

УДК 537.525

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Г. А. МЕСЯЦ, Д. И. ПРОСКУРОВСКИЙ, Е. Б. ЯНКЕЛЕВИЧ,
В. Ф. ТРЕГУБОВ

НАБЛЮДЕНИЕ РЕГЕНЕРАЦИИ МИКРООСТРИЙ И ПОЛИРОВКИ КАТОДА ПРИ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСАХ ТОКА ВЗРЫВНОЙ ЭМИССИИ

(Представлено академиком А. М. Прохоровым 18 XII 1975)

Стабильность работы катодов в режиме взрывной эмиссии (в.э.) целиком определяется регенерацией эмиссионных центров при последовательных включениях тока (¹⁻⁴). В связи с этим важное значение имеет изучение микрорельефа поверхности эмиттеров в процессе их эксплуатации. Существенные результаты по исследованию микрорельефа получены с использованием автоэмиссионной (⁵), автоионной (⁶) и теневой электронной микроскопии (^{1, 2, 4, 5}). Качественно новые сведения о микрорельефе катодов и о процессе регенерации микроострий получены нами при совместном использовании высоковольтных наносекундных импульсов и растрового электронного микроскопа (РЭМ).

В экспериментах использовали острийные катоды из Си, полученные электрохимическим способом. Начальный радиус острий составлял ~ 1 мкм, угол конуса $5-7^\circ$. Использовали импульсы напряжения амплитудой 30 кВ, длительностью $t_n = 1,5-100$ нсек. Амплитуда импульсов тока в.э. регулировалась в пределах $1,5-250$ а изменением t_n и вакуумного промежутка d ($d=3-18$ мм). Катоды эксплуатировались до тех пор, пока время запаздывания взрыва микроострий t_a не возрастало до $1-3$ нсек. ($N_{кр} = (1-5) \cdot 10^5$ включений тока). За такое число включений $N_{кр}$ радиус острия возрастал до ~ 5 мкм при $t_n = 1,5$ нсек. и до ~ 50 мкм при $t_n = 100$ нсек. ($d=3$ мм). Поверхность эродированной вершины острия рассматривалась в РЭМ с разрешением $\sim 0,1$ мкм. Для наблюдения в РЭМ микрократеров после одного включения тока использовали острия с начальным радиусом вершины $10-30$ мкм.

На снимках, полученных после одного включения тока (рис. 1а), видно, что жидкий металл из кратеров вытесняется неравномерно. Слои, прилегающие к холодной поверхности катода, быстро остывают, образуя нагроможденные один на другой наплывы. Более горячие слои вытягиваются в виде микростолбиков и застывают в процессе удлинения. При отрыве части материала от микростолбиков образуются микроострия. По-видимому, при отрыве микрокапелек в процессе застывания могут образоваться и субмикроострия, описанные в (⁶).

На рис. 1б, в представлены снимки поверхности вершин острий после 10^5 включений тока. Хорошо видно, что уменьшение t_n ведет к сокращению размеров микрократеров и к сглаживанию поверхности. При $t_n = 1,5$ нсек, размеры кратеров оказываются сравнимыми с разрешением РЭМ, поверхность катода выглядит практически полированной.

В экспериментах определялся эффективный коэффициент усиления электрического поля на микроостриях β . Для этого использовался следующий метод. Известно (⁷), что при временах $t_a \simeq 1$ нсек. локальная напряженность электрического поля на кончиках микроострий должна быть $\sim 1 \cdot 10^8$ В/см. Тогда $\beta = 10^{-8} E^{-1}$, где E — макронапряженность электриче-

ского поля на вершине острия, определенная из его профиля при $N=N_{кр}$. На рис. 2 приведены зависимости $\beta(t_n)$ для двух промежутков. Эти зависимости описываются эмпирическим соотношением

$$\beta = K t_n^{1/2}, \quad (1)$$

где $K = (1,1-1,4) \cdot 10^5 \text{ сек}^{-1/2}$.

Слабая зависимость коэффициента β от промежутка d указывает на малое влияние амплитуды тока в.э. на геометрию микроострий. В то же время $\beta \propto t_n^{1/2}$, что может указывать на тепловую природу процессов, определяющих геометрические параметры регенерируемых микроострий.

