

04;12

## Зарядовое распределение ионов в плазме вакуумной дуги при малых токах

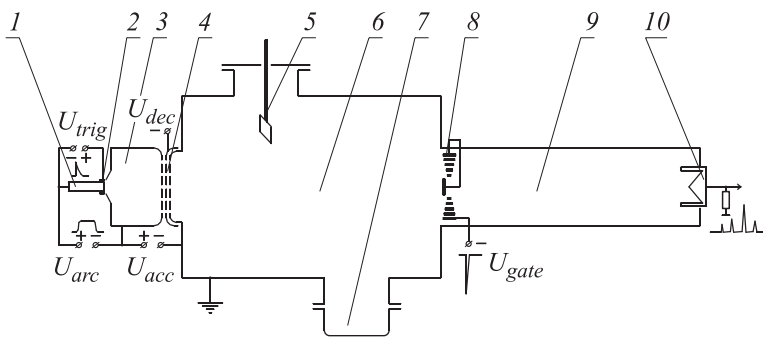
© Г.А. Месяц, Е.М. Окс

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва  
Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск  
E-mail: oks@oree.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 28 марта 2013 г.

Исследовано зарядовое распределение ионов вакуумной дуги для медных электродов при токах 8–60 А. Напряжение горения дуги при этом возрастало с 21 до 24 В. В плазме присутствуют ионы меди с зарядовыми состояниями от +1 до +4. Величина средней зарядности ионов увеличивается с 2.15 до 2.24, т.е. всего на 4% за счет небольшого увеличения долей многозарядных ионов ( $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Cu}^{3+}$ ) в общем потоке ионов. Этот вывод не противоречит выводу эктонной модели катодного пятна вакуумной дуги, согласно которой с увеличением тока прямо пропорционально растет и число ячеек в пятне, образованных за счет микровзрывов на катоде.

В основе современных представлений о катодном пятне вакуумного разряда лежит явление взрывной электронной эмиссии (ВЭЭ) [1,2]. Эта эмиссия обусловлена быстрым разогревом и взрывом микроучастков поверхности катода за счет большой концентрации энергии в них. При микровзрыве испускаются порции электронов, названные эктонами [3]. Кроме того, в результате микровзрыва образуется плазма вакуумной дуги, расширяющаяся в межэлектродный промежуток. Процесс также сопровождается образованием жидкометаллической фракции катодного пятна вакуумной дуги, выдавливаемой из зоны его функционирования в виде капель и струй. Этот механизм вакуумной дуги получил название эктонного [4–6]. В соответствии с этим механизмом все процессы имеют циклический характер и происходят в течение времени функционирования единичной ячейки катодного пятна (эктонного цикла). Следовательно, зарядность ионов, испускаемых из катодного пятна при пороговом токе дуги и выше, не должна меняться в зависимости от тока, так как с ростом тока происходит простое увеличение числа ячеек. Это утверждение должно быть справедливо и для случая, когда ток дуги не превращает предельный ток, при котором происходит деление



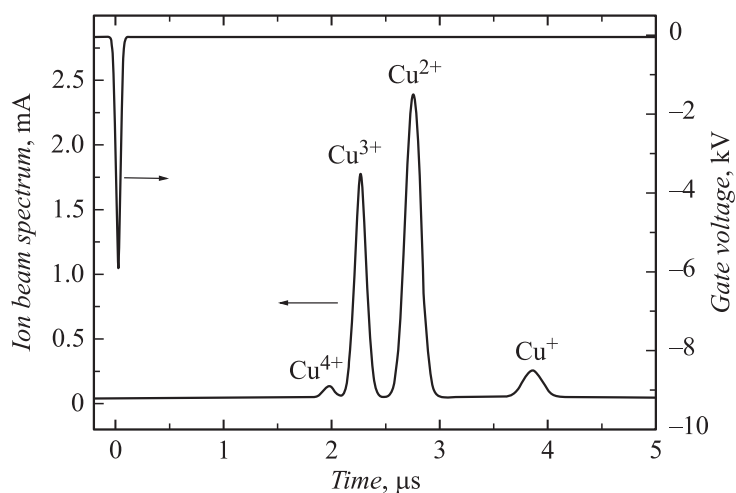
**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 — катод, 2 — „поджигающий“ электрод, 3 — полый анод вакуумного дугового разряда, 4 — трехэлектродная ионно-оптическая система, 5 — коллектор, 6 — вакуумная камера, 7 — криогенный насос, 8 — затвор времяпролетного спектрометра, 9 — труба дрейфа времяпролетного спектрометра, 10 — цилиндр Фарадея.

