

04:10
©1994КАТОДНАЯ ПЛАЗМЕННАЯ СТРУЯ ПРИ
ВАКУУМНОМ ПРОБОЕ И В ВАКУУМНОЙ ДУГЕ

И. А. Кринберг

1. Катодной струей (КС) или катодным факелом [1] называют выброс вещества с поверхности катода, который имеет место при статическом и импульсном вакуумном пробое (ВП) и в стационарной вакуумной дуге (ВД). В последнем случае плазма КС полностью перекрывает вакуумный промежуток и ток течет через проводящую среду при напряжении $U = 10 - 30$ В. При ВП замыкание тока осуществляется за счет электронной эмиссии с поверхности КС (рис. 1), а основное падение напряжения $U = 1 - 100$ кВ приходится на вакуумную область между фронтом КС и анодом [1]. Измерения показывают, что скорость V и средний заряд Z ионов при ВП больше, чем в ВД [1,2]. Поэтому часто считают [2], что на свойства КС при ВП существенно влияет нестационарность тока и высокое напряжение. В настоящей работе показано, что в различных вакуумных разрядах КС является однотипным явлением и удовлетворительно описывается единой гидродинамической теорией стационарного расширения токонесущей плазмы, если время изменения тока $\Delta t > \tau$, где $\tau \simeq 3$ нс. Отличие в значениях V и Z для разных типов разряда связано с различием в размере основания КС, т.е. катодного микропятна (эмиссионного центра [1]).

2. Рассмотрим полностью ионизованную плазменную струю, сферически расширяющуюся в вакуум с поверхности радиуса r_0 в пределах телесного угла $\Omega = 2\pi(1 - \cos \alpha)$ (рис. 1). Если через струю протекает ток I , то на расстоянии $\Delta_* = r_* - r_0 \simeq 0.1r_*$ от источника плазмы имеет место переход через скорость звука [3]. В этом сечении струи для стационарного случая имеем:

$$T_* = C_0 \left(\frac{ZI}{\Omega r_*} \right)^{2/5}, \quad (1)$$

где T_* — электронная температура, $C_0 = 0.1$ эВ (см/А)^{2/5} [3]. Значение T_* приблизительно равно максимальной температуре, которая в основном и определяет средний заряд ионов Z .

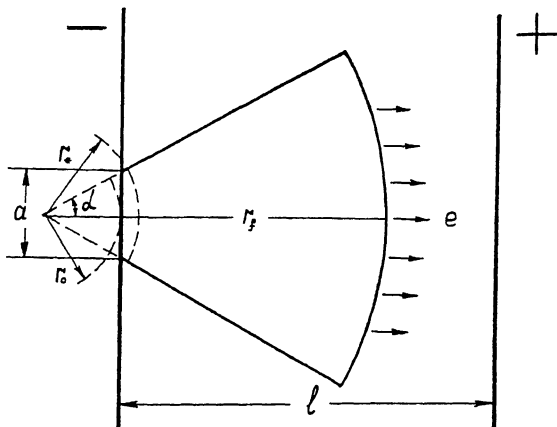


Рис. 1. Сферическая модель катодной плазменной струи.

При $r > \Delta \approx 30r_*$ энергия ионов близка к своему предельному значению $W_\infty = mV^2/2 \approx 12ZT_*$ [3]. Для предельной скорости с учетом (1) имеем:

$$V = C\eta^{1/5} \frac{Z^{7/10}}{\mu^{1/2}}, \quad (2)$$

где $\eta = I/\Omega r_*$, μ — атомная масса иона, $C = 1.5 \times 10^6 \text{ см}^{6/5}/\text{А}^{1/5} \text{ с}$.

Удобно ввести времена релаксации $\tau_* \approx \Delta_*/V_*$ ($V_* \approx V/3$ — скорость в критической точке) и $\tau \approx \Delta/V$, которые соответствуют времени установления максимальных значений электронной температуры и скорости ионов в КС. Если изменение тока или какой-либо другой процесс на катоде протекают с характерным временем Δt , то в случае $\Delta t > \tau > \tau_*$ КС можно считать квазистационарной.

3. Применим теорию расширения токонесущей плазмы для интерпретации параметров КС. Согласно экспериментальным и теоретическим оценкам [3,4], угол раствора КС $\alpha \approx 30 - 50^\circ$, что дает $\Omega \approx 1$ и $r_* \approx a$ (рис. 1), где a — размер основания КС, по порядку величины равный $a \approx 1 \text{ мкм}$ [1]. Считая, что вблизи оси КС поверхность плазменного источника соответствует поверхности катода, находим расстояние до критической точки $\Delta_* \approx 10^{-5} \text{ см}$ и характерный масштаб ускорения ионов $\Delta \approx 0.003 \text{ см}$, а также времена релаксации $\tau_* \leq 0.1 \text{ нс}$ и $\tau \approx 1 - 3 \text{ нс}$ (т.к. $V \geq 10^6 \text{ см/с}$). В случае вакуумного пробоя КС будет нестационарным образованием при положении фронта струи $r_f < \Delta$, т.е. лишь на

Параметры катодной плазменной струи

Элемент	Атомная масса	Вакуумная дуга		Вакуумный		пробой
		V , км/с	Z	V' , км/с	V'' , км/с	
Al	27	13	1.6	34	26	> 3
Ca	40	10	1.5	—	—	—
Ti	48	12	1.8	—	—	—
Ni	59	7	1.5	—	19	—
Cu	64	11	1.8	26	25	> 3
Zr	91	10	2.2	—	—	—
Mo	96	15	2.5	20	26	—
Ag	108	8	1.4	—	—	—
Ta	181	10	2.7	—	35	> 5
Pb	207	—	—	11	13	2-3

начальной стадии пробоя $\Delta t < \tau$. В последующие моменты КС можно считать квазистационарной. Действительно, измерения времени коммутации тока t_k (соответствующего моменту подхода фронта КС к аноду, т. е. $r_f \approx l$) показывают, что $l/t_k = \text{const}$ при длине межэлектродного промежутка $l = 10^{-2} - 10^0$ см [1]. Такая константа, обычно называемая скоростью разлета КС, соответствует, таким образом, предельной скорости ионов, определенной формулой (2).

