

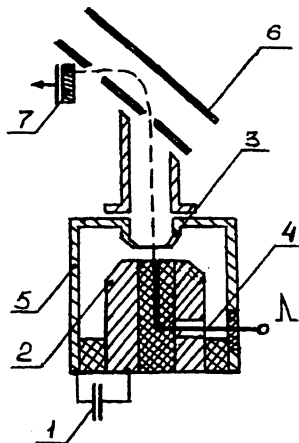
04.12
©1995ОБ УСКОРЕНИИ ИОНОВ ПРИ РАСШИРЕНИИ
ТОКОНЕСУЩЕЙ ПЛАЗМЫ В ВАКУУМН.В.Астраханцев, А.В.Вантеев, А.А.Варнаков,
В.И.Красов, В.Л.Паперный

1. Известно, что при *стационарном* расширении токонесущей плазмы в вакуум (“вакуумная дуга”) происходит ускорение ионов в межэлектродном промежутке до энергий, не превышающих 150 эВ, в широком диапазоне параметров разряда для разных видов ионов [1–3]. С другой стороны, в токонесущей плазме *импульсного* вакуумного разряда регистрировались потоки ионов с энергиями до десятков МэВ [4,5]. В данной работе экспериментально исследованы условия, при которых реализуется механизм ускорения ионов до энергий, существенно превышающих указанные выше “стационарные” значения.

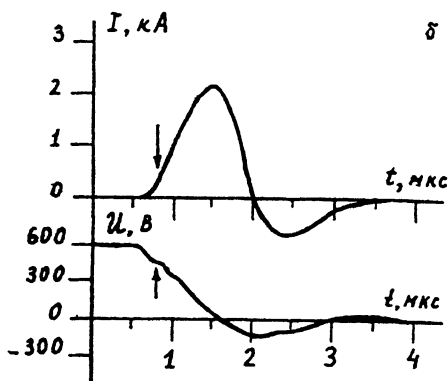
2. Измерения проводились в малоиндуктивной вакуумной искре (см. рис. 1, а). Емкостный накопитель 1 разряжался через вакуумный промежуток катод 2 — анод 3. В качестве материала катода использовалась медь. Разряд инициировался высоковольтным пробоем поджигающего электрода 4 на катод по поверхности диэлектрика. Остаточное давление в камере 5 составляло $P \leq 2 \cdot 10^{-4}$ Тор. Ток разряда измерялся поясом Роговского, напряжение на катоде — малоиндуктивным делителем.

Характер разряда и его параметры контролировались напряжением U , до которого заряжался емкостный накопитель 1. В эксперименте U изменялось в диапазоне 40–1000 В. При больших значениях U разряд имел осциллирующий вид (см.рис. 1, б), характеризующийся высоким значением скорости нарастания тока $I \approx 10^{10}$ А/с на переднем фронте. При уменьшении U разряд становился аperiodическим, скорость нарастания тока резко падала.

Энергетический и массовый состав ионной компоненты плазменной струи анализировался времяпролетным методом с использованием одноканального электростатического анализатора типа “плоский конденсатор” 6, имеющего энергетическое разрешение $\Delta\varepsilon/\varepsilon \approx 2 \cdot 10^{-2}$. В качестве регистратора ионов на выходе анализатора располагалась микроканальная пластина с усилителем 7. Временное разрешение регистрирующего тракта было не хуже 20 нс. Анализатор позволял регистрировать ионы с энергиями $\varepsilon < 20$ кэВ.



а



б

Рис. 1. Схема эксперимента (а). Осциллограммы тока разряда и напряжения на катоде (б).

3. На осциллограммах, полученных с выхода анализатора во время разряда, регистрируются сигналы, источником которых являются ионы примесей (H^+ , C^+ , N^+ , O^+) и ионы материала катода (Cu^+ , Cu^{2+}) с энергиями в широком диапазоне значений 0.03–17 кэВ. Для ионов максимальных энергий длительность сигналов близка к временному разрешению аппаратуры. С уменьшением энергии ионов длительность сигналов возрастает. Это означает, что эффективное ускорение ионов происходит за времена, малые по сравнению с длительностью разряда. Времяпролетный анализ показал, что наиболее эффективное ускорение ионов происходит в начальной стадии разряда (отмечен стрелками на рис. 1, б), когда скорость нарастания тока максимальна.

