

05.1;10;12

©1994

## ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ ПРИ НИЗКИХ СКОРОСТЯХ УДАРА ЗАРЯЖЕННЫХ МИКРОЧАСТИЦ

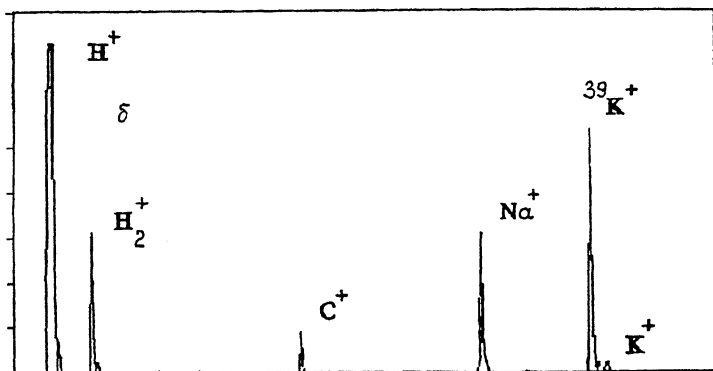
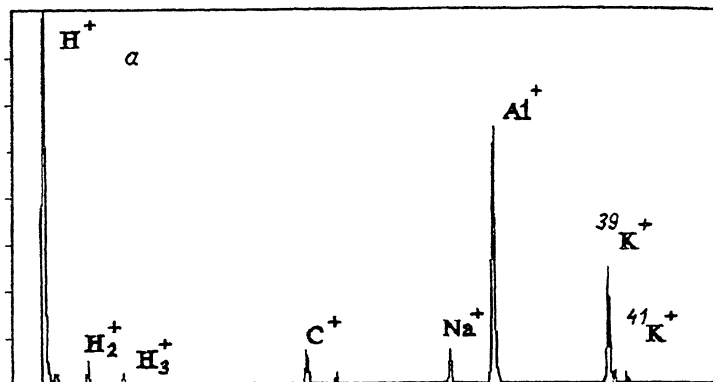
*В.П.Иванов, Т.В.Комова, А.А.Сысоев*

В [1] предложен механизм, позволяющий описать появление в масс-спектрах линий ионов с большим потенциалом ионизации при высокоскоростном (0.3–5 км/с) ударе заряженных микрочастиц о твердую мишень. Однако ни эта модель, ни модель, предложенная в [2], не объясняют наличия в масс-спектрах линий ионов основного материала частиц в нижнем диапазоне скоростей высокоскоростного удара. Возникает много вопросов при объяснении возникновения в масс-спектре линий щелочных металлов на основе механизма, предложенного в [2]. В работах других авторов по исследованию высокоскоростного удара, как правило, наличие заряда частицы не уделяется существенного внимания, либо их интерпретация противоречива [3,4]. В настоящей работе сделан новый шаг в понимании процессов, происходящих при высокоскоростном ударе в нижнем диапазоне скоростей под влиянием заряда микрочастиц.

Известно, что в масс-спектрах при высокоскоростном ударе присутствуют интенсивные линии щелочных металлов (рисунок, а). Экспериментально установлено, что не наблюдается уменьшение их интенсивности со снижением скорости удара микрочастиц (рисунок, б) как это должно следовать из модели, описанной в [2]. Другое противоречие с указанной моделью связано с наличием при скоростях  $\sim 1$  км/с в масс-спектрах линий ионов основного материала мишени (в нашем случае  $Al^+$ ), поскольку при таких скоростях на каждый атом в среднем приходится  $\sim 0.1$  эВ энергии удара. Нельзя объяснить появление  $Al^+$  и на основе модели, изложенной в [1].

Сравнение масс-спектров для заряженных и нейтральных микрочастиц свидетельствует о решающей роли заряда микрочастиц в формировании ионного состава пылеударной плазмы. Его влияние проявляется через следующую последовательность физических процессов.

При подлете заряженной микрочастицы к мишени между ними образуется сильное электрическое поле, которое усиливается в  $b = 10 - 100$  раз за счет микроострий



Масс-спектр алюминиевой микрочастицы.

$a - v = 0.5 \text{ км/с}$ ,  $q = 5 \cdot 10^{-13} \text{ Кл}$ ;  $b - v = 1.7 \text{ км/с}$ ,  $q = 3 \cdot 10^{-14} \text{ Кл}$ .

