

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Е. А. Литвинов, Г. А. Месяц, А. Г. Парфенов, Об особенностях перехода металл-плазма в начальной стадии взрывоэмиссионного цикла на катоде, *Докл. АН СССР*, 1991, том 320, номер 2, 319–321

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.172

17 января 2025 г., 20:29:31



© Е.А. ЛИТВИНОВ, академик Г.А. МЕСЯЦ,
А.Г. ПАРФЕНОВ

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ПЕРЕХОДА МЕТАЛЛ–ПЛАЗМА В НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ВЗРЫВОЭМИССИОННОГО ЦИКЛА НА КАТОДЕ

Ранее установлено, что процесс взрывной эмиссии на катоде носит циклический характер [1, 2]. Эмиссионный центр (ЭЦ) возникает на катоде, функционирует, погасает, далее возникает новый ЭЦ и т.д. Время цикла зависит от тока и материала катода и составляет $\sim 10^{-9} - 10^{-8}$ с [1]. Микроратеры микронных размеров, наблюдаемые на катоде после вакуумного разряда, являются следами функционирования отдельных ЭЦ. В результате высокой концентрации энергии в микрообъеме катода, обусловленной джоулевым энерговыделением при прохождении через поверхность катода большой плотности тока ($\sim 10^8 - 10^9$ А/см²), происходит взрывообразное испарение металла и выброс по направлению к аноду плазменной струи, служащей токопроводящей средой.

Вопрос о механизме токопереноса в области перехода металл–плазма остается дискуссионным. Обычно предполагают наличие эмиссионной границы и слоя положительного объемного заряда между катодом и плазмой, а механизм эмиссии — термоавтоэлектронным [3]. В [4] показано, что слой положительного объемного заряда у катода отсутствует, а вычисленная температура металла с избытком обеспечивает необходимый уровень термоэмиссии [1, 5]. В [6] высказано предположение о том, что в начальной фазе взрывоэмиссионного цикла может иметь место непрерывный (без эмиссионной границы) переход металл–плазма.

В настоящей работе с помощью численного моделирования рассмотрен вопрос электрического взрыва на поверхности катода и формирования плазменной струи. Геометрия ЭЦ со стороны катода и в области истечения плазмы предполагалась сферически-симметричной (рис. 1, природа замкнутых линий тока объяснена в [4]). Процессы разогрева металла и разлета продуктов эрозии описывались нестационарными уравнениями двужидкостной двухтемпературной гидродинамики на основе 8-моментного приближения [7]. Для описания вещества в переходной об-

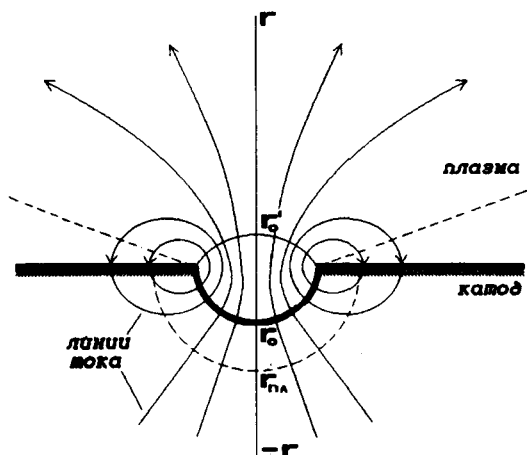


Рис. 1. Геометрия эмиссионного центра. $r_{пл}$ — радиус границы раздела жидкой и твердой фаз

