

04; 11

ОСОБЕННОСТИ МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА
В ПАРАХ МАТЕРИАЛА КАТОДА

Е.А. Туренко, О.Б. Яценко

В хорошо известных и широко используемых в настоящее время магнетронных системах распыления [1] генерация вещества происходит за счет распыления материала катода ионами инертных газов. Согласно существующим представлениям, при торможении высокоэнергетического иона в кристаллической решетке твердого тела около 95% его энергии переходит в тепло, вследствие чего приходится интенсивно охлаждать катод. Для материала в твердом состоянии максимально допустимая скорость распыления ограничивается его теплопроводностью, что существенно снижает энергетическую эффективность магнетронных систем распыления. Нами экспериментально исследована новая форма магнетронного разряда, в которой генерация вещества осуществляется при испарении катода и одновременном распылении его собственными ионами, причем катод при этом, как правило, находится в расплавленном состоянии при достаточно высокой (10^3 К и более) средней температуре.

Эта форма магнетронного разряда реализуется на теплоизолированных катодах при условии, что средняя плотность тока на катоде j_K превышает некоторую критическую величину j_K^* , являющуюся функцией теплофизических характеристик материала катода. При $j_K > j_K^*$ на поверхности катода устанавливается средняя рабочая температура, при которой давление насыщенных паров материала катода обеспечивает возможность реализации режима горения магнетронного разряда в парах катода. В таком режиме часть распыленных и испаренных атомов, ионизированных в зоне электронного дрейфа, возвращается в виде ионного пучка на катод, поддерживая процессы самораспыления и j -эмиссии электронов, а остальная их доля поступает в объем системы, составляя эффективный продукт генерации.

В разрядном устройстве (рис. 1) катод из испаряемого материала помещен в теплоизолированный тигель, выполненный из немагнитного тугоплавкого материала. Анод с развитой поверхностью выполнен из графита и является радиационноохлаждаемым. Горение магнетронного разряда в режиме самораспыления наблюдалось на катодах из меди и индия в диапазоне токов 1–5 А. Ниже представлены некоторые характеристики новой формы магнетронного разряда с катодом из меди, помещенный в танталовый тигель диаметром 90 мм.

Запуск устройства производится в аргоне при давлении порядка 0,1 Па. Затем по мере прогрева катода начинается интенсивное расплавление и испарение материала катода, причем при достижении определенного значения упругости пара реализуется процесс саморас-

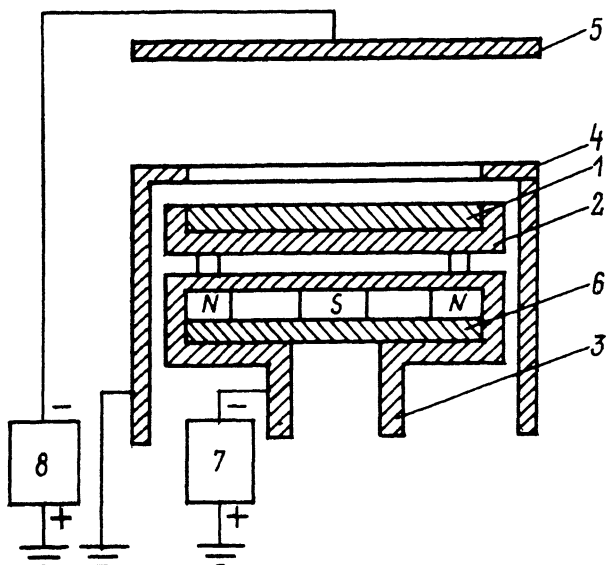


Рис. 1. Схема разрядного устройства: 1 - катод из испаряемого материала, 2 - тигель, 3 - охлаждаемый держатель, 4 - анод, 5 - коллектор, 6 - магнитная система, 7 - источник питания разряда, 8 - источник смещения потенциала коллектора.

пыления. После этого прекращается напуск аргона и осуществляется переход к режиму магнетронного разряда в собственных парах. В процессе этого перехода резко повышается светимость плазменной струи и изменяется ее цвет. Напряжение разряда U_p снижается с 600–700 В до 400–500 В. Средняя плотность тока на катод

$j_k = \frac{I_p}{S_k}$ составляет 0,02–0,11 А/см². Зондовые измерения показали, что температура электронов в плазме составляет $kT_e \sim 4\text{--}5$ эВ, концентрация $n_e \sim 10^{11}$ см⁻³, а анодное падение потенциала близко к нулю.

На рис. 2 представлены некоторые характеристики магнетронного разряда в парах материала катода. Измерения расхода рабочего вещества в катода и ионного тока насыщения, фиксируемого коллектором, позволили оценить значения степени ионизации плазменного потока $\alpha = \frac{j_0 M}{e \dot{m}^*}$ и энергетической цены генерируемой частицы $\beta = \frac{U_p I_p M}{e \dot{m}^*}$ (где j_0 - плотность ионного тока насыщения на коллектор; M - масса атома меди; e - заряд электрона; \dot{m}^* - расход рабочего вещества; \dot{m} - полезный расход рабочего вещества на образование пленки). Степень ионизации увеличивается с ростом разрядного тока, что может быть связано с возрастанием вклада термоэлектронной эмиссии при увеличении температуры катода.

