

04

Энергетический и зарядовый состав потока плазмы наносекундной вакуумной искры

© И.Л. Музыкин, С.В. Барахвостов, Ю.А. Земсков

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

E-mail: im@ier.uran.ru

Поступило в Редакцию 1 февраля 2006 г.

Исследовалась вакуумная искра. К вакуумному промежутку прикладывался импульс напряжения длительностью 4 ns и амплитудой 150 kV. При анализе потока плазмы, исходящего из катодной области, обнаружены ионы материала катода с энергиями до 150 keV. Использовались медный и графитовый катоды. В случае графитового катода наблюдались только однозарядные ионы углерода с энергетическим распределением, имеющим колоколообразную форму. В случае медного катода зафиксированы зарядовые числа вплоть до 3, энергетическое распределение имеет несколько максимумов. Характерные энергии ионов зависят от расстояния анод-катод.

PACS: 52.80.Vp

Известны исследования энергетических характеристик вакуумных искр [1]. Во всех исследованиях с использованием энергетических анализаторов получаются средние энергии в десятки keV. В работе [2] были сделаны измерения энергетического спектра ионов искры с медным катодом в зависимости от расстояния катод-анод. Средние энергии ионов прямо пропорциональны расстоянию анод-катод, что подтверждает тезис об ускорении ионов на больших расстояниях от катода. Целью данной работы является анализ плазмы кратковременной вакуумной искры. Импульс напряжения должен быть достаточен, чтобы на катоде начались взрывоэмиссионные [3] процессы, но напряжение на промежутке не должно оказывать существенного влияния на распространение плазмы в промежутке катод-анод.

Экспериментальная установка и методика. Был использован высоковольтный импульсный генератор РАДАН-150 [4] с длительностью импульса 4 ns и амплитудой 150 keV. Так как вакуумный диод

Содержание (%) ионных фракций потока плазмы искры с медным катодом

Расстояние, mm	Cu ⁺¹	Cu ⁺²	Cu ⁺³
5	12	55	33
7	10	53	37
10	14	48	38
15	4	43	53

не является для генератора согласованной нагрузкой, то реальный импульс напряжения на промежутке представляет собой совокупность первоначального импульса и отраженных импульсов, затухающих со временем. Весь процесс отражения составляет до 20 ns. Катод представлял собой графитовое или медное острие с углом заострения 10° и радиусом скругления 0.1 mm. Анод представлял собой сетку из 50 μm железной проволоки с шагом 1.5 mm. Расстояние катод-анод изменялось в пределах 5–15 mm. Эксперименты проводились в вакууме 10⁻⁴ Pa, создаваемом паромасляным насосом с вымораживанием паров. Плазма анализировалась спектрометром Томсона с автоматической системой фотометрирования, описанной в [5].

Результаты экспериментов и обсуждение. На рис. 1 представлены усредненные по нескольким десяткам единичных импульсов энергетические спектры ионов медной искры. Если для графитового катода были замечены только однократно заряженные ионы С, то для медного катода зарядность ионов Cu доходила до 3. Спектрограмма медной искры при зазоре 5 mm содержала также следы 4-зарядных ионов, мало отличимые от шума. Измеренный ранее [5] состав плазмы импульсного пробоя по диэлектрику показывает наличие 4-кратно заряженных ионов С. Причем разряд осуществлялся с использованием того же источника напряжения и при сравнимых расстояниях анод-катод. В целом зарядовый состав короткой искры (см. таблицу) не отличается от измеренного ранее [6] в дуговом разряде.

Это может свидетельствовать о том, что ионизационные процессы в плазме искры и дуги схожи и ионизационный состав формируется в первые десятки наносекунд разряда. Измеренные ранее [7] средние времена жизни катодного пятна дают значение 20–50 ns. Это гарантирует, что был измерен ионизационный состав плазмы первого