На рис. 2 приведены энергетические спектры ионов Cu^+ при разных значениях начального напряжения на катоде U . Спектр строился по максимумам ионных сигналов. Каждая точка получена усреднением по 10 "выстрелам". Из рисунка видно, что ускоренные ионы характеризуются широким энергетическим спектром, причем ширина спектра и средняя энергия ионов $\bar{\epsilon}_i$ растут с увеличением U .

Исследование энергетических спектров ионов во всем диапазоне параметров разряда показало, что между средней энергией частиц $\bar{\epsilon}_i$ и максимальной скоростью нарастания тока в разряде \dot{I} существует зависимость (рис. 3). При $\dot{I} > 4 \cdot 10^8$ А/с эта зависимость с удовлетворительной точностью описывается степенной функцией $\bar{\epsilon}_i \sim (\dot{I})^{1.4}$.

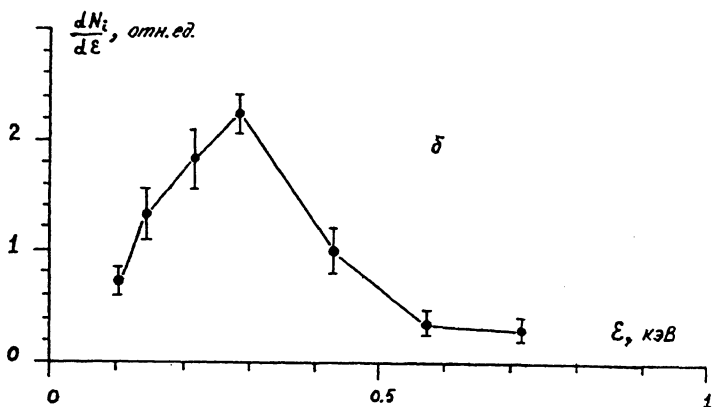
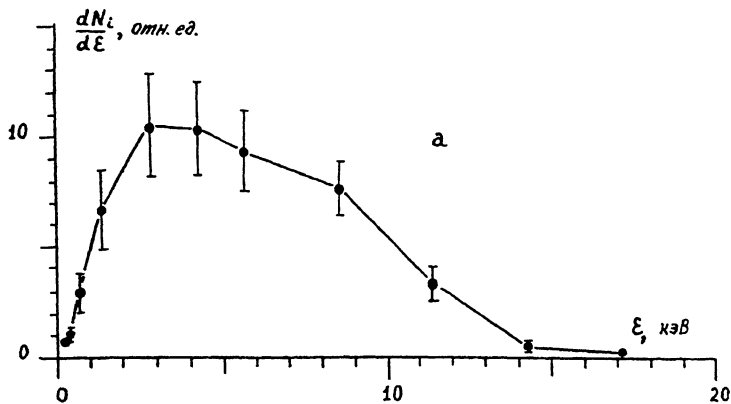


Рис. 2. Энергетические спектры ионов при напряжениях на катоде: а — $U = 600$ В; б — $U = 120$ В.

4. На рис. 3 приведены также данные, полученные по результатам работ [4,5], в которых измерены энергии ионов материала катода (Al^{n+} , W^{n+}), ускоренных в высоковольтном ($U \sim 80-300$ кВ) вакуумном разряде. Постановка эксперимента была близка к описываемой в данной работе, хотя исследование зависимости эффективности ускорения от параметров разряда не проводилось. Ускоренные ионы, наблюдаемые в [4,5], генерировались в моменты спонтанного кратковременного (~ 20 нс) резкого изменения тока разряда, т. е. возрастания величины \dot{I} . При обработке результатов [4,5] предполагалось, что, как и в описываемом эксперименте, указанные в этих работах максимальные энергии ионов в $\sim 2-3$ раза превосходят значение $\bar{\epsilon}_i$. Из рис. 3 видно, что данные этих работ подтверждают найденную нами зависимость $\bar{\epsilon}_i(\dot{I})$. Это указывает, по-видимому, на универ-

