

величины тока на время окисления. Необходимо однако иметь в виду, что выход по току реакции окисления не является стопроцентным, т.к. часть общего тока расходуется на побочную реакцию разряда ионов кислорода у поверхности образца, что уменьшает долю ионного тока (необходимого для окисления) в полном токе. Это связано с тем, что соединение $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ обладает достаточно высокой электронной проводимостью. Тем не менее, ионная проводимость по кислороду $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ при $T \approx 380^\circ C$ не является пренебрежимо малой величиной, что и делает возможным процесс анодного окисления этого соединения.

Авторы благодарят С.Л. Шохора за помощь в проведении измерений магнитной восприимчивости.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] B a g l e y B.G. et al. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 51. N 8. P. 622-624.
- [2] M i n o m o S. et al. // Jap. J. Appl. Phys. 1988. V. 27. N 3. P. L411-L413.
- [3] А в е р ь я н о в Е.Е. Справочник по анодированию. М., 1988. 222 с.
- [4] M a r s h P. et al. // Phys. Rev. B. 1988. V. 38. N 1. P. 874-877.
- [5] C a r p o n i J.J. et al. // Europhys. Lett. 1987. V. 3. N 12. P. 1301-1307.

Поступило в Редакцию
10 июля 1989 г.

В окончательной редакции
12 марта 1990г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 10

26 мая 1990 г.

0.4

©1990

О ПРИРОДЕ ДУГОВОГО РАЗРЯДА С РТУТНЫМ
КАТОДОМ В ВАКУУМЕ

И.И. Б е й л и с

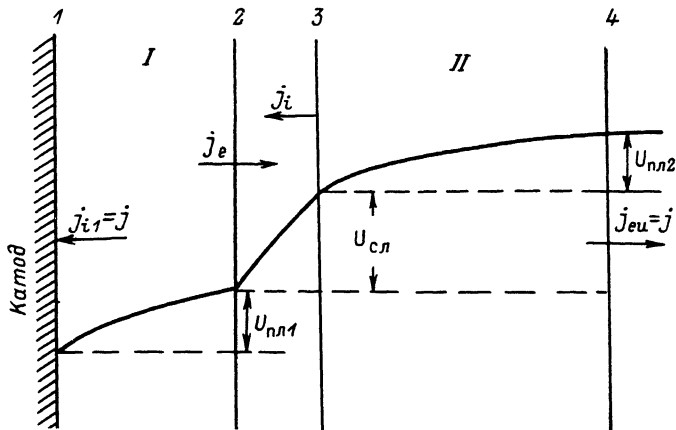
Несмотря на более чем 80-летнюю историю изучения процессов в катодном пятне дуги – области, где происходит рождение заряженных частиц, единая точка зрения относительно механизма его существования для различных металлов отсутствует. Наиболее загадочными считаются явления, возникающие при горении дуги на ртутном катоде.

Согласно экспериментальным данным [1, 2], одиночное пятно на ртути может существовать при токе ~ 0.1 А и времени жизни до 10^{-4} с. При этом регистрируются две формы этого вида разряда — основная, которой соответствует катодное падение потенциала $U_k \sim 9$ В, и переходная с $U_k \sim 18$ В. Если вторая форма по внешним признакам напоминает характер горения дуги на металлах, подобных меди, то основная, для которой величина U_k оказывается ниже потенциала ионизации $U_i \sim 10.34$ В, имеет место лишь на ртутном катоде. Существующие же теоретические модели, основанные на использовании разнообразных механизмов извлечения электронов из металла, не позволяют не только понять различные форм разряда, но и дать количественную информацию той его стадии („высоковольтной“), которая хорошо изучена для дуги с катодами из меди, серебра и т.п. [3].

Трудность описания катодных процессов на ртути традиционными методами состоит в том, что при любой температуре металла в пятне плотность пара существенно превышает плотность электронов эмиссии с катода (высокая летучесть ртутных паров). Математически отмеченный факт проявляется в отсутствии решения системы уравнений [3] из-за нарушения баланса энергии в плазме, образующейся в результате выделения энергии пучка электронов, ускоренного в примыкающей к катоду области резкого изменения потенциала (ленгмюровском слое).

Устранение указанного противоречия, как нам представляется, может быть осуществлено, если предположить, что слой пространственного заряда возникает не на поверхности катода, а в объеме плазмы на некотором удалении от нее. Экспериментальное подтверждение наличия двойных слоев вдали от катода и механизм их образования для высоковольтных разрядов в плазме с низкой концентрацией заряженных частиц n содержится в [4]. Двойной слой возникает, например, при существенной неоднородности частиц или при резком изменении сечения разрядного канала [5].