группового пятна, состоящего из отдельных ячеек (для медного катода порядка 100 А). Для проверки же применимости эктонной модели катодного пятна необходимо проводить эксперимент по измерению зарядового состава дуговой плазмы при низких токах, чтобы магнитное поле тока не влияло на процессы в дуговой плазме.

Развиваемые нами эмиссионные методы исследования фундаментальных процессов в вакуумной дуге основаны на измерениях масс-зарядового спектра ионов, извлеченных из плазмы, а также на анализе отклика этого спектра на изменения внешних параметров дуги [7,8]. Такой подход оправдан тем, что активные ионизационные процессы в вакуумной дуге происходят главным образом в катодном пятне и близлежащей к нему катодной области разряда. В более удаленных от катода областях масс-зарядовый состав плазмы как бы „замораживается“ и происходит лишь разлет плазмы.

Исследование проводилось с применением экспериментального стенда Лаборатории плазменных источников ИСЭ СО РАН, оснащенного ионным источником Mevva 5.Ru на основе вакуумного дугового разряда [9]. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Инициирование вакуумной дуги в ионном источнике традиционно осуществлялось разрядом по поверхности керамики между медным катодом 1 диаметром 6.4 mm и „поджигающим“ электродом 2 при



**Рис. 2.** Типичный зарядный спектр ионов для медного катода. Ток дуги — 50 А.

приложении между ними импульса высокого напряжения (до 10 kV) короткой длительности ( $20 \mu\text{s}$ ). Выбор меди в качестве материала катода был во многом обусловлен наиболее частым его использованием в качестве тестового при исследованиях феномена катодного пятна вакуумной дуги. Медная плазма, эмитируемая катодными пятнами, заполняет полый анод 3, с торцевой поверхности которого осуществлялось извлечение ионов. Ускорение ионов и формирование пучка обеспечивалось приложением постоянного напряжения 15 kV. Ускоренный ионный пучок транспортировался в эквипотенциальном пространстве заземленной вакуумной камеры 6, где его зарядовый состав анализировался времяпролетным спектрометром. Параметры спектрометра (пролетная база — 1 м, импульс отклоняющего напряжения на затворе 5 kV и его длительность 80 ns) обеспечивали возможность четкого разрешения всех возможных масс-зарядовых состояний, генерируемых в вакуумной дуге с медным катодом. Для исследования зависимости зарядового распределения ионов от тока разряда импульс тока вакуумной дуги имел экспоненциально спадающий вид. Полная длительность импульса по основанию достигала 2 ms, а максимальная начальная амплитуда — 100 А. Частота следования импульсов составляла  $5 \text{s}^{-1}$ . Экспонен-

