

04

Перенос массы и заряда катодным факелом низкоиндуктивной вакуумной искры

© С.П. Горбунов, В.И. Красов, В.Л. Паперный,
Ю.В. Коробкин, И.В. Романов

Иркутский государственный университет
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
E-mail: korobkin@sci.lebedev.ru

Поступило в Редакцию 24 июня 2005 г.

С помощью времяпролетных измерений в низкоиндуктивной вакуумной искре установлен вклад быстрой и медленной ионных компонент в среднюю массовую скорость плазмы катодного факела. Посредством баллистического маятника измерен полный механический импульс плазмы факела. Из полученных данных определена величина коэффициента ионной эрозии материала катода в диапазоне измерения амплитуды разрядного тока 3–13 кА и скорости его нарастания $4 \cdot 10^9$ – $1.5 \cdot 10^{10}$ А/с. Показано, что коэффициент эрозии мало меняется в указанном диапазоне параметров разряда и его величина близка к известной по измерениям в вакуумных дугах.

1. Известно, что в вакуумном разряде плазменный факел генерируется катодом и расширяется в межэлектродный промежуток. Согласно эктонной модели, процесс генерации плазмы имеет сходный характер в стационарных вакуумных дугах и в искровых разрядах [1]. Модель позволила для различных материалов катода оценить важный параметр процесса — коэффициент ионной эрозии $\gamma = M/Q$ (отношение перенесенной разрядным током массы вещества катода к протекшему заряду), и показать, что его величина не зависит от скорости нарастания тока, когда она меньше некоторой пороговой величины $(dI/dt)_{th} \approx 1.4 \cdot 10^8$ А/с [2]. Экспериментально величина γ была ранее измерена в стационарном дуговом разряде для разных материалов катода при токах дуги в диапазоне от 50 А до 1 кА [3]. Близкие к приведенным в [3] значения получены в недавних измерениях, выполненных в импульсной дуге длительностью около $300 \mu\text{s}$ [4]. Хорошее

совпадение расчетных значений γ с экспериментальными данными для различных материалов катода явилось важным аргументом в пользу справедливости эктонной модели для вакуумных дуг. Менее изученным остается вопрос о применимости этой модели в искровых разрядах, где измерения ионной эрозии проводились при относительно невысоких значениях разрядного тока (в диапазоне десятков ампер) и скоростях нарастания тока порядка 10^9 А/с [5,6]. Целью данной работы было установить основные закономерности переноса заряда и массы вещества катода в искровом разряде при существенно более высоких значениях амплитуды и скорости нарастания тока: свыше 10 кА и $3 \cdot 10^{10}$ А/с соответственно.

2. Эксперименты проводились в низкоиндуктивном ($L = 40$ нН) вакуумном искровом разряде. Электродная система состояла из медного катода — цилиндра диаметром 1 мм и расположенного на расстоянии 9 мм от него анода, находящегося под потенциалом заземленной вакуумной камеры (диаметром 50 мм, длиной 100 мм), где поддерживалось остаточное давление $(5-8) \cdot 10^{-6}$ Торр. Накопитель ($C = 2 \mu\text{F}$) заряжался до напряжения U_d , после чего на торце катода инициировался разряд с помощью высоковольтного пробоя по поверхности диэлектрической вставки между катодом и поджигающим электродом. Ток разряда, амплитуда которого определялась величиной U_d , измерялся непосредственно в цепи катода. Временное разрешение регистрирующей системы составляло около 40 нс.

Эксперимент проводился в двух вариантах. Для измерений скорости ионного потока времяпролетным способом использовалась конструкция разрядной камеры с сетчатым анодом, через который плазма, генерируемая на торцевой поверхности катода, расширялась в дрейфовую трубку длиной $L = 10$ или 36 см. После прохождения трубки ионы регистрировались коллектором, находящимся под отрицательным относительно анода потенциалом, равным — 200 В, при котором регистрировался ионный ток насыщения. Во втором варианте для измерения механического импульса катодной струи использовался кольцевой анод с центральным отверстием диаметром 10 мм, в которое из межэлектродного промежутка вытекала плазменная струя. Непосредственно за анодом располагался баллистический маятник в виде металлического диска массой 0.35 г, подвешенный на заземленной проволочке. Под действием плазмы катодной струи диск отклонялся и по углу отклонения оценивался механический импульс, сообщенный диску струей.