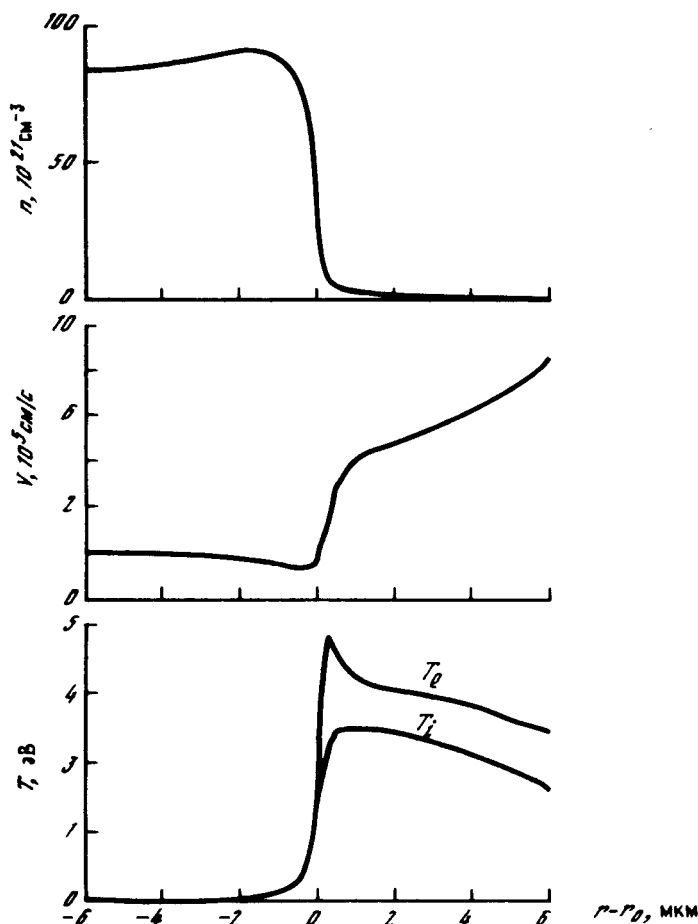


Рис. 2. Распределение концентрации вещества n , электронной температуры T_e , температуры тяжелой компоненты T_i , скорости тяжелых частиц V в катодной и прикатодной области через 1 нс после начала функционирования ЭЦ. Cu, 50 А, $r_0 \approx 1,5 \cdot 10^{-4}$ см

ласти между металлом и идеальной плазмой использовали полуэмпирические уравнения состояния [8], проводимость и теплопроводность в этой области рассчитывали с использованием методики [9], уточненной нами с целью обеспечить лучшую сходимость к известным значениям в области металла и идеальной плазмы. Степень ионизации среды вычисляли по [8]. Из уравнения движения для электронов, учитывая квазинейтральность, вычисляли электрическое поле и распределение потенциала по оси r . Расчет проводился непрерывным образом от катода до переднего фронта плазменной струи.

В момент времени $t = 0$ через сферическую поверхность на катоде с начальным радиусом $r_0 \approx 0,5$ мкм начинает протекать заданный ток (10 – 50 А). Вследствие интенсивного джоулева тепловыделения металл разогревается, давление в области стягивания тока достигает величины >100 кБар, в катод начинает распространяться со скоростью, близкой к скорости звука, волна сжатия, в противоположную сторону происходит расширение продуктов эрозии. Точка, в которой гидродинамическая скорость равна нулю, принималась нами за точку изменения геометрии (рис. 1), т.е. радиус r_0 постоянно находился в волне разряжения, идущей вслед за

волной сжатия. С увеличением радиуса r_0 падает плотность тока на поверхности катода, уменьшается энерговыделение и процесс эрозии постепенно замедляется.

На рис. 2 представлено распределение концентрации вещества, электронной температуры и температуры и скорости тяжелой компоненты в переходном слое металл–плазма к моменту времени 1 нс. Несмотря на довольно крутой профиль концентрации вещества, на длине волны электрона ($\sim 10^{-7}$ см) изменение плотности, температуры, а с ними и уровня Ферми мало, поэтому проводимость среды при переходе из катода в плазму не терпит разрыва. Падение напряжения во всей области катод–плазменная струя не превышает 30 В (большая часть напряжения падает на участке, показанном на рис. 2).