Массу одиночного микроострия можно оценить из выражения

$$m \approx \pi r^2 h \rho \approx \pi r^3 \rho K t_n^{1/2}, \quad (2)$$

поскольку $\beta \approx h/r$ (здесь h — высота, r — радиус вершины, ρ — плотность материала микроострия).

На рис. 2 представлены зависимости $m(t_n)$ из (2) при $r=10^{-5} \text{ см}$ (⁴), а также найденные из экспериментов значения массы металла m_1 , уносимой в среднем за один импульс тока в области $N=N_{кр}$ (методика определения m_1 описана в (⁴)). Видно, что при $t_n = 1,5 \text{ нсек.}$, масса металла, удаленная за один импульс, сравнима с массой одиночного микроострия, что и доказывает наличие эффекта «полировки» при таких коротких импульсах тока. С увеличением t_n отношение m_1/m растет. Это объясняется увеличением числа одновременно функционирующих центров в.э., а также удалением с катода материала под микроостриями.

Полученные результаты позволяют представить в общих чертах процесс регенерации микроострий на катоде. При наложении достаточно сильного электрического поля происходит взрыв имеющихся на катоде микроострий и образование центров в.э., плотность тока в которых составляет 10^8-10^9 а/см^2 (⁴). В процессе токоотбора за счет джоулева выделения тепла осуществляется испарение металла из центров в.э. Вследствие теплопроводности часть тепла отводится из центров в.э. и за время импульса тепловая волна распространится на характерное расстояние $\sqrt{a t_n}$ (a — коэффициент температуропроводности). Того же порядка будет и расстояние, на котором успеет расплавиться металл. Принимая для концентрации и температуры плазмы в области центров в.э. значения $n=10^{20} \text{ см}^{-3}$ и $kT_e=5 \text{ эв}$ (⁸) соответственно, получим, что давление плазмы на центральную часть расплава будет $P \sim 10^9 \text{ дин/см}^2$. При этом скорость перемещения жидкого металла из центра эмиссии $v \approx (2P/\rho)^{1/2}$ (⁹) может превышать 10^4 см/сек. , а время перемещения на периферию кратера составит $10^{-9}-10^{-8} \text{ сек.}$ С уменьшением длительности импульсов тока уменьшается объем расплавленного металла, сокращается время его вытеснения из кратера и время остывания. Соответственно уменьшается и высота образующихся микроострий (^{9, 10}). Поэтому при использовании импульсов длительностью $\sim 10^{-9} \text{ сек.}$ можно получить довольно гладкую поверхность катода без случайных микровыступов с большим значением коэффициента β .

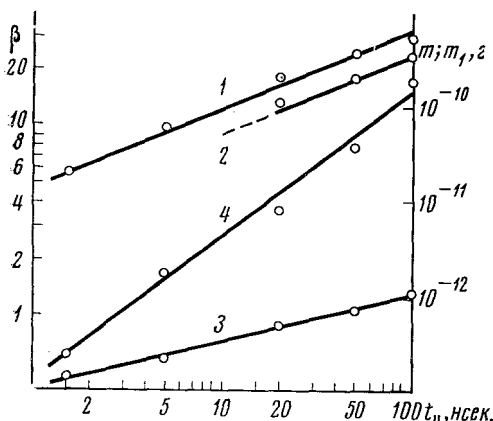


Рис. 2. 1, 2 — $\beta(t_n)$: 1 — $d=3 \text{ мм}$, 2 — $d=12 \text{ мм}$; 3 — $m(t_n)$; 4 — $m_1(t_n)$