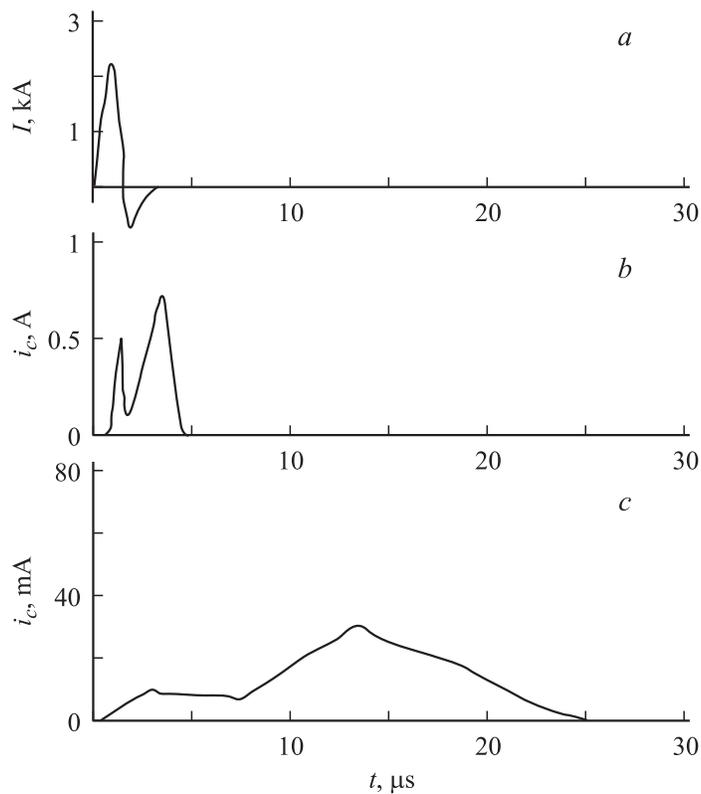


Рис. 1. Осциллограммы тока разряда (a) сигналов ионного тока с коллектора при длине дрейфовой трубки 10 см (b) и 36 см (c).

3. Результаты времяпролетных измерений для разных длин дрейфовой трубки приведены на рис. 1. Из рисунка видно, что в плазме катодного факела регистрируются две группы ионов. Меньшую задержку относительно начала разряда имеет быстрая ионная компонента, большая задержка соответствует медленной компоненте. Анализ данных показал, что быструю компоненту составляют многозарядные ионы материала катода, генерируемые в начальной стадии разряда [7]. Медленная компонента представляет собой основную часть

ионов плазмы катодной струи, средняя скорость этой компоненты при малой амплитуде разрядного тока близка к стандартной скорости ионов в вакуумной дуге [8]. С ростом амплитуды разрядного тока средние скорости обеих компонент также возрастают. Для данных исследований важно, что число быстрых ионов в импульсе, пропорциональное площади под соответствующей частью осциллограммы, как видно из рис. 1, *b*, даже с учетом более высокого среднего заряда составляет заметную часть (несколько десятков процентов) полного ионного потока. Поэтому, принимая во внимание, что скорость быстрых ионов в 3–5 раз превышает скорость основной компоненты, необходимо учитывать их вклад в полный механический импульс катодной струи.

При заданном значении напряжения накопителя и определяемой им амплитуды разрядного тока скорости обеих ионных компонент были вычислены путем усреднения данных, полученных из набора осциллограмм. Скорость основной компоненты определялась по времени задержки максимума соответствующего сигнала на осциллограмме тока коллектора относительно момента достижения первого максимума разрядного тока, когда, согласно эктонной модели, достигается также максимум ионного тока. Скорость быстрой компоненты определялась по времени задержки максимума соответствующего сигнала относительно момента $t_0 = 300$ ns после начала разряда. Вблизи этого момента, как показали предыдущие эксперименты, генерируются пучки быстрых многозарядных ионов [7]. Определение скорости проводилось лишь для случая дрейфовой трубки длиной $L = 36$ см, где, как видно из рис. 1, эта процедура имеет удовлетворительную точность (около 20%).