В таблице собраны измерения скорости и среднего заряда ионов в плазме КС. Для ВД взяты измерения V и Z с помощью энерго-массанализатора [5]. Для ВП использованы приведенные в [1] измерения скорости границы свечения V' и расчет $V'' = l/t_k$ по времени коммутации t_k . Значения Z , взятые из [2,6,7], в основном измерены на поздней стадии пробоя и представляют собой оценку снизу [2].

Из таблицы следует, что для одинакового материала катода скорость ионов при ВП в 2-3 раза выше, чем в ВД. Этому повышению всегда сопутствует рост кратности ионизации. Из рис. 2 видно, что зависимость скорости от массы и заряда качественно соответствует соотношению (2), причем параметр $\eta \approx I/a \approx 3 \cdot 10^3$ А/см оказывается по порядку величины одинаковым для ВП и ВД. Поэтому более высокая скорость ионов $V \propto Z^{7/10}$ при ВП обусловлена главным образом усилением кулоновского увлечения ионов электронами из-за роста Z . Подставляя η в (1), имеем $T_* = T_1 Z^{2/5}$, где $T_1 \approx 3$ эВ. Тогда для интервала $Z = 1 - 6$ получаем $T_* \approx 3 - 6$ эВ, что согласуется с измерениями электронной температуры для ВП и ВД [1,3].

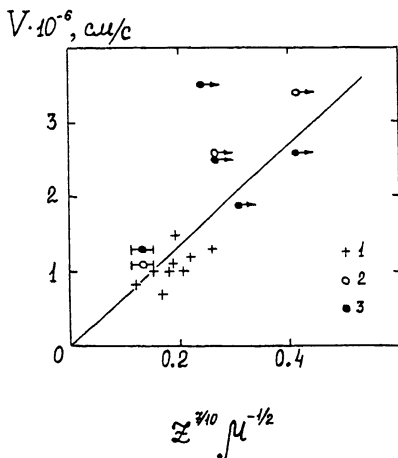


Рис. 2. Зависимость скорости ионов от массы и заряда:

1 — вакуумная дуга; 2 и 3 — вакуумный пробой (определение скорости по свечению и по времени коммутации тока).

4. Таким образом, нагрев и ускорение плазмы при протекании тока через КС в случае ВД и при ВП подчиняются одним и тем же закономерностям. Оценка по уравнению Саха показывает, что более высоким значениям Z , наблюдаемым при ВП, должна соответствовать электронная концентрация, примерно на порядок более низкая, чем в ВД. Сила тока в области критической точки $I \approx eN_e V_e a^2$, где $V_e \approx \gamma V/3$, $\gamma \approx 10$ [3]. Отсюда видно, что при $Ia \approx \text{const}$ $N_e \propto 1/a$, т.е. при ВП размер катодного микропятна (эмиссионного центра [1]), должен быть на порядок больше, чем для ВД. Такое различие в размерах катодных пятен может быть следствием различных условий их образования.

Проведенные исследования показали, что катодная плазменная струя, возникающая при различных типах электрического разряда в вакууме (импульсный и статический пробой вакуумного промежутка, вакуумная искра и дуга), является однотипным квазистационарным образованием, если характерное время изменения тока $\Delta t > \tau \approx 1 - 3$ нс. Можно предположить, что по мере перехода от начальной стадии пробоя вакуумного промежутка к стационарному дуговому разряду происходит дробление катодных плазменных струй. При этом основание КС и ток через нее уменьшается, что ведет к повышению электронной концентрации и наблюдаемому уменьшению заряда и скорости ионов.

Автор благодарен В.Л. Паперному за полезные обсуждения настоящей работы. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (93-02-17417).

Список литературы

- [1] *Месяц Г.А., Проскуровский Д.И.* Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984. 256 с.
- [2] *Galvin J.E., Brown I.G., MacGill R.A.* // *Rev. Sci. Instrum.* 1990. V. 61. N 1. P. 583-585.
- [3] *Кринберг И.А., Луковникова М.П., Паперный В.Л.* // *ЖЭТФ.* 1990. Т. 97. В. 3. С. 806-820.
- [4] *Афанасьев В.П., Дюжев Г.А., Школьник С.М.* // *ЖТФ.* 1993. Т. 63. В. 3. С. 34-50.
- [5] *Kutzner J., Miller H.C.* // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1992. V. 25. N 4. P. 686-693.
- [6] *Бережецкая Н.К., Копьев В.А. и др.* // *ЖТФ.* 1991. Т. 61. В. 2. С. 179-184.
- [7] *Tsuruta K., Suzuki K., Kunitsu K.* // *J. Vac. Soc. Jap.* 1992. V. 35. N 3. P. 309-312.

Иркутский государственный
университет

Поступило в Редакцию
18 мая 1994 г.