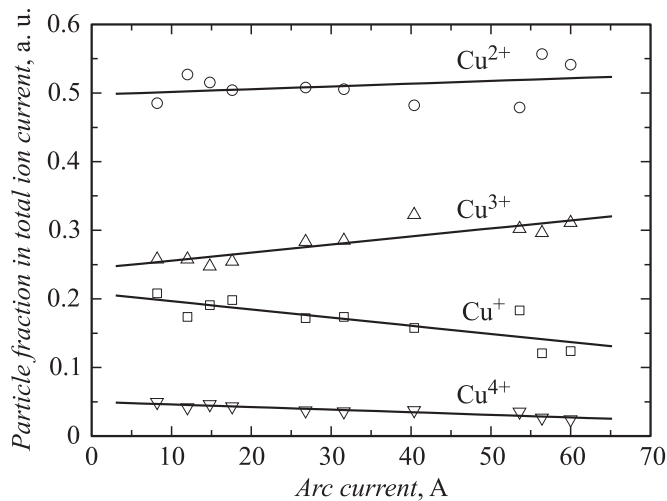
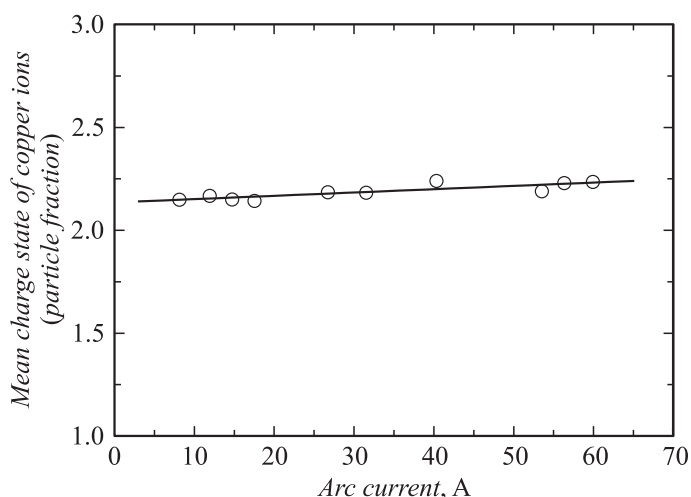


Рис. 3. Влияние тока дугового разряда на зарядовый состав ионного пучка.

циально спадающая форма импульса вакуумного дугового разряда позволяла реализовать его функционирование при достаточно малых токах. В экспериментах по изучению влияния тока дугового разряда на зарядовое распределение ионов изменение тока дуги (в пределах 8–60 А) осуществлялось варьированием задержки времени приложения импульса отклоняющего напряжения на затвор спектрометра относительно фронта импульса тока дуги. При этом для исключения влияния состояния поверхности катода на зарядовое распределение ионов эта минимальная задержка составляла  $550 \mu\text{s}$ .

Для измерения параметров дугового разряда и ионного пучка использовались общепринятые методики и оборудование: осциллограф Tektronix 3014 с высоковольтным пробником, измерители импульсного тока Pearson, цилиндр Фарадея с магнитной отсечкой вторичных электронов. Вакуумная камера откачивалась двухступенчатой системой безмасляной откачки, включающей криогенный высоковакуумный и спиральный форвакуумный насосы. Все измерения проводились при остаточном давлении газа  $3 \cdot 10^{-6}$  Торр.

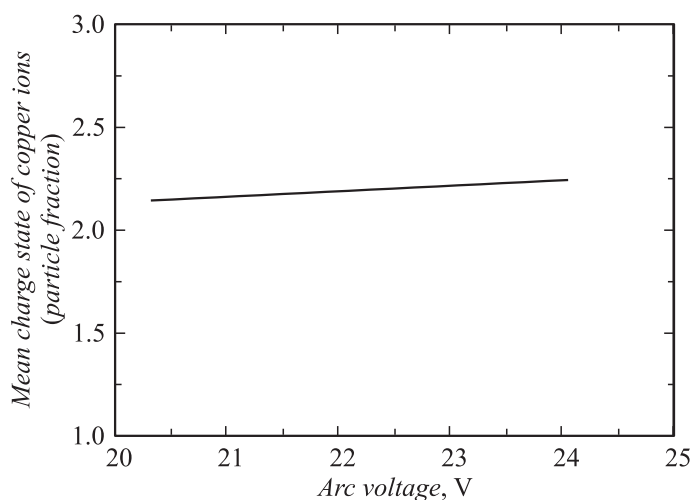
В исследуемом диапазоне токов для дугового разряда характерна слаборастающая вольт-амперная характеристика. Так, увеличение тока



**Рис. 4.** Зависимость средней зарядности ионов меди от тока вакуумной дуги.

дуги с 8 до 60 А приводило к повышению напряжения горения с 21 до 24 V. Как показали результаты измерений, в пучке присутствуют ионы меди с зарядовыми состояниями от 1+ до 4+ (рис. 2). Наблюдаемый в эксперименте зарядовый спектр ионов меди является типичным и практически не отличается от измеренных ранее другими исследователями [10]. Отсутствие примесей ионов газов связано с эффективной очисткой рабочей поверхности катода непосредственно в процессе функционирования вакуумной дуги.

