

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ
ПЛАЗМА

УДК 533.9

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИВЯЗКИ АРГОНОВОЙ ДУГИ К КАТОДУ
ПЛАЗМОТРОНА ПОСТОЯННОГО ТОКА© 2023 г. М. Х. Гаджиев^а, М. А. Саргсян^{а,*}, А. С. Тюфтяев^а,
З. Г. Карчугаева^а, Д. В. Терешонок^а^а Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

*e-mail: m.sargsyan86@mail.ru

Поступила в редакцию 08.10.2022 г.

После доработки 11.12.2022 г.

Принята к публикации 26.12.2022 г.

Проведены эксперименты по исследованию стационарной привязки аргоновой дуги атмосферного давления к поверхности чистого, торированного и лантанированного вольфрама. Спектральными методами получены температуры и концентрации электронов в плазме положительного столба вблизи катода при токе дуги 200 А и расходе плазмообразующего газа 1.5 г/с, средние значения которых $T_e \sim 2.6$ эВ для чистого вольфрама, $T_e \sim 2$ эВ для торированного и лантанированного с $n_e \sim 10^{17}$ см⁻³. При этом наименьшей температурой рабочей поверхности обладает катод со вставкой из лантанированного вольфрама (3100 К) из-за меньшей эффективной работы выхода, когда как для торированного и чистого вольфрама 3300 К и 3800 К соответственно. При этом установлено, что при токе 200 А вершина поверхности чистого вольфрама находится в жидкой фазе в отличие от торированного и лантанированного вольфрама.

Ключевые слова: атмосферное давление, низкотемпературная плазма

DOI: 10.31857/S0367292123700233, EDN: VFYGOK

Низкотемпературная плазма, создаваемая дугами разрядами, находит широкое применение в науке и технике. Наиболее распространенными приборами являются генераторы низкотемпературной плазмы (ГНП) с независимой (струйные) и зависимой (прямого действия) дугой [1, 2]. Несмотря на большое разнообразие разработанного плазменного оборудования, актуальной задачей по-прежнему остается повышение высокоэффективности электродуговых плазматронов для оптимизации плазменных технологий. При этом для минимизации эрозии электродов и повышения ресурса оборудования промышленных установок необходимо понимание приэлектродных процессов.

На основании большого количества экспериментальных данных, полученных за последнее десятилетие, достигнут значительный прогресс по моделированию плазмохимических процессов с учетом относительно больших тепловых потоков, а также дуговых разрядов при высоких давлениях, что позволило понять основные механизмы привязки дуги к катоду, которая осуществляется в основном двумя режимами — диффузионным режимом и режимом катодных пятен [3–9]. Для диффузионного режима характерно относительно равномерное распределение температуры и

плотности тока по поверхности электрода — термокатода [10]. Режима катодных пятен характеризуется большими плотностями тока, протекающего через малую или несколько малых областей общей поверхности электрода — холодного катода [10].

Часто необходимо проводить воздействие низкотемпературной плазмы в химически неактивной среде инертных газов. С экономической точки в промышленности такой средой является аргон, где для изготовления катодов широко применяется лантанированный (W-2% La₂O₃) или торированный (W-2% ThO₂) вольфрам [11–13]. В этом случае уменьшается работа выхода по сравнению с чистым вольфрамом, что дает возможность получить необходимый ток термоэмиссии при более низкой температуре поверхности. Очевидно, что в этом случае для диффузионной привязки уменьшаются термонапряжения, что способствует более длительному использованию катода в установках и увеличению ресурса плазматрона. Поэтому целью работы было определение параметров плазмы и рабочей температуры поверхности катода в диффузионном режиме со вставкой из чистого, торированного (W-2% ThO₂) и лантанированного (W-2% La₂O₃) вольфрама.

