

05.1; 11

© 1991

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И УГЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ИОНОВ, ЭМИТИРУЕМЫХ ПРИ УДАРЕ
УСКОРЕННЫХ ПЫЛИНОК О МИШЕНЬВ.И. А б р а м о в, Д.Р. Б а н д у р а,
В.П. И в а н о в, А.А. С ы с о е в

Высокоскоростной удар микрочастиц о мишень как метод получения ионов использовался для анализа космической пыли в оболочке ядра кометы Галлея на аппаратах „Вега 1, 2” [1] и „Giotto” [2]. Относительная скорость пылинок составляла 70–80 км/с. При такой скорости соударения пылинок с мишенью выделяется значительное количество энергии и эффективно проходит процесс плазмообразования. Теоретическое исследование процессов образования и разлета плазмы при таких скоростях удара проведено в работах [3–5].

Однако задача установления корреляций между масс-спектром пылинок и их составом все еще не решена. Ещё более проблематичным является решение такой задачи для малых скоростей ($v \leq \leq 10$ км/с), характерных для околоземных микрометеоритов, интерес к которым чрезвычайно высок как с точки зрения экологии и стандартизации космоса, так и в научном плане [6]. Кроме этого, анализ пылевых частиц представляет интерес для многих областей технологии, в частности, для индикации пылинок и определения их происхождения при создании технологически чистых комнат [7]. В настоящее время нет достаточно экспериментального материала для разработки теоретических моделей удара при малых скоростях. В свою очередь, без таких моделей невозможно решить задачу количественного элементного масс-спектрометрического анализа микрочастиц [8, 9].

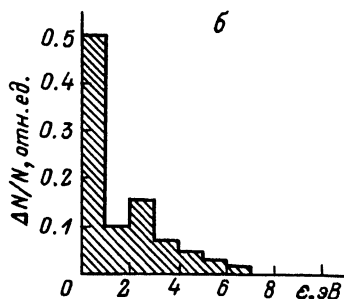
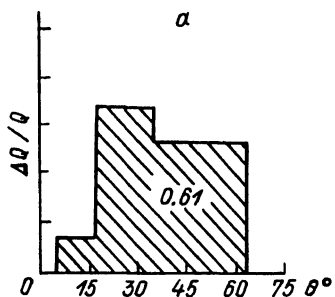


Рис. 1. Угловое (а) и энергетическое (б) распределение ионов при скорости пылинки $v = (3.4 \pm 0.3)$ км/с.

В работе представлены результаты измерений угловых и энергетических распределений ионов плазмы, образованной при ударе алюминиевых частиц размером 0.1–1 мкм со скоростью 1–11 км/с о мишень из Та. Методика ускорения частиц традиционна и описана, например, в [8].

Измерение угловых характеристик производилось с помощью устройства, в котором регистрировался суммарный заряд ионов $AQ(\theta)$, вылетевших в пределах телесного угла, ограниченного эффективной поверхностью детектора ионов (ВЭУ-7). Разлет плазмы происходил в бесполовом пространстве. Изменение телесного угла регистрации ионов происходило при передвижении детектора. Относительная доля ионов, эмитированных в пределах данного телесного угла, определялась с использованием результатов измерения полного положительного заряда, образующегося при ударе.

На рис. 1, а показана характерная зависимость $\Delta Q(\theta)/Q$ от угла θ относительно нормали к мишени для скоростей пылинок из диапазона 1–4 км/с для удара под прямым углом. Аналогичный характер носят зависимости для других групп скоростей. Интересной выявленной особенностью углового распределения является то, что в диапазоне скоростей пылинок $v = 1-11$ км/с от 61 до 83 % эмитируемых ионов имеют начальные скорости, направление которых лежит в пределах угла до 65° относительно нормали к мишени, причем эта доля растет с увеличением скорости. Максимум распределения лежит в области углов $16-36^\circ$. Это объясняется тем фактом, что при скоростях 1–11 км/с полного испарения пылинок не происходит, и неиспаренный нагретый фрагмент частицы, остающийся в кратере, „эранирует“ направление вдоль нормали для выплескивающейся из кратера смеси расплавленного и испаренного вещества.

Задача измерения энергетических спектров ионов, эмитируемых при ударе ускоренной пылинки о мишень, имеет особенности,

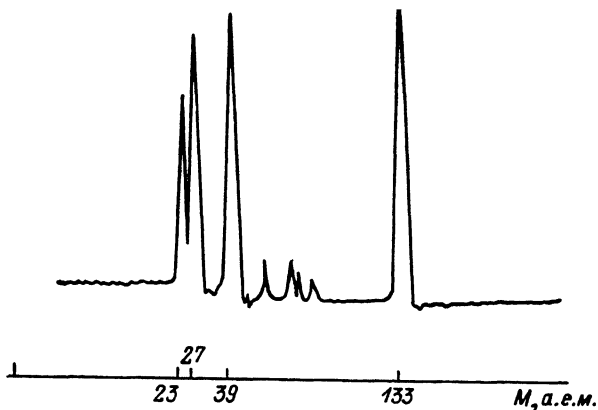


Рис. 2. Характерный масс-спектр для ускоряющего поля с напряженностью 1.7 кВ/см.