Из скоростей ионных компонент, найденных описанным способом, находилась средняя массовая скорость плазмы катодного факела \bar{V}_m . При этом учитывалось относительное содержание обоих видов ионов, которое оценивалось по коллекторному сигналу для $L = 10$ см. Рис. 2 показывает, что скорость существенно увеличивается с ростом амплитуды разрядного тока. На рисунке приведены также результаты измерения механического импульса факела P , полученные по величине отклонения баллистического маятника. При этом предполагалось, что плазменный факел полностью передает свой импульс маятнику, и пренебрегалось возможным отражением ионов от поверхности маятника. Из данных

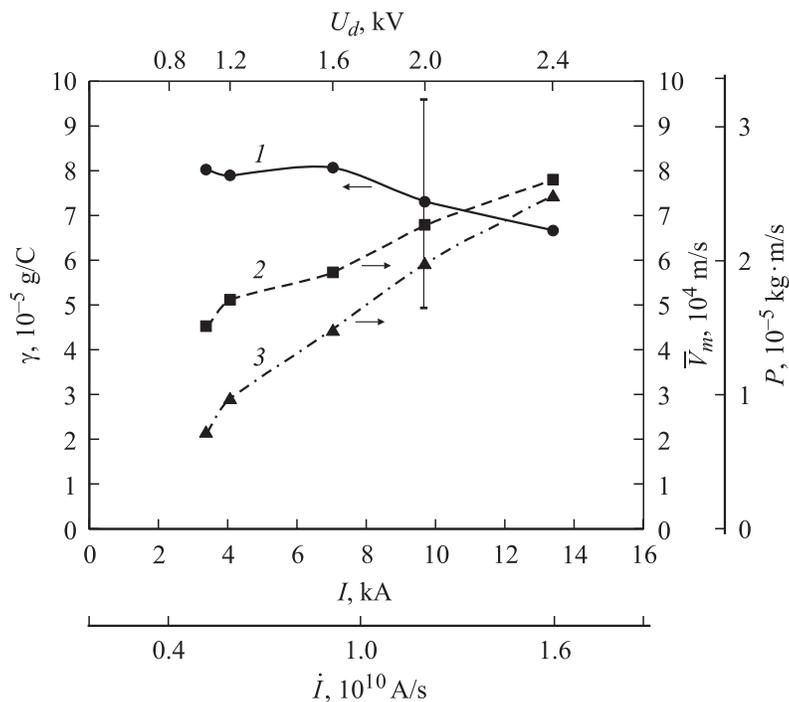


Рис. 2. Зависимость от параметров разряда коэффициента ионной эрозии (1), средней массовой скорости (2) и механического импульса (3) плазмы катодного факела.

измерений по формуле

$$\gamma = \frac{M}{Q} = \frac{P\bar{V}_m}{Q} = \frac{P/\bar{V}_m}{CU_d}$$

оценивался коэффициент ионной эрозии. Здесь M и Q — полная масса вещества катода и суммарный заряд, переносимые плазмой факела в импульсе, соответственно. Зависимость коэффициента эрозии от параметров разряда также приведена на рис. 2. Рисунок показывает, что при увеличении амплитуды и скорости нарастания разрядного тока более чем в 3 раза и примерно таком же возрастании механического

импульса плазмы катодной струи изменение коэффициента ионной эрозии составляет около 20% и лежит в пределах точности измерений. Абсолютная величина этого параметра, учитывая невысокую точность механических измерений, оказалась достаточно близкой к известному значению для вакуумных дуг с медным катодом: $\gamma \approx 40 \mu \text{g/C}$ [3].

4. Полученные результаты показывают, что коэффициент ионной эмиссии для данного материала катода является устойчивым параметром, имеющим близкие значения как для стационарных дуг, так и для искровых разрядов с высокой скоростью нарастания тока (более 10^{10} A/s). Величина параметра сравнительно мало меняется при изменении тока вакуумного разряда в диапазоне величин от десятков ампер (в дуге) до более чем 10 кА (в данном искровом разряде), т.е. почти на четыре порядка величины. Это свидетельствует в пользу применимости эктонной модели для разных видов вакуумных разрядов в широком диапазоне изменения их параметров.

Полученные данные позволяют также оценить для данного типа плазменного источника величину импульса плазмы катодного факела, переносимого единичным зарядом: $P/Q \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m/s} \cdot \text{C}$, что на полтора порядка превышает эту величину для вакуумной дуги (около $2 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m/s} \cdot \text{C}$ [1]). Существенно более высокий удельный импульс в нашем случае можно объяснить несколькими причинами. Во-первых, как видно из рис. 2, здесь в 3–6 раз выше, чем в дуге, скорость плазмы катодного факела; во-вторых, как известно, в вакуумном разряде при токах свыше 1 кА происходит сжатие к оси плазмы факела собственным магнитным полем [9], вследствие чего уменьшается разброс скоростей ионов по поперечной компоненте и возрастает продольный импульс плазмы; в-третьих, импульс в нашем случае может быть завышен вследствие возможного отражения ионов от поверхности маятника.

