 приведены энергетические спектры вторичных ионов, полученные при облучении карбида кремния ионами аргона. В области положительных энергий спектры Si^+ и Si^{++} близки по форме и с удовлетворительным приближением описываются уравнением $1/E^{1.8-2}$, т. е. близки к распределению нейтралей по Зигмунту [5]. В отрицательной области для тех и других ионов наблюдаются протяженные хвосты, которые удовлетворительно описываются экспонентой $\exp(-a \cdot E^{0.5})$. В соответствии с [6] можно сделать вывод, что эти ионы образуются над поверхностью в результате распада молекулярных ионов, выбитых в колебательно-возбужденном состоянии, причем время жизни таких возбужденных частиц достаточно велико ($\sim 10^{-7} - 10^{-9}$ с). Столь большие времена жизни устраняют из рассмотрения в качестве возможных механизмов образования таких частиц оже- или автоионизационные переходы в распыленных одноатомных частицах.

Существенно отличные результаты были получены при измерениях спектров для Ga, Ge, GaAs. Типичный пример показан на рис. 4. Для положительных энергий вместо максимума заметный спад, при увеличении энергии кривая выходит на плато и идет в область энергий > 150 эВ. В области отрицательных энергий форма спектра более или менее обычная, но абсолютный выход ионов в этой области весьма велик и даже превышает сигнал в области положительных энергий.

На основе полученных результатов можно высказать некоторые соображения по поводу механизмов образования двухзарядных ионов. Обычно полагают, что такие ионы образуются в результате оже-процесса в атоме, выбитом из мишени с вакансией на одной из внутренних оболочек [7]. Однако оже-процессы в атомах протекают достаточно быстро ($t \approx 10^{-14} - 10^{-16}$ с), и такие ионы в области отрицательных энергий мы наблюдать не можем ($\Delta E \approx 0.01$ эВ). Для наблюдаемых нами хвостов в отрицательные энергии времена жизни возбужденных состояний $10^{-6} - 10^{-9}$ с, что соответствует временам жизни распыленных молекул в возбужденном состоянии. Поэтому можно предположить, что по крайней мере часть двухзарядных ионов (в ряде случаев весьма значительная) образуется по одному из механизмов $MO^+ \rightarrow M^{++} + O^-$, $M_2^+ \rightarrow M^{++} + M^-$ или $GaAs^+ \begin{cases} Ga^{++} + As^- \\ As^{++} + Ga^- \end{cases}$. При этом в ряде случаев весьма вероятно нейтрализация двухзарядного иона (резонансная) при его отлете от поверхности.

Высказанные предположения позволяют по крайней мере качественно объяснить полученные результаты, в том числе и не совсем обычные (Ga, Ge, GaAs).

Список литературы

- [1] *Benninghoven, Redenauer F.G., Werner W. Secondary Ion Mass Spectrometry. 1987.*
- [2] *Попов В.Ф. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 9. С. 102.*
- [3] *Векслер В.И. Вторично-ионная эмиссия металлов. М.: Наука, 1978.*
- [4] *Ли-Фату А.В., Дорожкин А.А., Коварский А.П. // Изв. РАН. Сер. физ. 1992. Т. 56. № 6.*
- [5] *Распыление твердых тел ионной бомбардировкой / Под ред. Р. Бериша. М.: Мир, 1986.*
- [6] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. М.: Наука, 1989.*
- [7] *Joyes P. // J. Phys. 1968. Vol. 30. N 4.*

