

04; 10

© 1990

### ЭФФЕКТ СИЛЬНОЙ ИЗБИРАТЕЛЬНОСТИ И ЗАВИСИМОСТИ МАКСИМАЛЬНЫХ ЭНЕРГИЙ ОТ КРАТНОСТИ ЗАРЯДА ПРИ УСКОРЕНИИ ИОНОВ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКАХ

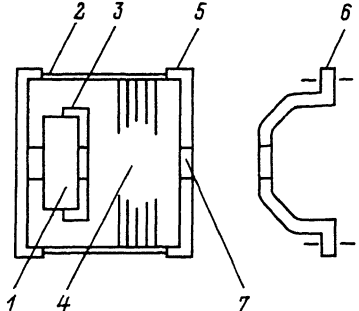
А.А. К а н с у з я н , А.А. П л ю т т о ,  
И.С. К о р о т к о в , Г.Р. Д ж о б а в а

Независимость максимальных энергий ионов от краткости заряда при ускорении в электронных пучках, формируемых из плазмы вакуумных искр и дуг, была замечена уже в первых работах по коллективному ускорению ионов в плазменных и вакуумных диодах [1]. Затем этот результат многократно подтверждался при осуществлении коллективного ускорения в других плазменных системах типа диода Льюса, в системах с напуском газа в заанодное пространство и т.д. [2] и считался одним из основных аргументов в пользу неэлектростатической природы коллективного ускорения. При ускорении ионов электронным пучком, инжектированным в газ, эта закономерность не наблюдается [3], что служит основанием для утверждения различия в механизме коллективного ускорения в газе и плазменных системах.

Обнаружение [4, 5] преимущественного ускорения ионов более высоких кратностей заряда выявили избирательность действующих на ускоряемые ионы полей. Относительное содержание коллективно-ускоренных многозарядных ионов значительно превышало их относительное содержание в составе плазмы.

Дальнейшие исследования избирательных эффектов при ускорении ионов различных кратностей заряда в плазменных диодах показали, что существуют условия сильной избирательности, когда до максимальных энергий ускоряются ионы с максимальной кратностью заряда и содержание многозарядных коллективно-ускоренных ионов

Рис. 1. Схема экспериментального стенда.



в составе пучка намного выше количества ионов низкой зарядности. В этих условиях независимость максимальных энергий ускоренных ионов от кратности заряда — результат перезарядки ионов в пространстве дрейфа на остаточном газе.

Исследования проводились на экспериментальной установке, показанной на рис. 1. В качестве генератора плазмы использовался вакуумный импульсный дуговой источник 1, описанный в [6], размещенный внутри алундового цилиндра 2. Ускоряющий промежуток, где происходит формирование электронного пучка из плазмы источника и развитие коллективного ускорения ионов, расположен в этом же цилиндре и образован анодом источника 3 и ускоряющим электродом 5, разделенными диафрагмированным каналом 4, набранным чередующимися изоляционными кольцами и металлическими (нержавеющая сталь) диафрагмами различного диаметра от 3 до 10 мм. Вытягивающий электрод 6, служащий для электростатического отбора ионов и подускорения напряжением 20 кВ, расположен за отверстием 7 в ускоряющем электроде. Амплитуда тока дуги источника 40–100 А и длительность импульса ~100 мкс. Энергия формируемого из плазмы электронного пучка варьировалась от 0,8 до 3 кэВ.

Состав ускоренных ионов исследовался масспектрометром Томсона по методу парабол. Анализу подвергались интегральные спектры, полученные в результате регистрации  $10^3$  импульсов. Количественное содержание отдельных компонент пучка определялось фотометрированием относительного почернения ядерных эмульсий с последующим введением поправок на величину энергии регистрируемых частиц. Энергии ионов определялись по формуле

$$W = KZU/Y,$$

где  $K = 1730$  — постоянная прибора,  $U$  (кВ) — величина отклоняющего электрического поля,  $Y$  (мм) — отклонение заряженной частицы в электрическом поле масспектрометра в области регистрации,  $Z$  — кратность заряда ионов.

Благодаря использованию способа диагностики состава коллективно-ускоренных ионов, позволяющего одновременно регистрировать и состав плазмы, в которой формируется электронный пучок, для диапазона энергий ионов до 60 кэВ удалось получить прямые доказательства того, что максимальных энергий при ускорении ионов в электронных пучках достигают ионы с максимальной кратностью заряда.