Заметим также, что для бестокового факела лазерной плазмы наличие быстрых и медленных ионов является хорошо известным фактом, который связывается с эмиссией расширяющимся в вакуум плазменным факелом потоков горячих электронов, которые увлекают амбиполярным полем часть ионов, ускоряя их до энергий, значительно превышающих энергию тепловой части ионного распределения (см., например, [10]). Недавно были обнаружены пучки быстрых электронов, генерируемые также токнесущим катодным плазменным факелом в начальной стадии горения вакуумного искрового разряда [11]. Генерация пучков в этом случае объясняется образованием во фронте

факела микропинчевых структур, где плазма нагревается до температур $T_e \approx 100\text{--}200\text{ eV}$ [11,12]. Естественно предположить, что регистрируемая в данном эксперименте быстрая ионная компонента также возникает вследствие амбиполярного увлечения электронным пучком многозарядных ионов, образовавшихся в микропинче.

Рассмотрим также некоторые возможные применения полученных результатов. В настоящее время в качестве маневровых реактивных двигателей, предназначенных для коррекции орбиты искусственных спутников Земли, используются в основном ускорители газовой плазмы на основе замкнутого дрейфа электронов. Приведенные выше результаты демонстрируют принципиальную возможность создания также на основе искрового разряда миниатюрного плазменного двигателя с достаточно высокими тяговыми характеристиками. На данном этапе исследований двигатель имеет следующие параметры:

- 1) масса (без источника питания) — не более 1 kg;
- 2) сила тяги (при частоте следования импульсов 10 Hz) — около 10^{-3} N ;
- 3) коэффициент полезного действия ($P\bar{V}_m/CU_d^2$) — до 20%;
- 4) потребляемая мощность — менее 50 W;
- 5) характеристическая скорость — до $8 \cdot 10^6\text{ cm/s}$.

Достоинствами предлагаемого типа ионного двигателя являются простота конструкции, отсутствие нагреваемых и эродирующих элементов (кроме, естественно, рабочего тела — катода), а также возможность использования металлов с большой атомной массой в качестве рабочего тела для повышения тяговых характеристик.

Работа выполнена при финансовом участии Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 03-02-16366).

Список литературы

- [1] Месяц Г.А. Эктонны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. М.: Наука, 2000. 424 с.
- [2] Mesyats G.A. // Proc. XVIII International Symposium on Discharges and Electrical Insulation Vacuum. Eindhoven, Netherlands, 1998. V. 2. P. 720–731.
- [3] Daalder J.E. // Physica B + C. 1981. V. 104. N 1. P. 91–106.
- [4] Anders A., Oks E., Yushkov G. // Proc. XXI Int. Symp. Discharges Elect. Insulation Vacuum. Yalta, Ukraine, 2004. V. 1. P. 272–275.

- [5] *Месяц Г.А., Проскуровский Д.И.* Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984. 256 с.
- [6] *Popov S.A., Proskurovsky D.I., Batrakov A.V.* // Proc. XIX Int. Symp. Discharge Elect. Insulation Vacuum. Xi'an, China, 2000. V. 1. P. 81–84.
- [7] *Artamonov M.F., Krasov V.I., Paperny V.L.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. V. 34. N 23. P. 3364–3367.
- [8] *Gorbunov S.P., Krasov V.I., Krinberg I.A., Paperny V.L.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2003. V. 12. N 3. P. 313–316.
- [9] *Алфёров Д.Ф., Коробова Н.И., Сибиряк И.О.* // Физика плазмы. 1993. Т. 19. № 3. С. 399–410.
- [10] *Rosmej F.B., Hoffmann D.H.H., Süß W.* и др. // ЖЭТФ. 2002. Т. 121. С. 73–87.
- [11] *Коробкин Ю.В., Романов И.В., Рупасов А.А., Шиканов А.С.* // ЖТФ. 2005. Т. 70. В. 9. С. 34–40.
- [12] *Артамонов М.Ф., Красов В.И., Паперный В.Л.* // Прикладная физика. 2003. № 5. С. 34–37.