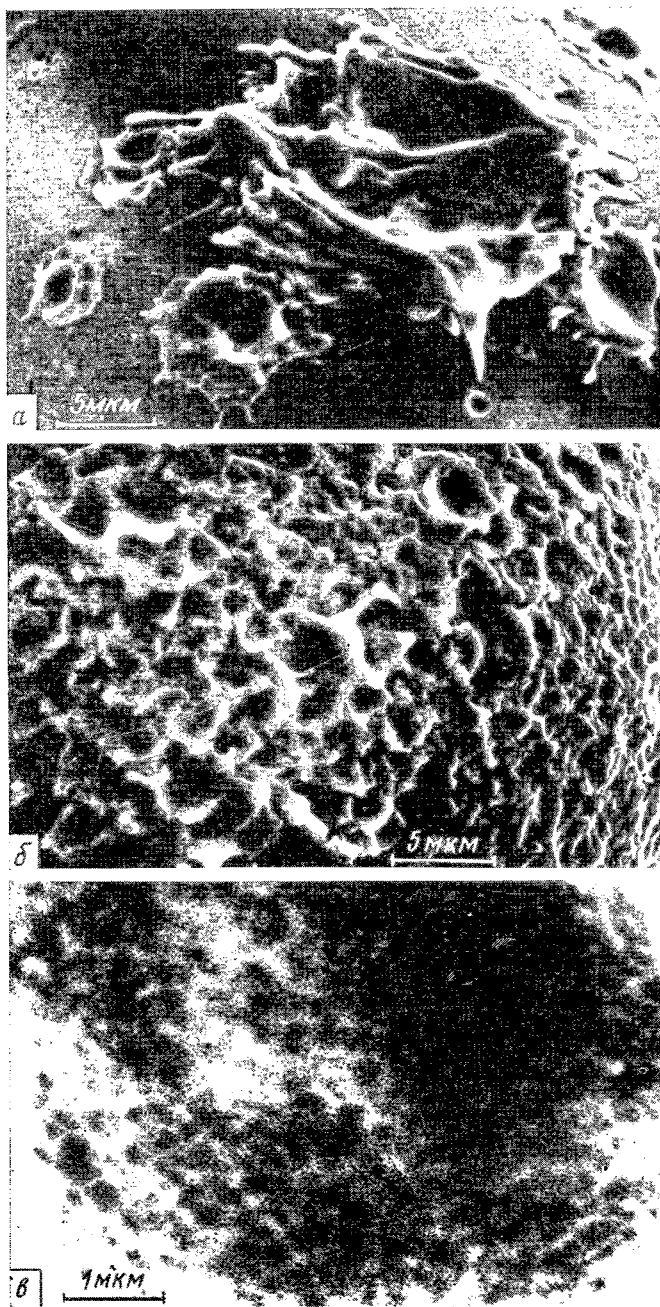


Рис. 1. $d=6$ мм; $t_{\text{н}}$, нсек.: а — 100, б — 20, в — 1,5

В заключение отметим, что полученные результаты имеют прямое отношение к исследованиям вакуумного пробоя с катодных процессов вакуумной дуги.

Благодарим Е. А. Литвинова за обсуждение результатов работы.

Институт оптики атмосферы
Сибирского отделения Академии наук СССР
Томск

Поступило
27 XI 1975

ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Г. А. Месяц, Г. П. Баженов и др., Изв. высш. учебн. завед., Физика, № 5, 153 (1969). ² Г. Н. Фурсей, А. А. Антонов, В. М. Жуков, Вестн. ЛГУ, № 10, 75 (1971).
³ Н. Г. Павловская, Т. В. Кудрявцева, Приборы и техн. эксп., № 2, 198 (1972).
⁴ Г. П. Баженов, Е. А. Литвинов и др., ЖТФ, т. 43, 6, 1255, 1262 (1973). ⁵ А. П. Комар, Н. Н. Сюткин, ДАН, т. 158, № 4, 821 (1964). ⁶ Н. Н. Сюткин, Н. Н. Вяткин, ЖТФ, т. 41, 9, 1979 (1974). ⁷ Г. К. Карцев, Г. А. Месяц и др., ДАН, т. 192, № 2, 309 (1970). ⁸ Г. А. Месяц, Д. И. Проскуровский, Письма ЖЭТФ, т. 13, 1, 7 (1971).
⁹ G. W. McClure, J. Appl. Phys., v. 45, 5, 2078 (1974). ¹⁰ B. Jüttner, V. F. Puchkarov, W. Rohrbeck, Zentralinstitut für Elektronenphysik. Preprint 75-3, Berlin, 1975.