

## ВЗРЫВНАЯ ЭМИССИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОСТРИЙ

Г.А.Месян, Д.И.Проскуровский

Металлические острия широко используются как источники импульсных электронных токов  $10^3 \div 10^5$  а. Обычно принимается, что эмиссия электронов с острий при таких токах носит чисто автоэмиссионный характер. Нашими исследованиями показано, что появлению больших электронных токов предшествует электрический взрыв кончика острия и образование плазмы в результате резистивного нагрева автоэмиссионным током. Впервые это было показано на примере взрыва микроострий на поверхности плоского катода в вакууме [1]. Образующиеся при этом плазменные сгустки были названы катодными факелами (КФ). Если электрическое поле у вершины вольфрамового острия  $E > 1,2 \cdot 10^8$  в/см, то задержка взрыва острия  $t_3 < 10^{-9}$  сек [2]. В результате взрывов и искровых разрядов на вершине острия образуются микровыступы, поле на которых усиливается примерно на порядок, и  $t_3 < 10^{-9}$  сек при поле у вершины  $\sim 10^7$  в/см. В случае массивного катода поле на микроостриях усиливается в сотни раз [3], поэтому  $t_3 \approx 10^{-9}$  сек при макрополе порядка  $10^6$  в/см [1].

Исследовались явления, происходящие при электрическом взрыве острия, расположенного в вакууме на расстоянии  $d = 0,05 \div 1,0$  см от плоского анода. В экспериментах применялись генераторы прямоугольных импульсов напряжения с амплитудой  $U_0 = 10 \div 500$  кВ, длительностью фронта  $\sim 1$  нсек и внутренним сопротивлением  $60 \div 150$  ом. Длительность импульса составляла  $5 \div 50$  нсек и всегда была меньше времени до начала испарения на аноде [4]. Ток электронов достигал нескольких килоампер.

Определялись продольная и поперечная скорости движения границы эмиссии электронов из КФ. Для острий из W, Mo, Cu обе скорости  $v \approx 2 \cdot 10^6$  см/сек, что указывает на сферичность расширения КФ. Это же следует из снимков свечения КФ (рис. 1), полученных, как и ранее [1], с помощью электронно-оптической аппаратуры. В течение времени  $\sim 10^{-7}$  сек скорость  $v$  остается постоянной и слабо зависит от приложенного напряжения.

Изучалось поступление металла с молибденового острия в КФ путем фотографирования его в электронном или оптическом микроскопах до и после воздействия на промежуток короткими импульсами. С ростом числа импульсов  $N$  радиус вершины  $r$  увеличивается за счет уноса с нее металла (рис. 2). При  $r \geq 10 \text{ мкм}$  количество уносимого за один импульс металла становится практически постоянным и слабо зависящим от угла конуса острия, причем в диапазоне  $U_0 = 10 \div 50 \text{ кВ}$  и токов  $20 - 100 \text{ а}$  скорость поступления металла в КФ составляет  $(2 + 3) \cdot 10^{-3} \text{ г/сек}$ . В этих же условиях установлено, что эмиссия электронов с острия в КФ происходит с площадки  $\sim 10^{-6} \text{ см}^2$  и средняя плотность тока  $\bar{j} = (1 + 5) \cdot 10^7 \text{ а/см}^2$ . Средняя концентрация частиц в плазме за время от 5 до 20 нсек падает с  $\bar{n} = 10^{17} \text{ см}^{-3}$  до  $\bar{n} = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

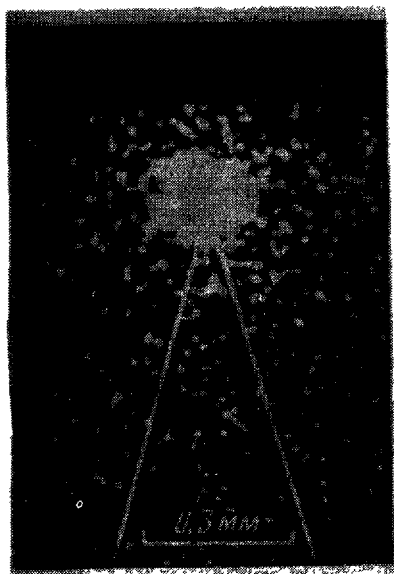


Рис. 1. Снимок КФ, полученный через 2 нсек после прихода фронта импульса; длительность экспозиции 3 нсек,  $U_0 = 35 \text{ кВ}$ ,  $d = 2 \text{ мм}$

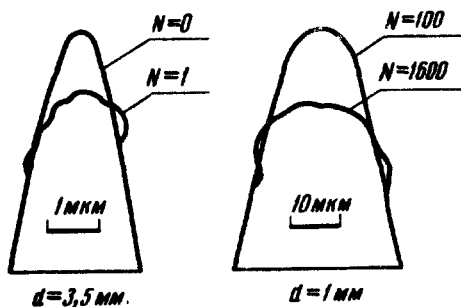


Рис. 2. Профили вершины острия после воздействия  $N$  импульсов амплитудой  $U_0 = 30 \text{ кВ}$  и длительностью 10 нсек

Согласно измерениям, за время импульса через промежуток переносится электронов на 1 - 3 порядка больше, чем имеется частиц в КФ. Можно предположить, что выход электронов из катода в плазму обусловлен автоэмиссией под действием поля, возникающего на границе плазмы за счет разделения за-

рядов при их тепловом движении:

$$E = \frac{kT_e}{e\ell_D} = 1,25 \cdot 10^{-5} \sqrt{nT_e}, \quad (1)$$

где  $T_e$  — температура электронов, град K;  $\ell_D$  — дебаевский радиус экранирования;  $n$  — концентрация частиц,  $\text{см}^{-3}$ . При  $\bar{j} = (1 + 5) \cdot 10^7 \text{ а/см}^2$  электрическое поле у катода по уравнению автоэлектронной эмиссии для молибдена должно быть  $(6 - 6,8) \cdot 10^7 \text{ в/см}$ . Температура электронов в плазме кФ  $T_e \approx 5 \cdot 10^4 \text{ }^\circ\text{K}$  [4]. При этом из формулы (1) концентрация плазмы непосредственно у катода должна быть порядка  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ .

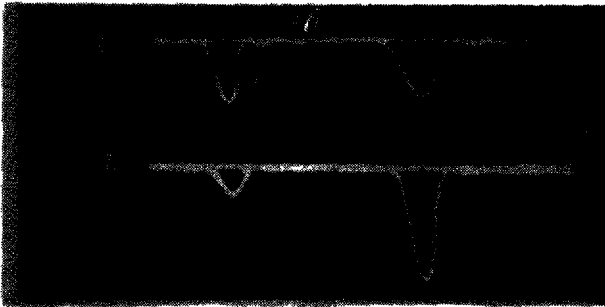
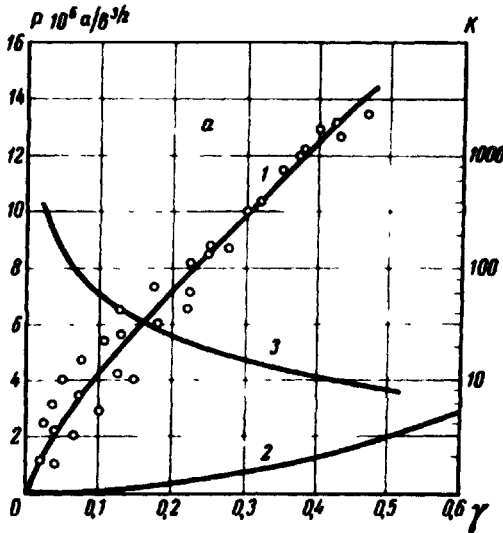


Рис. 3, а. Зависимость  $P(\gamma)$ , полученная в следующих экспериментальных условиях  $d = 0,1 \text{ см}, U_0 = 20 \text{ кВ}; d = 0,2 \text{ см}, U_0 = 160 \text{ кВ}; d = 0,4 \text{ см}, U_0 = 80 \text{ кВ}; d = 0,6 \text{ см}, U_0 = 160 \text{ кВ}; d = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 \text{ см}, U_0 = 240 \text{ и } 300 \text{ кВ}$

Если полощадь эмиссии электронов из кФ приблизительно представить в виде  $\pi v^2 t^2$ , а расстояние между фронтом плазмы и анодом в виде  $d - vt$ , то с учетом ограничения пространственным зарядом ток

$$i(t) = 2,33 \cdot 10^{-6} U^{3/2}(t) \pi \gamma^2 k(\gamma), \quad (2)$$

где  $U(t)$  — напряжение на промежутке,  $k$  — поправка, учитывающая действие поля в случае ограниченной эмиссионной поверхности [5] и зависящая от  $\gamma = vt/(d - vt)$ . Из (2) следует, что перванс электронного потока  $P = i/U^{3/2}$  должен однозначно определяться величиной  $\gamma$ . Результаты экспериментального исследования перванса приведены на рис. 3, а (кривая 1) в предположении

$v = 2 \cdot 10^6$  см/сек. Здесь же представлена кривая  $F(y)$ , рассчитанная для  $k = 1$  (кривая 2). Нетрудно видеть, что применение закона "трех вторых", не учитывая ограничения эмиссионной поверхности, дает заниженные на 1-2 порядка значения электронного тока ( $k(y)$  — кривая 3).

Из рис. 3, а следует, что значительного увеличения первичного электронного потока можно добиться путем предварительного частичного заполнения плазмой кФ промежутка. Этого удается достигнуть подачей двух импульсов напряжения с некоторой паузой между ними. При подаче первого короткого импульса возникает кФ, а второй импульс является рабочим. Результат одного из экспериментов с двумя импульсами длительностью 5 нсек представлен на рис. 3, б. Хотя амплитуды обоих импульсов напряжения почти одинаковы ( $U_0 = 30$  кВ), амплитуда тока электронов при втором импульсе в 4 раза больше ( $\sim 85$  а). Максимально достигаемое отношение токов составляло 8.

Благодарим Г.П.Баженова, Б.П.Ротштейна, С.П.Бавилова и Р.Б.Факшт за помощь в проведении экспериментов.

Институт оптики атмосферы  
Академии наук СССР  
Сибирское отделение

Поступила в редакцию  
29 октября 1970 г.

#### Литература

- [1] Г.А.Месяц. Докторская диссертация. Томск, 1966; С.П.Бугаев, Г.А.Месяц, Д.И.Проскуровский. ДАН СССР, 186, 1067, 1969.
- [2] Г.К.Карчев, Г.А.Месяц, Д.И.Проскуровский, Б.П.Ротштейн, Г.Н.Фурсей. ДАН СССР, 192, 309; 1970.
- [3] D. Alpert, D.A. Lee, E.M. Lyman, H.E. Tomaschke. J. Vacuum, Sci. and Technol., 1, 35, 1964.
- [4] G.A. Mesyats, E.A. Litvinov, D.I. Proskurovsky. Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Proc. of the IV-th Intern. Symp., p. 82, Waterloo, Canada, 1970.
- [5] И.И.Левинтов. ДАН СССР, 85, 1247, 1962.