

10; 11; 12

© 1992

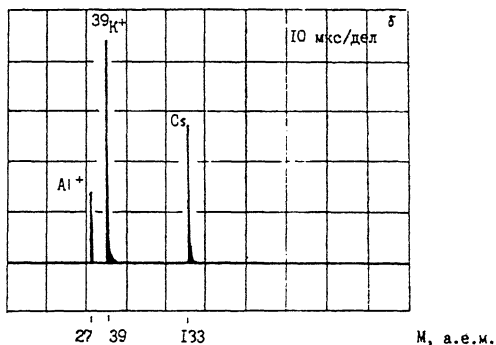
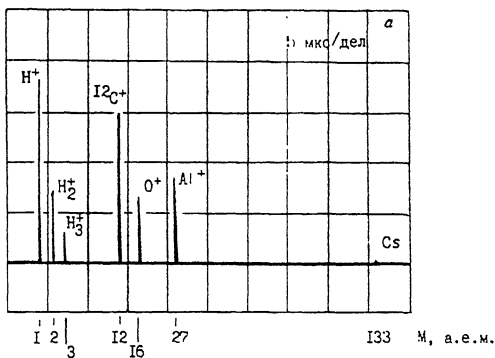
О МЕХАНИЗМЕ ИОНИЗАЦИИ ПРИ УДАРЕ ЗАРЯЖЕННЫХ МИКРОЧАСТИЦ С МАЛЫМИ СКОРОСТЯМИ

А.А. С ы с о е в, Д.Р. Б а н д у р а,
В.П. И в а н о в

Проблема количественного элементного анализа вещества космических пылинок, проводимого с помощью бортовых пылеударных масс-спектрометров, требует изучения закономерностей ионообразования при ударе ускоренных микрочастиц о твердую мишень [1]. Большой интерес и значительные трудности вызывает теоретическое описание процессов ионообразования при скоростях удара $V_p < 10$ км/с, характерных для околоземного пространства, и, в частности, при $V_p \sim 1$ км/с. По данным [2], при таких скоростях образование ионов по ударно-волновому механизму маловероятно, так как удельная энергия E_a , приходящаяся на атом вещества пылинки при разгрузке, составляет сотые доли эВ (например, при $V_p = 1$ км/с для пылинки из Al $E_a \sim 0.04$ эВ). Вместе с тем, в работах [3-5] отмечено интенсивное ионообразование при $V_p < 1$ км/с, причем авторы [5] объясняют это развитием искрового пробоя в промежутке между мишенью-катодом и заряженной пылинкой-анодом. В настоящей работе рассматриваются результаты экспериментального исследования механизмов образования ионов при ударе о танталовую мишень микрочастиц из Al , ускоренных с помощью линейного электростатического ускорителя до 0.5-11 км/с.

Анализ масс-спектров, полученных в одинаковых условиях для заряженных до 10^{-15} - 10^{-13} Кл и нейтральных пылинок (см. рисунок, а, б), показал, что при малых скоростях удара заряженных пылинок в масс-спектрах преобладают ионы H^+ , H_2^+ , H_3^+ , C^+ , O^+ .

В случае удара нейтральных пылинок с такими скоростями количество образованных ионов мало, и масс-спектры не регистрируются совсем. С увеличением скорости в масс-спектрах как нейтральных, так и заряженных пылинок преобладают ионы Al^+ , Na^+ , K^+ , Cs^+ , соответствующие материалу пылинки и примесным легкоионизируемым щелочным элементам в мишени и пылинке (соль $CsCl$ наносилась на мишень для градуировки шкалы масс). Таким образом, экспериментальные исследования показали, что образование ионов элементов с высоким потенциалом ионизации связано с собственным зарядом пылинок. Анализ вероятности протекания различных процессов ионообразования при ударных пылинок с зарядом $q_p = 10^{-15}$ - 10^{-13} Кл, размером 0.1-1 мкм со скоростью $V_p \sim 1$ км/с показывает следующее.



Характерные масс-спектры ускоренных пылинок из Al при ударе о мишень из Ta : а - заряженной пылинки с $v_n = 2.8$ км/с, $q_n = 5.3 \cdot 10^{-15}$ Кл, $m_n = 1.3 \cdot 10^{-13}$ г; б - нейтральной пылинки с $v_n = 3.1$ км/с, $m_n = 9.8 \cdot 10^{-14}$ г.

Искровой вакуумный пробой промежутка „пылинка-мишень“ в указанных условиях не происходит. В регистрируемых масс-спектрах не содержатся массовые пики ионов материала мишени (Ta , Cs). В аналогичных данных авторов [5] массовый пик материала мишени также отсутствует. Вместе с тем, общепринятые представления об инициации искрового пробоя взрывом микроострия на катоде (см., например, [6]), свидетельствуют о том, что при временах разряда до $t = 2-3$ нс (характерное время процесса сближения пылинки с мишенью) доля ионов материала катода в сгустке превышает 0.6. Кроме того, теоретические оценки, проделанные в соответствии с [7], показывают, что для имевшей место в экспериментах напряженности поля на остриях мишени ($E_M = 5 \cdot 10^9$ В/м) за время сближения t разогрева острий автоэлектронным током практически не происходит.

