

УДК 537.564

МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЯ ИОНОВ, ЭМИТТИРУЕМЫХ ПРИ СОУДАРЕНИИ УСКОРЕННЫХ ПЫЛИНОК С МИШЕНЬЮ

Л. С. Новиков, Н. Д. Семкин,
В. С. Куликаускас, С. М. Семенчук,
В. П. Кирюхин

На электростатическом ускорителе микрочастиц с помощью масс-спектрометрического преобразователя времяпролетного типа получены масс-спектры ионов, эмиттируемых при ударах металлических частиц микронных размеров со скоростями $v=0.25-13$ км·с⁻¹ о металлических мишенях. Показано, что при $v < 1$ км·с⁻¹ эмиссия ионов обусловлена электрическим разрядом, возникающим при приближении заряженной микрочастицы к мишени.

Явление эмиссии в вакууме электронов и ионов при соударении быстрых микрочастиц с мишенью положено в основу работы различных приборов, используемых на космических аппаратах для регистрации и измерения параметров микрометеорных частиц, а также в лабораторных экспериментах с ускоренными микрочастицами. По величине суммарного электронного или ионного заряда, эмиттируемого при соударении, можно судить о скорости и массе регистрируемой частицы, а спектр масс эмиттируемых ионов дает, кроме того, информацию о химическом составе частицы и о физико-химических процессах, протекающих при ударном сжатии и нагревании вещества в области соударения частицы с мишенью [1-4]. Однако физические механизмы и количественные характеристики ионной эмиссии, возникающей в таких условиях, изучены пока недостаточно, особенно при скоростях соударения $v \leq 10$ км·с⁻¹.

В настоящей работе приведены некоторые данные об эмиссии ионов при скоростях соударения $v=0.25-13$ км·с⁻¹, полученные на электростатическом ускорителе микрочастиц с помощью времяпролетного масс-спектрометрического преобразователя. Показано, что при $v < 1$ км·с⁻¹ эмиссия ионов обусловлена электрическим разрядом, присходящим при приближении заряженной микрочастицы к мишени.

Методика эксперимента была подобна описанной в [3]. Использовались частицы из Al, Cr и Fe диаметром $d \approx 0.1-5$ мкм с массами $m \approx 10^{-18}-10^{-13}$ кг и мишени из Ag, Cr, Nb. Частицам сообщался контактным способом положительный заряд $q \approx 10^{-15}-10^{-12}$ Кл, и далее они инжектировались в трубку электро-статического ускорителя, напряжение на которой составляло от 100 до 500 кВ в зависимости от задач эксперимента. Информация о скоростях и собственных зарядах частиц получалась с помощью кольцевых индукционных датчиков и регистрировалась многоканальными амплитудными анализаторами и запоминающим осциллографом. Таким же осциллографом регистрировались масс-спектры эмиттируемых ионов. В работе использовался времяпролетный масс-спектрометрический преобразователь с электростатическим зеркалом. Разрешающая способность преобразователя ~ 100 , диапазон массовых чисел 1-150.

На рис. 1 показаны масс-спектры, зарегистрированные при скоростях соударения частиц с мишенью $v=2-13$ км·с⁻¹. Спектры (рис. 1, а) получены при бомбардировке частицами Cr и Al мишени из Ag (спектры 1, 2) и частицами Al мишени из Cr с напыленным слоем Ag толщиной 0.05 мкм (спектр 3). Видно, что при скоростях соударения $v=6.8$

(1), 7.5 (2), 12.6 км·с⁻¹ (3) в спектрах присутствуют линии материалов частицы и мишени, причем в спектре 3 наблюдаются линии обоих материалов мишени. Во всех спектрах присутствуют также линии H⁺ и Li⁺, обусловленные, очевидно, наличием примесей и загрязнений. При снижении скорости бомбардирующих частиц до $v \leq 3$ км·с⁻¹ спектральные линии мишени и частицы переставали регистрироваться. Сходные результаты получены при бомбардировке мишени из Nb частицами Fe (рис. 1, б). При скоростях частиц $v = 2 \div 4$ км·с⁻¹ наблюдаются только линии атомного и молекулярного водорода и щелочных металлов (спектр 1). При $v = 4 \div 8$ км·с⁻¹ в спектре появляются линии материала частицы (спектр 2), интенсивность которой увеличивается при переходе в диапазон скоростей $v = 8 \div 13$ км·с⁻¹ (спектр 3). Однако линия тугоплавкого