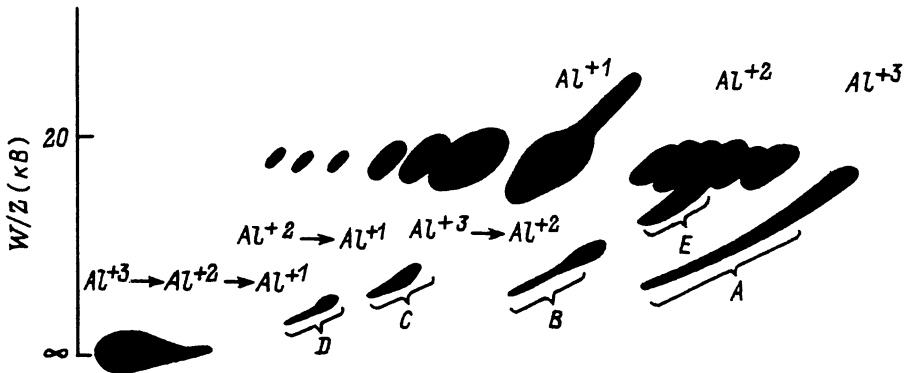


Рис. 2. Масспектрограмма, иллюстрирующая зависимость энергии коллективно-ускоренных ионов от кратности заряда.

$U_{уск}$ , В	$U_{отб}$ , кВ	$I_g$ , А	$Z$	$W_{max}$ , кВ
800	20	40	$2^+$	56
800	20	40	$3^+$	171
800	20	70	$2^+$	58
800	20	70	$3^+$	111

На рис. 2 приведена масспектрограмма, на которой видно, что область максимальных энергий на линии  $AL^{+2}$  (В) формируется перезаряженными ионами  $AL^{+3} \rightarrow AL^{+2}$ , а высокоэнергичная часть линии  $AL^{+1}$  (С, Д) перезаряженными ионами  $AL^{+3} \rightarrow AL^{+2} \rightarrow AL^{+1}$ ,  $AL^{+2} \rightarrow AL^{+1}$ . Специально проведенная серия экспериментов показала содержание большого числа нейтралов в пучке ускоренных ионов. Относительное количество перезаряженных ионов достигало 25–30%, что значительно превышает количество перезаряженных ионов, зарегистрированных в [5]. Объяснением этому могут служить ухудшившиеся вакуумные условия в канале, где развивается процесс коллективного ускорения. В результате обработки данных состава и энергий ускоренных ионов были получены зависимости максимальных энергий ионов, не претерпевших перезарядки (А и Е), от кратности заряда, приведенные в таблице. В таблице  $U_{уск}$  – разность потенциалов, формирующая электронный пучок;  $U_{отб}$  – разность потенциалов, осуществляющая электростатический отбор ионов;  $W_{max}$  – энергия ускоренных ионов;  $Z$  – кратность заряда.

На основе этих данных получены следующие эмпирические соотношения: для случая, когда ток дуги  $I_g = 40$  А,  $W_{3^+}/W_{2^+} = 1.5^{2.7}$ , а для случая  $I_g = 70$  А,  $W_{3^+}/W_{2^+} = 1.5^{1.6}$ . Измерение энергии ус-

коренных однозарядных ионов не представлялось возможным из-за слабой интенсивности линий. Тем самым установлено, что при ускорении ионов в электронных пучках в случаях сильной избирательности наблюдается зависимость максимальных энергий от кратности заряда ионов, определяемая условиями экспериментов. При их изменении, в частности увеличении разности потенциалов, извлекающей электронный пучок, максимальные энергии коллективно ускоренных низкозарядных ионов ( $E$ ) увеличиваются, но в исследованном диапазоне (5–300 кэВ) не достигают максимальных энергий многозарядных ионов ( $A$ ). Таким образом, одним из объяснений малого содержания ионов низких кратностей заряда в высокоэнергетической части спектра в [5] может служить их перезарядное происхождение.

Обнаруженный эффект сильной избирательности при коллективном ускорении ионов указывает на дифференцированное воздействие ускоряющих полей на ионы в зависимости от  $A/Z$  и на общность механизмов коллективного ускорения в плазменных системах и газах.

Возможной причиной избирательных эффектов может быть преобладание многозарядных ионов в области развития коллективного ускорения. Представленные результаты не опровергают опубликованные ранее данные о независимости энергии ускоренных ионов от кратности заряда, относящиеся к мегавольтовому диапазону энергий, в котором перезарядка не реализуется.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] П л ю т т о А.А., Т е м ч и н С.М., К о р о п Е.Д. // Атомная энергия. 1969. Т. 27. № 5.
- [2] D e s t l e r W.W., C r e m e r J.T. // J. Appl Phys. 1983. V. 54(2). P. 636–640.
- [3] J o n a s G. // IEE Trans. 1967. N 5–14. P. 777.
- [4] П л ю т т о А.А., Д ж о б а в а Г.Р., К о р о т к о в И.С., К а н с у з я н А.А. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. В. 23. С. 1444–1447.
- [5] П л ю т т о А.А., Д ж о б а в а Г.Р., К о р о т к о в И.С., К а н с у з я н А.А. // Физика плазмы. 1988. Т. 14. В. 5. С. 547–553.
- [6] П л ю т т о А.А., Д ж о б а в а Г.Р., К о р о т к о в И.С., К а н с у з я н А.А. // Вопросы атомной науки и техники. 1986. В. 1(27). С. 28–29.

Поступило в Редакцию  
10 октября 1989 г.  
В окончательной редакции  
11 марта 1990 г.