на поверхности катода (мишени) и микронеровностей частицы. В результате бомбардировки микрочастицы электронами могут развиваться несколько различных процессов. При больших зазорах частица-мишень, когда эмиссионные токи не столь велики, в соответствии с [1] имеет место стимулированная десорбция фрагментов молекул, адсорбированных на микрочастице, с последующей их ионизацией эмиссионными электронами. Этим объясняется наличие в масс-спектрах элементов с высоким потенциалом ионизации. Непосредственно перед сближением частицы с мишенью возникают гигантские автоэмиссионные токи, причем длительность этой фазы меньше  $10^{-9}$  с. Электроны поглощаются в слое  $\sim 10^{-6}$  см [5] и нагревают электронный газ микрочастицы. Характерное время релаксации температуры электронов и атомов составляет  $\sim 10^{-11}$  с. Оценка вре-

мени релаксации температуры по частице за счет теплопроводности дает  $-10^{-7}$  с, т. е. имеет место локальный разогрев поверхности частицы. Для оценки температуры нагрева принимались следующие реальные параметры частицы: заряд  $q = (10 - 50) \cdot 10^{-14}$  Кл, скорость  $v = 0.3 - 5$  км/с. Считалось, что электроны поглощаются локальным участком поверхности, площадь которой составляет  $\sim 3 \cdot S$ , где  $S$  — площадь эмиттера. Автоэмиссионный ток вычислялся по формуле Фаулера-Нордгейма [6]. Результирующее значение температуры частицы представляется в виде

$$T \frac{aq}{mc} \cdot \int_x^0 \Phi(x) \frac{dx}{v},$$

где  $m$  — масса локального участка,  $c$  — теплоемкость,  $a$  — константа,  $\Phi(x)$  — функция от электрического поля,  $x$  — расстояние от частицы до мишени.

Для принятого в расчетах коэффициента усиления поля  $b = 100$  температура нагрева локального участка микрочастицы существенно превышает температуру кипения материала частицы (оценка дает значение от 4000 до 20 000 К). В таких условиях возможно интенсивное испарение всех твердых веществ. Из масс-спектрометрических измерений состава пыли следует, что среднее содержание Na и K равно 0.01% и в основном они являются продуктами загрязнений, т.е. содержатся на поверхности пылинок (это подтверждено другими физическими методами). Вследствие малой энтальпии сублимации их полное испарение с поверхности происходит еще до момента, когда локальный участок достигает температуры кипения материала микрочастицы. При температурах меньше  $T_{пл}$  (Al) степень ионизации Na и K составляет  $5.31 \cdot 10^{-6}$ , 0.136. Однако с учетом высокой напряженности электрического поля, создаваемого зарядом частицы, она увеличивается до значений 0.057, 1674. Кроме поверхностной ионизации, возможна ионизация Na и K также по тепловому механизму и электронным ударом. Вместе с тем оценки показывают, что доля образующихся ионов Na и K за счет второго и третьего механизмов по сравнению с первым незначительна ( $< 0.1\%$ ). Что касается ионов  $Al^+$ , то как показывают оценки, они преимущественно образуются в результате электронного удара. Рассчитанное в рамках данной модели количественное соотношение ионов  $Na^+$ ,  $K^+$  и  $Al^+$  удовлетворительно коррелирует с интенсивностями линии этих ионов в масс-спектрах.

Непосредственно в момент соприкосновения частицы с мишенью плазма вытесняется из зазора между ними и начинают развиваться собственно ударные процессы. Была рас-

Зависимость температуры ударного сжатия от скорости удара

$v$ , км/с	0.3	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0
$T$ , К	77	265	627	1124	1890	2674	3649	5671	7989

смотрена стадия ударного сжатия. Использование некоторых принципов теории упругости в рамках гидродинамической модели позволило оценить температуру ударного сжатия твердого тела для малых скоростей удара ( $v < 1$  км/с). Вычисленные с использованием модели значения температур микрочастицы с массой  $m = 2.7 \cdot 10^{-12}$  г, обусловленных сжатием, сведены в таблице. Отсюда следует, что при скоростях менее 2–3 км/с ионизация атомов за счет ударного сжатия практически маловероятна (что и подтверждается экспериментами с нейтральными частицами). Однако в этой стадии возможно образование ионов Na и K согласно модели, описанной в [2].

Еще одним доводом в пользу новой физической модели процессов ионообразования является тенденция к возрастанию интенсивности линий в масс-спектрах при увеличении заряда микрочастиц. Вместе с тем наблюдающиеся существенные различия в интенсивностях линий для разных событий, вероятно, определяются различиями в форме и размерах острий от события к событию и соответствующей вариацией коэффициента  $b$ .

Предложенная физическая модель дает непротиворечивое объяснение всем известным к настоящему времени экспериментальным фактам. Она же свидетельствует о решающей роли заряда микрочастиц в формировании масс-спектров при низких скоростях удара.

### Список литературы

- [1] Сысоев А.А., Бандура Д.Р., Иванов В.П. и др. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 15. С. 35–38.
- [2] Drapatz S., Michel K.W. // Z. Naturforsch. 1974. V. 29a. P. 870–879.
- [3] Dalmann B.K., Grun E., Kissel J., Dietzel H. // Planet. Space Sci. 1977. V. 25. P. 135–147.

- [4] *Новиков Л.С., Семкин Н.Д., Куликаускас В.С. и др. // ЖТФ. 1988. Т. 58. В. 6. С. 1160–1163.*
- [5] *Черепнин Н.В. Сорбционные явления в вакуумной технике. М.: Сов. радио, 1973.*
- [6] *Елинсон М.И., Васильев Г.Ф. Автоэлектронная эмиссия. М.: Физматгиз. 1958.*

Московский  
инженерно-физический  
институт

Поступило в Редакцию  
15 января 1994 г.

---