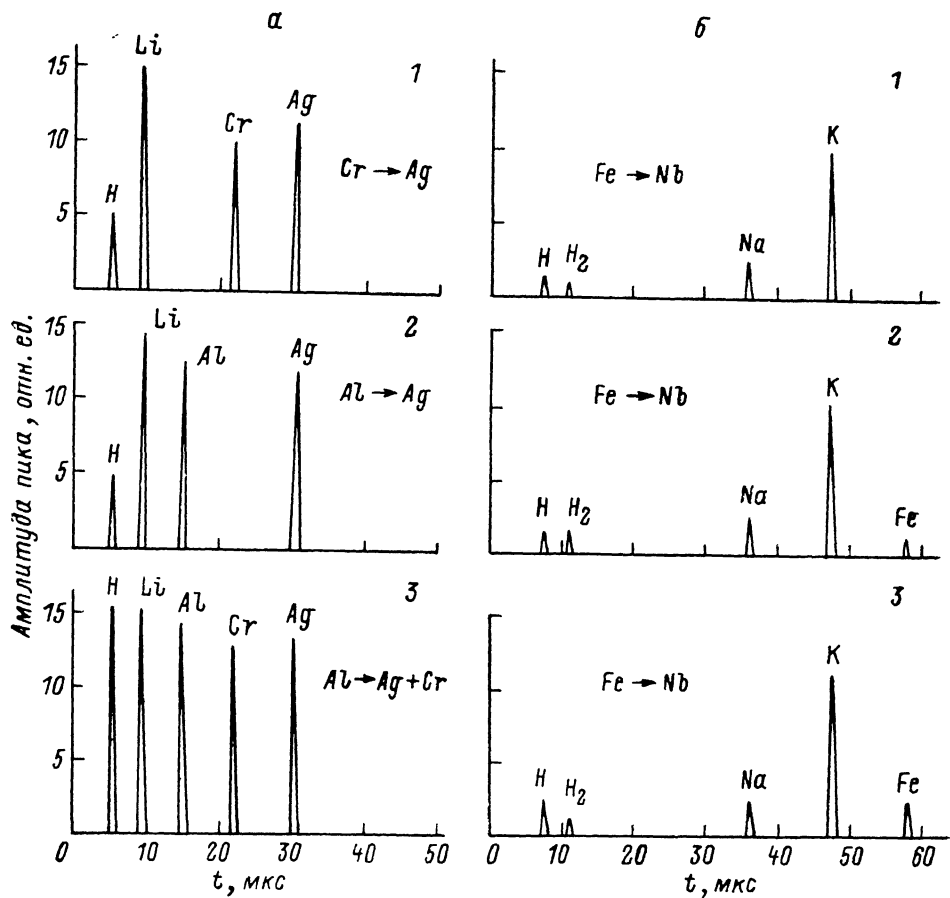


Рис. 1.

материала мишени (Nb) в спектре отсутствует (ее появление зарегистрировано при $v \geq 17$ км·с⁻¹).

На рис. 2 показана зависимость отношения суммарного заряда эмиттируемых ионов Q_i к массе частицы m от скорости соударения v , рассчитанная по масс-спектрам для диапазона скоростей $v = 2 \div 13$ км·с⁻¹. Эта зависимость близка к кубической, что характерно для механизма ионообразования за счет кинетического нагрева вещества в зоне соударения [1-3]. Рассмотренные результаты получены для бомбардирующих частиц с диаметром $d \leq 1$ мкм и собственным зарядом $q < 10^{-14}$ Кл.

С целью выяснения возможного влияния собственного заряда ускоренной частицы на процесс ионообразования аналогичные измерения были проведены для более крупных частиц ($d \sim 5$ мкм) с собственным зарядом $q \approx 10^{-13} \div 10^{-12}$ Кл и скоростью $v < 1$ км·с⁻¹. На рис. 3 приведены три масс-спектрограммы, по-

лученные при бомбардировке мишени из Nb частицами Сг. Верхние кривые — запись сигнала, снимаемого с мишени. Спектры 1, 2 получены для частиц с близкими скоростями — 265 и 250 м·с⁻¹ соответственно, а заряд частицы во втором случае был в два раза больше ($3.5 \cdot 10^{-13}$ и $7.0 \cdot 10^{-13}$ Кл), о чем можно судить по восходящим ветвям верхних кривых на масс-спектрограммах, отражающим процесс индукции заряда на мишени подлетающей микрочастицей. Однако, несмотря на большую величину заряда подлетающей частицы, масс-спектрограмма 2 содержит меньшее число линий, нежели масс-спектрограмма 1, а интенсивность имеющихся линий ниже. В этой связи следует обратить внимание на характерную ступеньку в конце восходящей ветви сигнала с мишени, отчетливо выраженную на масс-спектрограмме 1. Амплитуда этой ступеньки, обусловленной частичной разрядкой входной емкости усилителя в цепи мишени импульсом ионного тока, пропорциональна величине суммарного заряда эмиттируемых ионов. Отсюда становится понятной малая насыщенность масс-спектра в случае 2, для которого ступенька на кривой сигнала с мишени выражена значительно менее отчетливо, а также в случае 3 ($q=1.4 \cdot 10^{-13}$ Кл).