Увеличение тока разряда несколько изменяет распределение зарядовых компонентов ионов меди (рис. 3). Доля трехзарядных ионов  $\text{Cu}^{3+}$  слегка возрастает, а однозарядных  $\text{Cu}^{+}$  немного снижается. Практически не изменяется доля двухзарядных ионов меди  $\text{Cu}^{2+}$ . Поскольку двухзарядный компонент ионного тока доминирует в спектре, то это отражается на достаточно слабом росте средней зарядности ионов при увеличении тока дуги (рис. 4). В диапазоне токов от 8 до 60 А величина средней зарядности возрастает не более чем на 4%. Обратим внимание на тот факт, что расчет долевых соотношений и средней зарядности ионов производился по частицам, а не по их токовым составляющим.



**Рис. 5.** Параметрическая зависимость средней зарядности ионов меди от напряжения горения вакуумной дуги.

Такой подход позволяет наиболее правильно определить долю каждой зарядовой фракции в ионном пучке.

Наблюдаемая в эксперименте практическая независимость средней зарядности ионов при малых значениях тока дуги согласуется с ранее проведенными измерениями зарядового состава ионов меди при больших токах разряда [8]. И в этих экспериментах в диапазоне токов от 100 до 400 А повышение тока слабо влияло на изменение средней зарядности ионов.

Увеличение тока разряда сопровождается повышением напряжения горения и соответствующим возрастанием температуры электронов в плазме вакуумной дуги. По-видимому, этот фактор следует принять во внимание при объяснении слабого роста средней зарядности ионов. Оценка влияния напряжения горения вакуумной дуги на зарядовый состав плазмы осуществлялась с помощью параметрической зависимости (рис. 5), построенной на основе линейной аппроксимации вольт-амперной характеристики разряда и зависимости средней зарядности от тока. Корреляция между напряжением горения дуги и средней зарядностью ионов проявляется в полной мере.

В заключение отметим, что измерены зарядовые распределения ионов меди в плазме вакуумной дуги при малых токах. При увеличении тока разряда от 8 до 60 А средняя зарядность ионов меди слабо возрастает (на 4%). При этом увеличение средней зарядности ионов коррелирует с ростом напряжения горения дуги. Полученные результаты находятся в согласии с ранее проведенными исследованиями влияния тока дуги на зарядовое распределение ионов при больших токах и соответствуют основным положениям эктонной модели катодного пятна вакуумной дуги.

Авторы выражают благодарность К.П. Савкину за помощь в проведении экспериментов.

## Список литературы

- [1] Месяц Г.А. Исследования по генерированию наносекундных импульсов большой мощности: Дис. . . . докт. техн. наук. Томск: Томский политехнический институт, 1966.
- [2] Месяц Г.А., Бугаев С.П., Проскуровский Д.И. // УФН. 1971. Т. 104. В. 4. С. 673–675.
- [3] Месяц Г.А. Взрывная электронная эмиссия. М.: Физматлит, 2011.
- [4] Месяц Г.А. // Письма в ЖЭТФ. 1993. Т. 57. В. 2. С. 88–90.
- [5] Месяц Г.А. // Письма в ЖЭТФ. 1994. Т. 60. В. 7/8. С. 514–517.
- [6] Месяц Г.А. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. М.: Наука, 2000.
- [7] Yushkov G., Oks E., Anders A., Brown I. // J. Appl. Phys. 2000. V. 88. N 10. P. 5618–5625.
- [8] Oks E.M., Anders A., Brown I.G. et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1996. V. 24. N 3. P. 1174–1183.
- [9] Nikolaev A.G., Oks E.M., Savkin K.P. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2012. V. 83. P. 02A501.
- [10] Brown I.G., Godechot X. // IEE Trans. Plasma Sci. 1991. V. 19. N 5. P. 713–717.