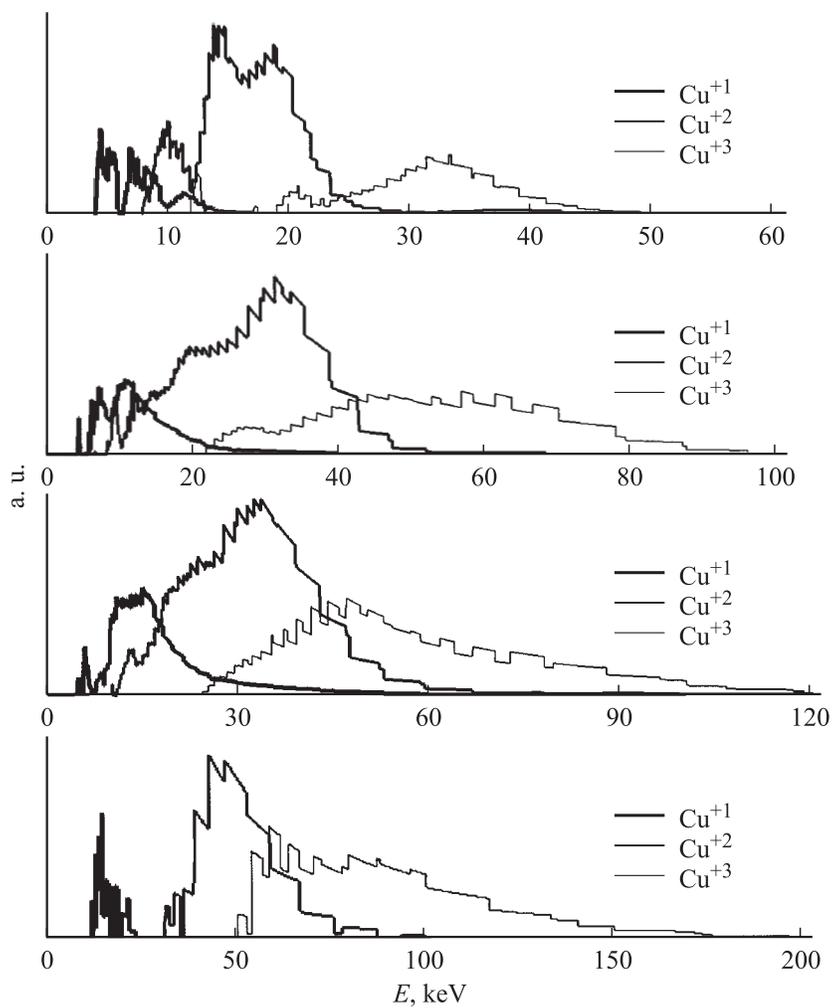


Рис. 1. Энергетические спектры ионов Cu для различных расстояний анод-катод. Сверху вниз 5, 7, 10, 15 mm.

взрывоэмиссионного процесса (эктона) [3]. Эксперимент показал, что максимальные энергии ионов достигают 150 keV для медного катода и 30 keV — для графитового. Измеренные ранее [8] скорости разлета взрывоэмиссионной плазмы составили $2 \cdot 10^6$ cm/s. При этой скорости за время в 20 ns плазма успевает пройти 0.5 mm, что исключает пере-мыкание плазмой промежутка. В нашем случае максимальные скорости ионов превышают 10^7 cm/s, что может говорить о том, что помимо основного плазменного облака в искре присутствуют группы аномально ускоренных ионов. Доля таких ионов относительно основного потока остается предметом дальнейших исследований.

Из рис. 1 видно, что энергетическое распределение ионов медной искры имеет несколько (до 3) основных максимумов. Эти максимумы имеют тенденцию к смещению в область больших энергий с ростом расстояния анод-катод и ростом заряда иона. Распределение ионов углерода для графитового катода имеет только один максимум. Такое существенное различие в характере распределения может быть связано с наличием многозарядных ионов и, как следствие, процессов перезарядки в медной искре. Все остальные условия разряда фактически идентичны. Наличие многих максимумов в энергетическом распределении было замечено также и в дуговом разряде [9], и в вакуумном пробое по диэлектрику [5]. На рис. 2 представлены графики изменения положений отдельных максимумов в зависимости от расстояния анод-катод для медной и графитовой искры. Из графиков видно, что максимумы в распределении однозарядных ионов С графитовой искры и однозарядных ионов Си медной искры имеют зависимость от межэлектродного расстояния, близкую к линейной. Кроме того, положения максимумов энергий ионов углерода и однозарядной меди имеют близкие значения. Зависимость максимумов двух- и трехзарядных ионов Си далека от линейной. После резкого подъема около 7 mm в дальнейшем рост не столь существенен. Само наличие зависимости энергий ионов от расстояния анод-катод является неожиданным фактом. Можно предположить, что сам импульс напряжения не имеет решающего значения для ускорения ионов. Здесь важное значение могут иметь собственно сам процесс расширения плазмы в вакуум и конфигурация электродов. Из механизмов ускорения ионов могут рассматриваться кулоновский взрыв [10] и ускорение ионов в глубокой потенциальной яме [11]. Анод может в этом случае работать как коллектор электронов, создающий в расширяющейся плазме нескомпенсированный объемный заряд. Чем

