

04

Протяженная область "аномального" ускорения в катодной струе вакуумного разряда

© С.П. Горбунов, В.И. Красов, В.Л. Паперный

Иркутский государственный университет

Поступило в Редакцию 25 июля 1996 г.

В окончательной редакции 4 июля 1997 г.

Обнаружено, что "аномальное" ускорение ионов в импульсном вакуумном разряде начинается на некотором расстоянии от поверхности катода и происходит в объеме катодной струи. Установлено, что средняя энергия ионов $\bar{\varepsilon}_i$ растет с увеличением длины разрядного промежутка l .

1. Существующая модель ускорения ионов в вакуумных разрядах различных типов предполагает гидродинамический механизм увлечения частиц расширяющимся в вакуум электронным газом [1]. При этом основную энергию ($\bar{\varepsilon}_i \leq 150$ eV) ионы приобретают в столкновительной области течения на расстоянии $\leq 10^{-2}$ mm от поверхности катода [2], вследствие чего энергия ионов практически не зависит от длины разрядного промежутка, что подтверждено измерениями [3].

Наряду с этим в высоковольтных вакуумных разрядах были обнаружены потоки ионов (генерируемые в моменты "выбросов" тока) с энергиями до десятков MeV [4–6], появление которых не может быть объяснено в рамках существующей модели. Можно предположить, что такое "аномальное" ускорение ионов происходит здесь в объеме катодной струи (см., например, [7]), однако экспериментальные подтверждения этого отсутствуют.

Ранее в работах [8,9] были исследованы особенности механизма ускорения ионов в малоиндуктивной вакуумной искре. Анализ полученных результатов позволил сделать вывод о единой природе ускорительного механизма в широком диапазоне энергий ускоренных ионов $\sim 10^2 \div 10^7$ eV.

Данная работа посвящена исследованию области ускорения ионов в катодной струе импульсного вакуумного разряда при условиях, когда реализуется подобный "аномальный" ускорительный механизм.

2. Эксперимент проводился на установке, аналогичной описанной в [8]. Вакуумная искра возникала при разряде емкостного накопителя через электродную систему, состоящую из игольчатого медного катода диаметром 1 мм и анода диаметром 30 мм. Анод представлял собой плоскую сетку из нержавеющей стали с размером ячеек ≈ 1 мм и мог перемещаться внутри вакуумной камеры вдоль оси катода так, что расстояние между электродами изменялось в пределах $2 \div 15$ мм. Разряд инициировался высоковольтным пробоем поджигающего электрода на катод по поверхности диэлектрической вставки. Остаточное давление в камере $< 5 \cdot 10^{-5}$ Торр. Ток разряда измерялся поясом Роговского. Характер разряда и его параметры контролировались начальным напряжением U на емкостном накопителе, которое могло изменяться в пределах $40 \div 1000$ В.

Энергетический и массовый состав ионов плазменной струи анализировался времяпролетным методом с использованием одноканального электростатического анализатора типа "плоский конденсатор", расположенного за анодом на оси разряда. Средняя энергия ионов меди Cu^+ определялась по энергетическому спектру частиц, измеренному за серию "выстрелов" при неизменном значении U методом, подробно описанным в [9].

3. В предыдущих экспериментах [8,9] было показано, что средняя энергия ускоренных ионов в катодной струе зависит от максимальной скорости нарастания тока разряда \dot{I} . Величина \dot{I} варьировалась путем изменения начального напряжения на накопителе U при фиксированной длине разрядного промежутка l . В данной работе для исследования области ускорения ионов средняя энергия ускоренных частиц определялась также для разных значений l .

На рис. 1 приведены зависимости $\dot{I}(U)$ для различных расстояний между катодом и анодом. Каждая экспериментальная точка получена усреднением по 20 "выстрелам", среднеквадратичное отклонение \dot{I} не превышало 7%. Как видно из рис. 1, величина \dot{I} однозначно определяется значением U при фиксированном l , а при уменьшении длины межэлектродного промежутка та же величина \dot{I} достигается при меньшем значении U .

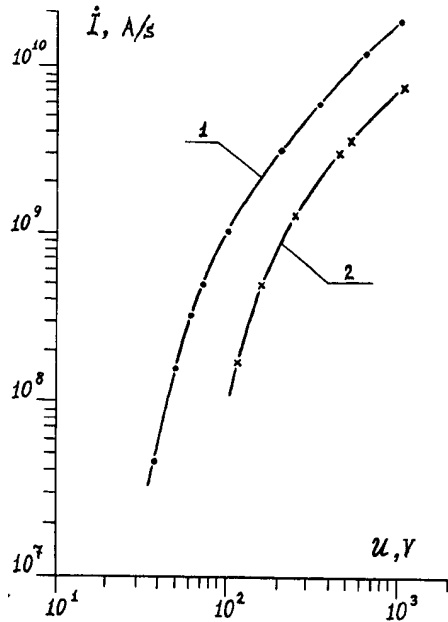


Рис. 1. Зависимость максимальной скорости роста тока \dot{I} в разряде от начального напряжения на накопителе U для разных значений межэлектродного расстояния l : 1 — $l = 3$ mm; 2 — $l = 15$ mm.