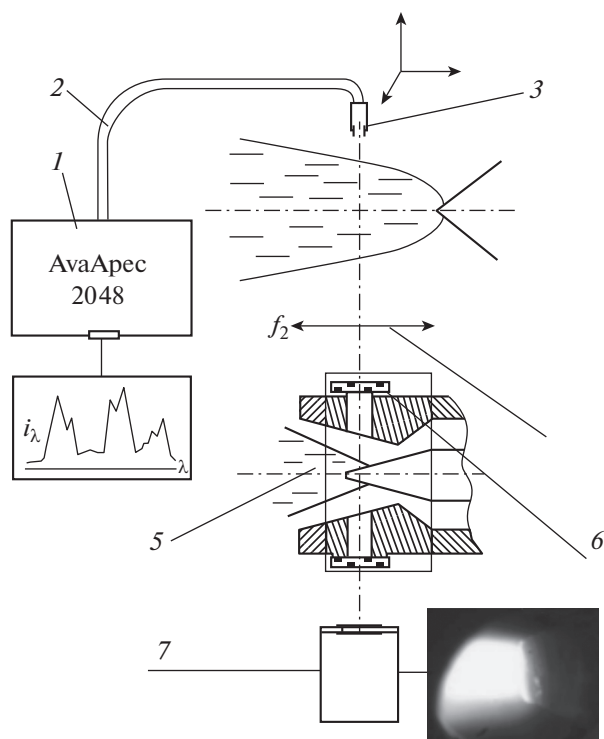


Рис. 1. Схематический чертеж ГНП с системой оптических измерений: 1 – спектрограф AvaSpec 2048 или ДФС-452 с матрицей Andor, 2 – оптоволоконно, 3 – система крепления и перемещения оптоволоконного кабеля, 4 – фокусирующая линза, 5 – дуга, 6 – кварцевые окна, 7 – высокоскоростная камера типа Phantom Miro M110 с объективом “Гелиос 40-2”.

Одним из основных методов исследования катода является измерение температуры поверхности в процессе горения дуги [14–16]. Для этого был разработан генератор низкотемпературной плазмы (ГНП) постоянного тока с самоустанавливающейся длиной дуги, вихревой стабилизацией и расширяющимся каналом выходного электрода [17, 18], состоящий из трех узлов (рис. 1): катодного узла со вставкой из вольфрамового прутка диаметром 5 мм; изолированного от катода и анода соплового узла со смотровыми окнами для регистрации спектров излучения и изменения поверхности катода; медного анода с расширяющимся каналом.

Экспериментальный стенд оснащен комплексом электрического, теплового и газодинамического контроля и управления режимом их работы. Наличие и значения тока, протекающего через выходной электрод, определяется измерением сигнала с коаксиального шунта. Система основана на использовании аналого-цифровых плат L-Card L761, L783 с возможностью одновременного опроса 16-ти измерительных каналов, частота опроса – до 3000 кГц, что позволяет измерять как мгновенные значения токов и напряже-

ний, так и усредненные значения по времени с регистрацией, цифровым и графическим отображением информации. Оптические измерения проводятся через специально изготовленные смотровые окна в сопле. С одного из смотровых окон резкое изображение проецировалось объективом “Гелиос 40-2” на матрицу высокоскоростной, черно-белой камеры Phantom-Miro M110. С противоположного окна изображение дуги проецировалось (с использованием кварцевой линзы с фокусным расстоянием 220 мм) на входную щель спектрографа ДФС-452 с высокочувствительной матрицей Andor или спектрометров типа AvaSpec 2048, AvaSpec 3648, MS 5204i, которые выполняют мониторинг излучения плазменного потока. Длина дуги при работе плазматрона с силой тока 200 А и расходе аргона 1.5 г/с составляет 1–1.5 см диаметром 2 мм.

На основе спектральных измерений линий аргона ArII и ArIII в диапазоне 327–370 нм на оси дугового разряда и метода относительных интенсивностей [7]

$$\frac{I_{ki}}{I_{mn}} = 2 \frac{A_{ki} g_k \lambda_{mn}}{A_{mn} g_m \lambda_{ki}} \left(\frac{2\pi m k T_e}{h^2} \right)^{3/2} \times \exp\left(\frac{-E_k - E_m + E_1^{++}}{k T_e} \right), \quad (1)$$

где A – вероятность перехода, g – статистический вес, λ – длина волны линии, E_{k-m} – энергия возбуждения соответствующих частиц, E_1^{++} – потенциал ионизации однократно заряженных ионов; все значения являются табличными, полученными из базы данных NIST, получена температура электронов на уровне $T_e \sim 2.6$ эВ для вольфрамового катода и $T_e \sim 2$ эВ для торированного и лантанированного катода. Штарковское уширение спектральных линий [19] Ar II 363.79 нм и Ar II 329.36 нм дало следующее значение на оси дугового разряда $n_e \sim 10^{17}$ см⁻³. Влиянием эмиссии с катода можно пренебречь, так как вблизи длин волн, используемых для определения температуры плазмы 320–370 нм, отсутствуют излучающие линии материала катода (рис. 2).

Получить видеogramмы свечения катода и определить поля температуры на поверхности (рис. 3) можно с помощью скоростной камеры типа Phantom Miro M110, с установленным перед объективом интерференционным фильтром с пропускной длиной волны 589 нм для вырезания свечения дуги [20].