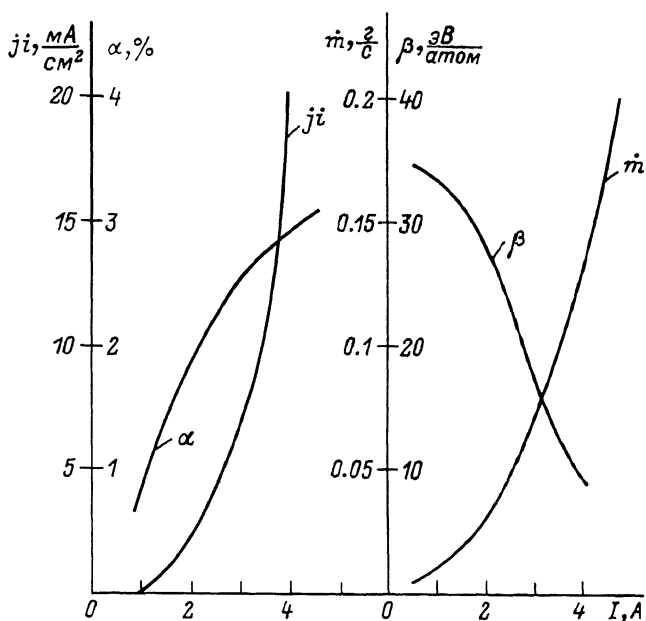


Рис. 2. Зависимость параметров разряда от тока разряда.

Вследствие низких значений плотностей тока и потока мощности процесс испарения катода происходит спокойно, без взрывов и термических напряжений, поэтому в генерируемом плазменном потоке отсутствует микрокапельная фаза.

Новая форма магнетронного разряда по некоторым признакам близка к вакуумной дуге с распределенным разрядом [2]: высокая температура катода, обеспечивающая самогенерацию среды, отсутствие микрокапель в продуктах эрозии, высокая скорость генерации вещества и т.д. Основным отличием от вакуумной дуги с распределенным разрядом является механизм эмиссии электронов (γ - эмиссия), хотя при увеличении тока разряда и температуры катода начинает играть существенную роль термоэмиссия, причем при наличии магнитной ловушки даже незначительного вклада тока термоэмиссии достаточно для повышения эффективности ионизации потока.

Рассмотренная форма магнетронного разряда (ее основные характеристики представлены в таблице в сравнении с соответствующими характеристиками вакуумной дуги с распределенным разрядом) может применяться для генерации плотных ($n_e \geq 10^{11} \text{ см}^{-3}$) потоков плазмы твердых веществ. Такие генераторы имеют ряд преимуществ по сравнению с высоковольтными электронными пушками для испарения в вакууме (простейшее оборудование, возможность фокусировки и управления потоками), а также генераторами

Характеристики магнетронного разряда в парах материала катода и вакуумной дуги с распределенным разрядом

Характеристика устройства	Вакуумная дуга с распределенным разрядом	Магнетронный разряд в парах катода
Напряжение, В	12-14	400-500
Сила тока, А	40-400	1-5
Средняя рабочая температура катода, К	высокая (1900-2200)	высокая (~1500)
Механизм эмиссии	аномальная эмиссия	j^* -эмиссия (с возможным вкладом термоэмиссии)
Плотность тока j_k , А/см ²	5-50	0.02-0.11
Плотность потока мощности в катод, Вт/см ²	50-500	10-50
Наличие микрокапель в продуктах эрозии	микрокапли отсутствуют	микрокапли отсутствуют
Степень ионизации продуктов эрозии, %	10-100	1-3
Энергетическая цена генерируемой частицы, эВ	130-210	10-33

на основе обычной вакуумной дуги [3] (отсутствие микрокапельной фазы, более низкая энергетическая цена генерируемой частицы), уступая последним лишь по величине степени ионизации потока. Рассмотренное устройство может использоваться в процессах ионной обработки и ионного синтеза материалов, при разработке геттерных насосов и электрореактивных двигателей, а также в физических экспериментах по исследованию процессов взаимодействия высокоэнергетических потоков ионов твердых веществ с поверхностями.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Д а н и л и н Б.С., С ы р ч и н В.К. Магнетронные распылительные системы. М.: Радио и связь. 1982. 72 с.
- [2] В а с и н А.И., Д о р о д н о в А.М., П е т р о с о в В.А. // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. № 24. С. 1499-1504.
- [3] Д о р о д н о в А.М., П е т р о с о в В.А. // ЖТФ. 1981. Т. 51. № 3. С. 504-524.

Воронежский государственный университет им. Ленинского комсомола

Поступило в Редакцию
31 марта 1989 г.