Другие возможные механизмы ионообразования, как-то: термодесорбция на разогретых остриях катода, термодесорбция с катода с последующей ионизацией электронным ударом, ионизация остаточного газа автоэмиссионными электронами, — дают вклад, по оценкам, не более 10^{-20} – 10^{-19} Кл.

Наиболее вероятным и полностью согласующимся с экспериментальными данными механизмом образования ионов в указанных условиях является электронно-стимулированная десорбция атомов с поверхности пылинки с их последующей ионизацией электронами автоэмиссии. Действительно, на этапе сближения пылинки с мишенью в локальном поле на острие с $E_M \sim 5 \cdot 10^9$ В/м автоэмиссионный ток может достигать $j_e \sim 10^{10}$ А/м. Электроны ускоряются полем пылинки до энергии порядка ста эВ, причем вероятность их попадания на пылинку практически равна единице. В результате бомбардировки поверхности пылинки электронами происходит десорбция молекул, атомов и ионов, причем сечение десорбции для ионов в 10^3 – 10^4 раз меньше, чем для нейтральных частиц [8]. Десорбируются в основном адсорбированные поверхностью молекулы (или их атомы) (использовавшаяся в экспериментах пыль содержала до 30 монослоев H_2O , адсорбированной на поверхности). Характерные данные по угловым и энергетическим распределениям десорбированных частиц (см., например, [8]) позволяют предположить, что за время процесса значительная доля их (~ 0.2 – 0.5) не покинет промежутка между острием мишени и пылинкой и будет бомбардироваться автоэмиссионными электронами. Скорость десорбции под действием электронной бомбардировки описывается соотношением $dN/dt = -j_e \sigma N$, где j_e — плотность тока автоэмиссии, σ — сечение десорбции, N — число молекул, адсорбированных на единице поверхности. Количество десорбированных молекул (атомов) равно $N' = N_0 \cdot j_e \sigma \cdot t$, так как $j_e \sigma t \ll 1$, или $N' = W_0 \cdot j_e \cdot t/e$, где W_0 — вероятность десорбции. Приведенные в [9] результаты измерений W_0 для различных частиц из системы адсорбции H_2O/W при энергии электронов $E_e = 150$ эВ дают для водорода и кислорода значения $W_0 \sim 1 \cdot 10^{-3}$, $5 \cdot 10^{-4}$ молекул/электрон соответственно. Оценка количества десорбированных атомов Н с учетом данных [9] дает в условиях нашего эксперимента $N'_H = W_0 j_e \cdot 4\pi \cdot r_p^2 \cdot t/e \sim 10^3$ – 10^4 , а парциальное давление атомов Н составляет при этом $P_H \sim 10^3$ – 10^4 Па. Суммарный заряд образуемых при электронном ударе в газовой фазе ионов H^+ достигает $\sim 10^{-17}$ Кл. Аналогичным образом десорбируются и ионизируются углерод и углеводородные группы из адсорбированного поверхностью пылинки полифенилового эфира (рабочая жидкость вакуумной системы ускорителя), что объясняет наличие в масс-спектрах ионов С, СН.

Полученные экспериментальные данные и предложенное в работе новое объяснение механизма формирования масс-спектров ставят вопрос об изменении наметившегося подхода к построению теории ионообразования при ударе низкоскоростных заряженных пылинок.

При градуировке на электростатических ускорителях бортовых масс-спектрометров для анализа состава микрометеоритов необходим учет собственного заряда пылинок. Кроме того, реальные микрометеориты в результате воздействия космических излучений и магнитосферной плазмы могут иметь значительный заряд. Таким образом, для проведения количественного элементного анализа состава микрометеоритов путем масс-анализа ударной плазмы необходимо измерять собственный заряд микрометеорита, оценка которого позволяет учесть влияние ЭСД на состав образующихся ионов.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Леонас В.Б., Малама Ю.Г. Препринт Ин-та косм. иссл. АН СССР, 1984. Пр. 885. 24 с.
- [2] D r a p a t z S., M i c h e l K.W. // Z. Naturforsch. 1974. V. 29a. P. 870-879.
- [3] A d a m s N.G., S m i t h D. // Planet. Sci. 1971. V. 19. P. 195-204.
- [4] A b r a m o v V.I., B a n d u r a D.R., I v a n o v V.P., S y s o e v A.A. Proc. IV th International Seminar "Manufacturing of Sci. Space Instruments". М.: Sp. Res. Inst. 1990. V. 2. P.108-121.
- [5] Новиков Л.С., Семкин Н.Д., Куликаускас В.С. и др. // ЖТФ. 1988. Т. 58. № 6. С. 1160-1163.
- [6] Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984. 256 с.
- [7] Сливков И.Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме. М.: Энергоатомиздат, 1986. 256 с.
- [8] Вудраф Д., Делчар Т. Современные методы исследования поверхности / Пер. с англ. под ред. В.И. Раховского. М.: Мир, 1989. 568 с.
- [9] K l o p f e r A. // Wakuum - Technik. 1970. V. 19. N 3. P. 37-42.

Поступило в Редакцию
11 мая 1992 г.