В реальной ситуации диссипация волны сжатия происходит значительно быстрее, чем в расчете, — за счет выдавливания жидкого металла из кратера, что в одномерном расчете не учитывается. Поэтому результаты моделирования можно с достаточной степенью точности применить лишь к начальной фазе функционирования ЭЦ, когда жидкий металл не успеет существенно деформироваться (максимальная скорость разлета жидких капель из кратера $\sim (1 - 5) \cdot 10^4$ см/с [10, 11], тогда как $\partial r_0 / \partial t$ вначале достигает $(1 - 2) \cdot 10^5$ см/с).

Таким образом, по крайней мере в начале взрывоэмиссионного цикла на катоде отсутствует эмиссионная граница между металлом и плазмой. В нашем расчете, не учитывающем деформацию жидкого металла в направлении, перпендикулярном r , такая граница не появляется вообще за время, равное времени взрывоэмиссионного цикла. Однако вытеснение жидкого металла из кратера должно существенно повлиять на эрозионный процесс и может привести как к гидродинамическому разрыву, так и к появлению эмиссионной границы на поверхности катода. Об этом косвенно свидетельствует сравнение удельной эрозии (количество унесенной массы с катода на единицу прошедшего заряда). В расчете итоговая удельная эрозия оказывается заметно выше, чем в эксперименте. Оценим время появления гидродинамического разрыва (а с ним и эмиссионной границы), полагая, что он появляется, когда жидкий металл сместится перпендикулярно оси r на расстояние $\sim r_0$. Взяв скорость смещения жидкости $(1 - 5) \cdot 10^4$ см/с, $r_0 \approx 10^{-4}$ см, получим время $\sim 2 \cdot 10^{-9} - 10^{-8}$ с. Сравним его с экспериментально измеренным временем жизни ЭЦ. В [12] для меди при токе 50 А получено 4 нс, в [13] для вольфрама при токе 2 - 50 А время жизни ЭЦ составило 25 - 50 нс. Полагая, что процесс токоперевода в области металл–плазма за время функционирования единичного ЭЦ состоит из двух качественно различных стадий — с наличием непрерывной проводящей среды и эмиссионной, можно предположить, что на легкоплавких металлах эти стадии сравнимы по времени, а на тугоплавких металлах, на которых время жизни ЭЦ относительно велико, большую часть времени ЭЦ функционирует в эмиссионном режиме.

Институт электрофизики
Академии наук СССР
Свердловск

Поступило
9 VII 1991

ЛИТЕРАТУРА

1. Литвинов Е.А., Месяц Г.А., Парфенов А.Г. — ДАН, 1984, т. 279, № 6, с. 864–866.
2. Mesyats G.A. — IEEE Trans. Plasma Sci., 1987, vol. 15, № 5, p. 488–500.
3. Вакуумные дуги / Под ред. Дж. Лафферти. М.: Мир, 1982. 432 с.
4. Litvinov E.A., Mesyats G.A., Parfyonov A.G., Volkov N.B. Proc. XIII Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Paris, 1988, p. 158–160.
5. Литвинов Е.А., Месяц Г.А., Парфенов А.Г. — ДАН, 1983, т. 269, № 2, с. 343–345.
6. Парфенов А.Г. Автореф. канд. дис. Томск, 1984. 19 с.
7. Силин В.П. Введение в кинетическую теорию газов. М.: Наука, 1971. 332 с.
8. Колгатин С.Н., Хачатурьянц А.В. — ТВТ, 1982, т. 20, № 3, с. 447–451.
9. Беспалов И.М., Полищук А.Я. — Письма в ЖТФ, 1989, т. 15, № 2, с. 4–8.
10. Utsumi T., English J.H. — J. Appl. Phys., 1975, vol. 46, № 1, p. 126–131.
11. Daalder J.E., Gordence J.C.A.M. Proc. XVI Int. Conf. on Phen. in Ionized Gases. Dusseldorf, 1983, p. 274–275.
12. Jutner B. — J. Phys. D., 1981, vol. 14, № 7, p. 1265–1275.
13. Puchkarev V.F., Murzakaev A.M. — Ibid., 1990, vol. 23, № 1, p. 26–35.