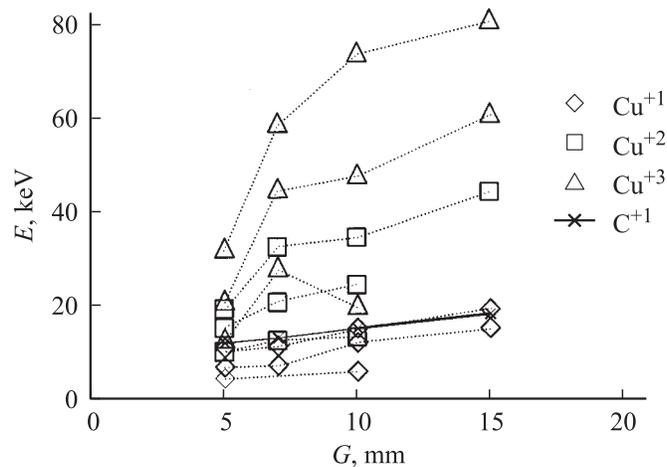


Рис. 2. Зависимость положений максимумов энергетического распределения от расстояния анод-катод для ионов меди и углерода.

далее расположен анод, тем дольше действуют коллектор электронов и процесс расталкивания ионов. При достижении плазмой анода потенциал плазмы сравнивается с потенциалом заземленного анода и процесс ускорения заканчивается. С другой стороны, если влияние длительности импульса на границу плазмы,двигающуюся со скоростью $2 \cdot 10^6$ см/с незначительно, то более скоростная часть ионов, обсуждаемая в данной работе, может значительную долю расстояния до анода преодолевать в присутствии внешнего поля. При небольших расстояниях катод-анод это влияние может быть более заметно. При увеличении межэлектродного зазора с падением электрической напряженности в промежутке влияние импульса напряжения на результирующую энергию ионов должно уменьшаться. Возможно, этим можно объяснить изменение характера зависимости энергий от расстояния в районе 7 мм.

Еще один интересный факт был замечен при подаче на промежуток положительного импульса. Центральный острый электрод становился анодом, в роли катода выступала железная сетка. При проведении экспериментов сигнала ионного потока обнаружено не было. Если принять, что область ускорения ионов распространяется, по крайней

мере, на 10–15 mm, она вряд ли может быть затенена 50- μ m катодной проволокой. Если принять за механизм ускорения образование глубокой потенциальной ямы, то ионы из этой области должны ускоряться и в направлении катода. Отсутствие сигнала ионов свидетельствует о том, что область ускорения находится в пределах 50–100 μ m и затеняется катодной проволокой либо этот механизм ускорения ионов в этом случае неприменим.

Выводы. Зарядовый состав плазмы наносекундной вакуумной искры в основном совпадает с зарядовым составом дугового разряда. Энергетическое распределение ионов искры с медным катодом имеет несколько максимумов, максимальные энергии ионов меди достигают 150 keV, а ионов углерода 30 keV. Максимумы энергетического распределения смещаются в сторону более высоких энергий с ростом заряда иона и с увеличением межэлектродного расстояния.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 05-02-17650 и 05-02-17612.

Список литературы

- [1] Коронн Е.Д., Плютто А.А. // ЖТФ. 1971. Т. 41. С. 1055–1060.
- [2] Горбунов С.П., Красов В.И., Паперный В.П. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 4. С. 66–70.
- [3] Mesyats G.A. Cathode phenomena in a vacuum discharge: The breakdown, the spark and the arc. НАУКА, 2000. 400 p.
- [4] Загулов Ф.Я., Котов А.С., Шпак В.Г., Юрике Я.Я., Яландин М.И. // Приборы и техника эксперимента. 1989. № 2. С. 146–149.
- [5] Muzukin I.L., Barakhvostov S.V. // IEEE Trans. On Plasma Sci. October 2005. V. 33. N 5. P. 1654–1657.
- [6] Graig Miller H. // J. Appl. Phys. May 1972. V. 43. N 5.
- [7] Bochkarev M.B., Uimanov I.V. // In Proc. ISDEIV XX. 2002. P. 372–375.
- [8] Mesyats G.A., Rotshtein V.P., Fursei G.N. // Sov. Phys.-Tech. Phys. 1970. V. 15. P. 1202–1204.
- [9] Плютто А.А., Рыжков В.Н., Капин А.Т. // ЖЭТФ. 1964. Т. 47. В. 8. С. 494–507.
- [10] Быченков В.Ю., Ковалев В.Ф. // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 2. С. 1–6.
- [11] Баренгольц С.А., Казаринов Н.Ю., Месяц Г.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 4. С. 64–70.