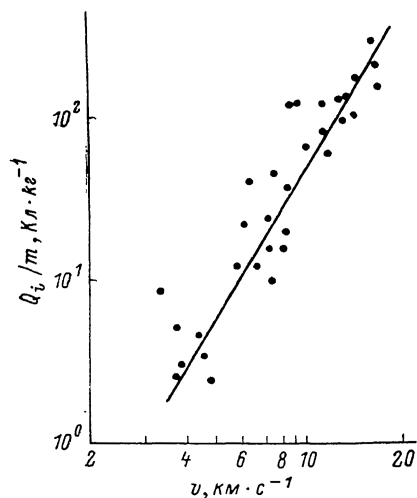
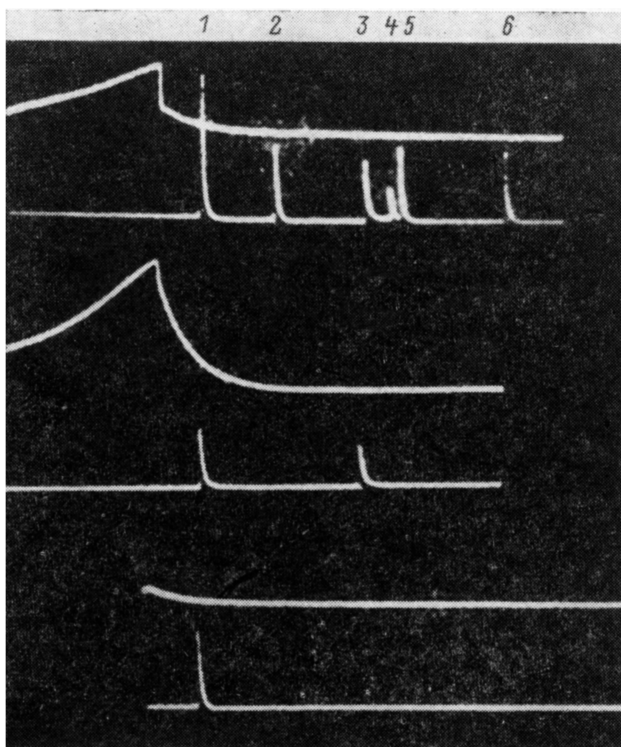


Рис. 2.

Рис. 3. Масс-спектры ионов, образующихся за счет электрического разряда между микрочастицей и мишенью.



1 — Н⁺; 2 — К⁺⁺; 3 — О₂⁺; 4 — К⁺; 5 — СО₂⁺; 6 — Nb⁺.

Обработка ~ 100 спектров, полученных при $v < 1$ км·с⁻¹, не выявила зависимости величины эмиттируемого ионного заряда Q_i от скорости частицы, а зави-

симость Q , от собственного заряда частицы хотя и наблюдается, но подвержена значительным флуктуациям. Это указывает на то, что при $v < 1 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ процесс ионообразования может быть обусловлен электрическим разрядом, возникающим между частицей и мишенью при малом расстоянии между ними [5], а величина эмиттируемого заряда претерпевает изменения в соответствии со статистическим характером разряда, интенсивность которого зависит от формы налетающей частицы, микрорельефа поверхности мишени в области соударения и других факторов.

Для подтверждения определяющей роли электрического разряда в возникновении ионной эмиссии при скоростях бомбардирующих частиц $v < 1 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ был поставлен эксперимент с нейтрализацией ускоренных частиц электронами, испускаемыми накаленной спиралью [6]. В случае нейтрализации частиц масс-спектры не регистрировались, что согласуется с данными, полученными в [6] при изучении электронной эмиссии.

Таким образом, при бомбардировке мишени микрочастицами, ускоренными электростатическим методом, ионная эмиссия, вызываемая ударами частиц со скоростями $v \leq 1 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$, обусловлена главным образом электроразрядным механизмом. При $v \geq 3 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ преобладающим становится механизм эмиссии за счет кинетического нагрева вещества, а в промежуточном интервале скоростей эмиссия обусловлена, очевидно, совместным действием обоих механизмов, относительный вклад каждого из которых зависит от свойств материалов частицы и мишени и от условий заряжения частиц в используемом ускорителе.

Литература

- [1] *Smith D., Adami N. G.* J. Phys. D: Appl. Phys., 1973, v. 6, N 4, p. 700—719.
- [2] *Dietzel H., Neukum G., Rauser P. J.* Geophys. Rev., 1972, v. 77, N 10, p. 1375—1395.
- [3] *Акишин А. И., Кирюхин В. П., Марьин Б. В.* и др. ЖТФ, 1981, т. 51, № 4, с. 823—827.
- [4] *Сагдеев Р. З., Киссель И., Берто Ж.* и др. Письма в астроном. журн., 1986, т. 12, № 8, с. 604—610.
- [5] *Мартынов Е. П.* ЖТФ, 1970, т. 40, № 9, с. 1966—1968.
- [6] *Акишин А. И., Кирюхин В. П., Кошеляев Е. М.* и др. В кн.: Физика структуры и свойств твердых тел. Куйбышев, 1984, с. 109—119.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова
Научно-исследовательский
институт
ядерной физики

Поступило в Редакцию
2 апреля 1987 г.