затрудняющие применение распространенных методик и экспериментальных средств. Поэтому была предложена методика, в которой измерения проводились с помощью энергоанализатора с полусферической отражающей сеткой. Для интерпретации экспериментальных данных проводилось численное моделирование системы с использованием данных по угловому распределению. На рис. 1, б представлено характерное энергетическое распределение ионов для $v=1-4$ км/с для удара под прямым углом. Результаты измерений показывают, что в диапазоне $v=1-11$ км/с и указанном диапазоне масс пылинок энергетический разброс в случае разлета плазменного облака в электрическом поле с малой напряженностью (≤ 1 В/см) не превышает 7 эВ для более чем 90 % ионов. При этом с увеличением скорости пылинки максимум распределения смещается в область энергий 2-4 эВ. Отметим следующий важный экспериментальный результат, прямо указывающий на направление разработки пылеударных источников. Анализ формы линий в масс-спектрах, полученных при напряженности поля в области мишени 1.7 кВ/см, выявил, что при разлете в сильном поле энергетический разброс существенно больше. Пример масс-спектра, полученного в прямопролетном пространстве дрейфа длиной 195 мм при такой напряженности поля в области мишени, показан на рис. 2. Эмитированные при ударе ионы ускорялись в промежутке шириной 3 мм между мишенью с потенциалом 500 В и сеткой с нулевым потенциалом. Наличие интенсивного пика $^{133}\text{Cs}^+$ объясняется предварительным введением Cs в мишень, предпринятым для калибровки шкалы масс. Оценка ширины линий Na^+ , Al^+ , $^{39}\text{K}^+$ и Cs^+ дает величину энергетического разброса 50-100 эВ, причем энергия соответствует потенциалу мишени (500 В) только для ионов, заре-

гистрированных в области начальных участков массовых линий. Одним из возможных объяснений является влияние плазменных эффектов на процессы ускорения. Для приведенного примера начальная плотность плазмы составляет $1.6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и достигает величин $10^8 - 10^{10} \text{ см}^{-3}$, когда ступок расширяется до 0.2-0.8 мм. На таких расстояниях от мишени потенциал поля на 40-140 В меньше, чем ускоряющий потенциал, что вызывает „недобор“ энергии ионами. В случае же малых напряженностей ускоряющего поля ($\sim 1 \text{ В/см}$) потенциал в области распада облака для приведенного примера отличается от ускоряющего лишь на 20-80 мВ. Энергетический разброс при этом определяется процессами гидродинамического ускорения и ускорения двойным электрическим слоем. Таким образом, схемы, в которых ускорение ионов на начальных стадиях разлета плазмы происходит в поле с малой напряженностью, предпочтительнее для формирования пучка с малым энергоразбросом.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] K i s s e l J., S a g d e e v R.Z., B e r t a u x J.L. et. al. // Nature. 1986. V. 321. P. 280-282.
- [2] K i s s e l J., B r o w n l e e D.E., B u c h l e r K. et al. // Nature. 1986. V. 321. P. 336-337.
- [3] М а л а м а Ю.Г., М а р ч е н к о В.С. Препринт ИКИ АН СССР, ПР-1009. М., 1985. 32 с.
- [4] И н о г а м о в Н.А. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. № 13. С. 769-773.
- [5] K r u e g e r F.R. // Z. Naturforsch. 1983. V. 38a. P. 385-394.
- [6] F e c h t i g H., G r u n E., M o r f i l l G. // Planet. Space Sci. 1979. V. 27. P. 511-531.
- [7] С а б а т о в с к а я В.Л., Ж у р а в л е в Г.И., Б и б и к о в а Т.А. // Заводская лаборатория. 1983. Т. 49. № 9. С. 43-45.
- [8] Н о в и к о в Л.С., С е м к и н Н.Д., К у л и к а у с - к а с В.С. и др. // ЖТФ. 1988. Т. 58. № 6. С. 1160-1163.
- [9] D r a p a t s S., M i c h e l K.W. // Z. Naturforsch. 1974. V. 29a. P. 870-879.

Московский инженерно-физический институт

Поступило в Редакцию
5 октября 1990 г.
В окончательной редакции
18 января 1991 г.