В результате измерений средней энергии ускоренных ионов было обнаружено, что для фиксированного значения \dot{I} величина $\bar{\epsilon}_i$ зависит от длины межэлектродного промежутка l . На рис. 2 приведены зависимости $\bar{\epsilon}_i(l)$ для $\dot{I} = 6 \cdot 10^9$ A/s (1), $\dot{I} = 3 \cdot 10^9$ A/s (2) и $\dot{I} = 10^9$ A/s (3). Отметим, что непосредственно регулируемым параметром в эксперименте при $l = \text{const}$ является начальное напряжение на накопителе U . Необходимое значение \dot{I} устанавливалось путем подбора соответствующего значения U (рис. 1) и контролировалось по сигналу с пояса Роговского. Полученное таким образом значение \dot{I} поддерживалось в течение ~ 100 "выстрелов", необходимых для измерения энергетического спектра и соответственно средней энергии ускоренных ионов $\bar{\epsilon}_i$. Из рис. 2 видно, что при фиксированном значении \dot{I} величина $\bar{\epsilon}_i$ растет практически пропорционально l , причем

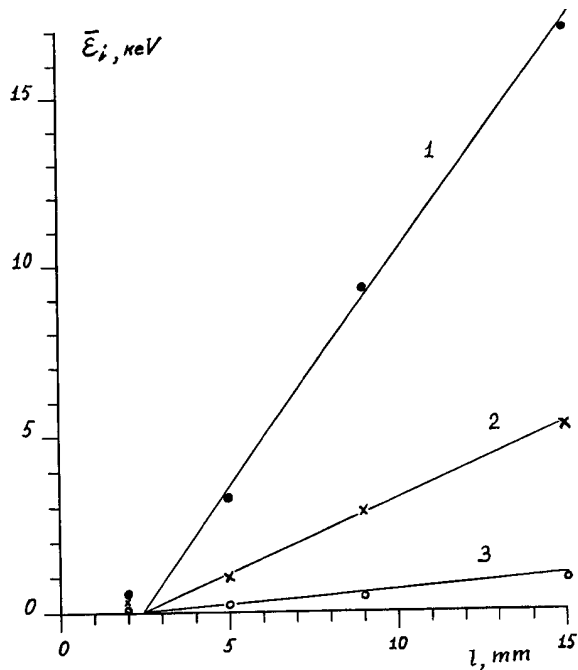


Рис. 2. Зависимость средней энергии ускоренных ионов $\bar{\epsilon}_i$ от длины межэлектродного промежутка l для разных значений максимальной скорости роста тока в разряде \dot{I} .

эта зависимость начинается на некотором минимальном расстоянии от поверхности катода $l^* \approx 2 \div 3$ mm. Коэффициент пропорциональности $d\bar{\epsilon}_i/dx$ растет с увеличением \dot{I} вплоть до значений $d\bar{\epsilon}_i/dx \approx 1370$ eV/mm для $\dot{I} = 6 \cdot 10^9$ A/s.

4. Полученная в эксперименте зависимость энергии ускоренных ионов от длины межэлектродного промежутка означает, что механизм "аномального" ускорения включается только при достаточном удалении плазменной струи от катода (т.е. при $l > l^*$) и ускорение частиц происходит в течение всего их дальнейшего пути к аноду. Интересно отметить, что в уже цитированных работах [4–6], где также наблюдалось "аномальное" ускорение ионов, расстояние между катодом и анодом было достаточно велико ($6 \div 20$ mm).

Эффективность механизма можно характеризовать "силой" $d\bar{\epsilon}_i/dx$, величина которой в данном диапазоне параметров практически остается постоянной по длине разрядного промежутка и зависит только от скорости нарастания тока разряда \dot{I} .

Возможной причиной ускорения ионов в объеме катодной струи могут быть магнитогидродинамические силы, связанные с протекающим в ней током и приводящие к сжатию струи собственным магнитным полем (см., например, [10]). Для рассмотрения такой возможности обратимся к работе [11], где этот эффект наблюдался при параметрах импульсного вакуумного разряда, близких к тем, при которых получены результаты данной работы. При сжатии плазменной струи формировался цилиндрический токовый канал диаметром $d \approx 2 \div 3$ мм, причем формирование происходило на расстоянии от катода, близком к d . Это означает, что здесь магнитные силы начинают существенно влиять на движение плазменной струи. Учитывая, что на таком же расстоянии от катода начинается "аномальное" ускорение ионов, можно предположить, что ускорение ионов связано с действием магнитных сил.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 95-02-04026а).

Список литературы

- [1] Кринберг И.А., Луковникова М.П., Паперный В.Л. // ЖЭТФ. 1990. Т. 97. В. 3. С. 806–820.
- [2] Кринберг И.А. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 18. С. 81–85.
- [3] Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984. 256 с.
- [4] Корон Е.Д., Плотто А.А. // ЖТФ. 1971. Т. 41. С. 1055–1060.
- [5] Корон Е.Д., Плотто А.А. // ЖТФ. 1970. Т. 40. С. 2534–2537.
- [6] Bradley L.P., Kuswa G.W. // Phys. Rev. Lett. 1972. V. 29. P. 1441–45.
- [7] Незлин М.В. Динамика пучков в плазме. М.: Энергоатомиздат, 1981. 318 с.
- [8] Астраханцев Н.В., Вантеев А.В. и др. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 11. С. 37–41.
- [9] Astrakhantsev N.V., Krasov V.I., Paperny V.L. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1995. V. 28. P. 2514–2518.
- [10] Blaugrund A.E., Cooperstein G. // Phys. Rev. Lett. 1975. V. 34. P. 461–464.
- [11] Алферов Д.Ф., Коробова Н.И., Сибиряк И.О. // Физика плазмы. 1993. Т. 19. В. 3. С. 399–410.