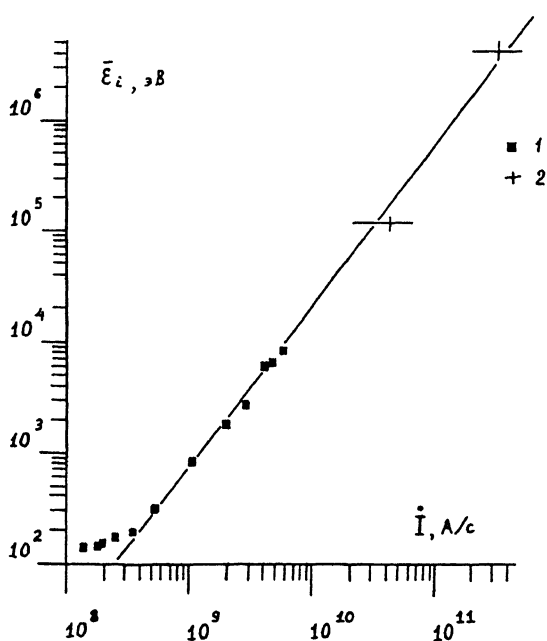


Рис. 3. Зависимость средней энергии ускоренных ионов от максимальной скорости нарастания тока: 1 — результаты данной работы; 2 — результат работ [4,5].

сальный характер наблюдаемого механизма ускорения при больших \dot{I} . Отметим также, что в отличие от работ [4,5] в нашем случае процесс генерации ускоренных ионов носит регулярный, контролируемый в широком диапазоне параметров характер, а протекание тока в плазме происходит практически без особенностей.

При меньших значениях $\dot{I} < \dot{I}_0 \approx 4 \cdot 10^8$ А/с характер зависимости $\bar{\epsilon}_i(\dot{I})$, как видно из рис. 3, резко меняется. Величина $\bar{\epsilon}_i$ практически перестает зависеть от параметров разряда. Это свидетельствует об изменении механизма ускорения ионов. Величина средней энергии ускоренных ионов $\bar{\epsilon}_i = 150$ эВ при этом близка к наблюдаемой в стационарном разряде, хотя и несколько выше (для ионов Cu^+ $\bar{\epsilon}_i = 60$ эВ [2]).

Для оценки пороговой скорости нарастания тока \dot{I}_0 воспользуемся результатами работы [6], где определено время протекания ионного тока в самоподдерживающемся цикле генерации плазменной струи с поверхности катода $t_i \approx 5$ нс. Учитывая, что ток в элементарной струе (для меди) $i \approx 3$ А [6], получаем для максимальной скорости нарастания тока

величину $\dot{I} \sim i/t_i \approx 6 \cdot 10^8$ А/с, при которой в плазме успевает установиться самосогласованное распределение параметров, обеспечивающее известный (стационарный) механизм ускорения ионов расширяющимся электронным газом [7]. Предполагая справедливость этой оценки и для плазменной струи в целом, отмечаем, что она близка к наблюдаемой в данном эксперименте величине \dot{I}_0 . При $\dot{I} > \dot{I}_0$ механизм ускорения ионов в разряде приобретает принципиально нестационарный характер.

Авторы благодарят И.А. Кринберга за полезные обсуждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (93-0217417).

Список литературы

- [1] Плютто А.А., Рыжков В.Н., Капин А.А. // ЖЭТФ. 1964. Т. 47. С. 494–507.
- [2] Davis W.D., Miller H.C. // J. Appl. Phys. 1969. V. 40. P. 2212–2223.
- [3] Лунев В.М., Овчаренко В.Д., Хороших В.М. // ЖТФ. 1977. Т. 47. С. 1486–1494.
- [4] Корон Е.Д., Плютто А.А. // ЖТФ. 1971. Т. 41. С. 1055–1060.
- [5] Корон Е.Д., Плютто А.А. // ЖТФ. 1970. Т. 41. С. 2534–2537.
- [6] Месяц Г.А. // Письма в ЖЭТФ. 1994. Т. 60. С. 514–517.
- [7] Кринберг И.А., Луковникова М.П., Паперный В.Л. // ЖЭТФ. 1990. Т. 97. С. 806–817.

Иркутский
государственный университет
Отдел автоматизации
и технической физики ИНЦ
СО РАН
Иркутск

Поступило в Редакцию
16 февраля 1995 г.