При принятом предположении прикатодная плазма дуги на ртути делится на две качественно разные области и модель процессов может быть представлена следующим образом (рис. 1). Первая область, непосредственно примыкающая к катоду и заключенная между границами 1 и 2, является эмиттером электронов. Пройдя далее двойной (границы 2 и 3) слой с падением потенциала U_{c2} , эти электроны приносят энергию во вторую внешнюю область плазмы с границами 3 и 4. В свою очередь, внешняя плазма эмиттирует в слой ионы, которые приносят энергию в первую область. Замыкание тока на катоде происходит за счет потока ионов из контактируемой с ним первой плазменной области. Так как в области I нагрев плазмы происходит ионами, то при достаточном числе столкновений условия в ней можно считать однородными и изотермическими. Обозначим температуру частиц в этой области через T_1 . В области II, где происходит релаксация пучка электронов, может иметь место отрыв электронной температуры $T_{e2} > T_{i2}$. Учитывая, что в силу непрерывности плотности токов электронов j_e



Структура характерных слоев и схематичное распределение потенциала в прикатодной плазме ртутной дуги.

и ионов j_i на соответствующих границах связаны соотношениями: $j_{i1} = j_{e4} = j$, $j_{e2} = j_{e3}$, $j_{i2} = j_{i3}$, а также обозначения $j_e + j_i = j$, $s = j_e / j$, получим уравнения балансов энергии в виде:

$$I: u_i + 2T_1 = (1-s)(eu_{сл} + u_i + 2T_{i2}) - 2sT_1 + seU_{пл1}, \quad (1)$$

$$II: s(eu_{сл} + 2T_1) = (1-s)(u_i + 2T_{i2}) + 2Te_2 - eU_{пл2}. \quad (2)$$

Здесь $U_{пл1}$, $U_{пл2}$ - падение потенциала соответственно в областях I и II.

Считая для оценок $T_1 \sim Te_2 \sim 1$ эВ [3], определим параметры $u_{сл}$ и s из соотношений (1) и (2). Расчет показывает, что при изменении величин $U_{пл1}$ и $U_{пл2}$ в широких пределах 0.5–5 В искомые параметры соответствуют интервалам $u_{сл} = 8-13$ В, $s = 0.37-0.45$. Следовательно, катодное падение потенциала, определенное в рассматриваемых условиях как $u_k = u_{сл} + U_{пл1} + U_{пл2}$, оказалось равным 13–18 В и соответствует экспериментальным данным для переходной формы ртутного разряда [1, 2]. Оценки, сделанные на основе соотношений (1) и (2) при более низких значениях $u_k \sim 10$ В, соответствующих основной форме разряда, показывают, что температура частиц в области II существенно снижается. Роль термической ионизации становится пренебрежимо малой и генерация ионов может осуществляться лишь за счет ступенчатых процессов при участии метастабильных атомов ртути [1, 2].

Из анализа экспериментальных данных [1, 2] следует, что переходная форма возникает преимущественно в критических условиях, например, при пороговых токах или в момент погасания дуги. В этом случае из-за резкого изменения тока в цепи растет напряжение

на плазменном промежутке, которое затем несколько снижается. Согласно приведенным выше оценкам, указанный рост напряжения может ограничиваться за счет увеличения проводимости газа во внешней области плазмы вследствие усиления роли термической ионизации атомов. Стабилизирующее действие выделяемой в плазме энергии электрического поля может, таким образом, служить объяснением наблюдаемых в опытах колебаний напряжения при пороговых токах разряда J_p . С увеличением параметра J_p возрастает число пятен, увеличивается фоновая концентрация частиц, затрудняется разлет пара и усиливается вероятность ударной ионизации электронами пучка. В этих условиях напряжение устанавливается на нижнем уровне, соответствующем основной форме горения вакуумной дуги.

Таким образом, в рамках модели двойного слоя для ртутного электрода удастся не только понять экспериментальные результаты по измерению U_k , но и выяснить механизм эмиссии электронов, удовлетворяющий законам сохранения энергии на катоде и в плазме. Факт существования в прикатодном газе электронов с относительно высокой энергией установлен в экспериментах [2] по изучению процессов возбуждения специально вводимого в межэлектродный промежуток ртутной дуги неона. Заметим, что приведенная на рисунке схема электрических слоев в катодной плазме ртутной дуги отражает лишь принципиальную картину явления. В действительности структура этой области оказывается сложнее, вследствие образования дополнительных скачков потенциала, ограничивающих поток электронов на границе 1 и регулирующих движение заряженных частиц вблизи границы 2. Кроме того, важным является вопрос об устойчивости двойного слоя в рассматриваемых условиях, время существования которого у поверхности катода может определять время жизни пятна и устойчивость ртутной дуги в целом. Детальный анализ указанных особенностей, необходимый для выяснения условий обеспечения непрерывности тока, является существенным при построении более полной системы уравнений и выходит за рамки настоящего сообщения, посвященного обсуждению механизма выделения энергии у электрода и процессов ионизации металлических паров.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] К е с а е в И.Г. Катодные процессы ртутной дуги и вопросы ее устойчивости. М.Л.: Госэнергоиздат, 1961. 320 с.
- [2] К е с а е в И.Г. Катодные процессы электрической дуги. М.: Наука, 1968. 244 с.
- [3] Б е й л и с И.И. // ЖТФ. 1974. Т. 44. № 2. С. 400-411.
- [4] Л у ц е н к о Е.И., С е р е д а Н.Д., К о н ц е в о й Л.М. // Физика плазмы. 1976. Т. 2. В. 1. С. 72-81.