Степень черноты исследуемой поверхности в твердой фазе принималась равной 0.48, в жидкой – 0.40 [21, 22]. Влиянием излучения от катодных элементов можно пренебречь, так как вблизи длин волн, используемых для определения темпе-

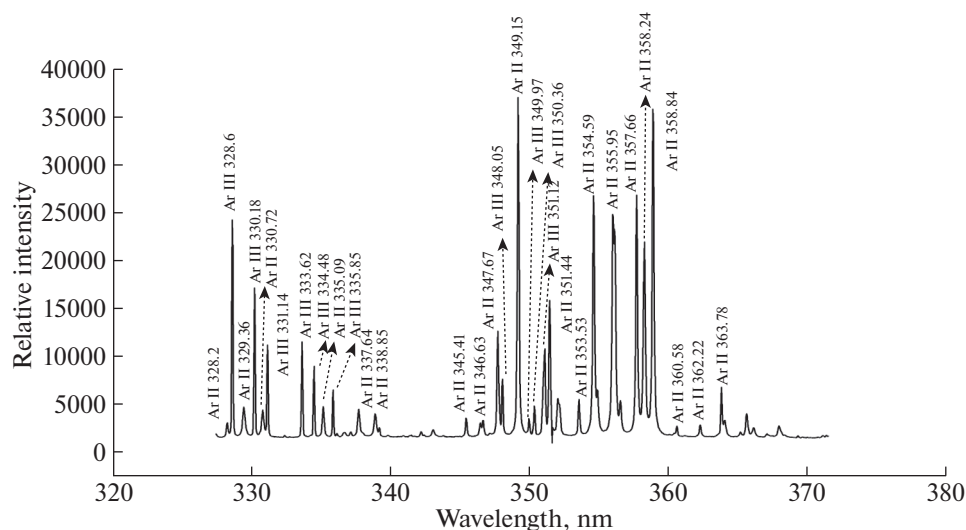


Рис. 2. Характерный спектр излучения плазмы аргона на расстоянии 0.1 мм от катода.

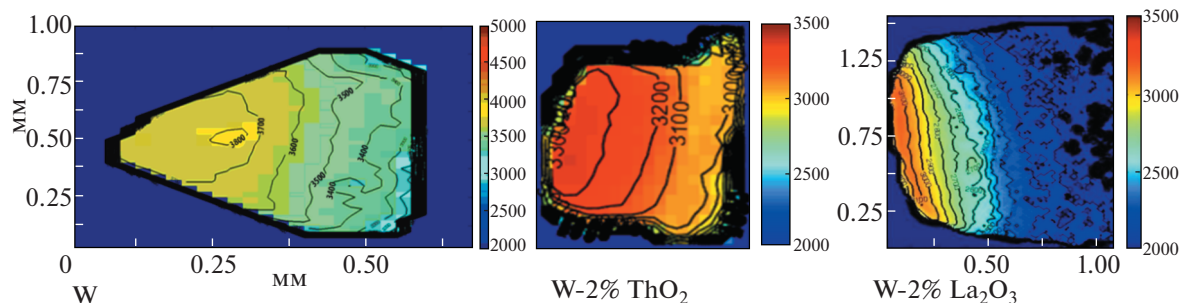


Рис. 3. Характерные термограммы полей температур на поверхности катода.

ратуры плазмы 320–370 нм, отсутствуют излучающие линии материала катода (рис. 2).

Исследования показали, что максимальная температура поверхности при равных условиях эксперимента (200 А, 1.5 г/с) наблюдается на поверхности катода со вставкой из чистого вольфрама ~3800 К, тогда как у торированного вольфрама ~3300 К и минимальная на поверхности лантанированного вольфрама ~3100 К. Как показывают многочисленные эксперименты (время работы катода составляло от 10 минут до часа) у катода с чистым вольфрамом кончик находится в жидкой фазе, так как температура плавления вольфрама 3695 К, что и подтверждает косвенно правильность измерений. Катод со вставками из торированного и лантанированного вольфрама всегда оставался в твердой фазе, так как температура плавления торированного вольфрама ~3680 К, а лантанированного ~4473 К.

Разная температура поверхности связана с тем, что работа выхода чистого вольфрама (4.55 эВ) больше чем торированного (3.38 эВ), который в свою очередь больше лантанированного

(2.63 эВ). Стоит отметить, что плотность тока также зависит от постоянной Ричардсона–Дэшмана A_{RD} , которая для исследуемых катодов отличается между собой не более чем в ~2 раза. Но при этом, ток будет определяться в основном не величиной A_{RD} , а эффективным значением работы выхода с учетом поправки Шоттки, обусловленной сильным электрическим полем в катодном падении [23–25].

Поэтому в ГНП, где важен ресурс, в инертном газе лучше использовать катод со вставкой из лантанированного вольфрама, что обусловлено малым значением работы выхода и высокой температурой плавления.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-29-01028.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коротеев А.С., Миронов В.М., Свирчук Ю.С. Плазмотроны: конструкции, характеристики, расчет. М.: Машиностроение, 1993. С. 296.

2. Жуков М.Ф., Засыткин И.М., Тимошевский А.Н., Михайлов Б.И., Десятков Г.А. Электродуговые генераторы термической плазмы. Низкотемпературная плазма. Т. 17. Новосибирск: Наука, СП РАН, 1999. С. 712.
3. Цыдыпов Б.Д. // Теплофизика и аэромеханика. 2007. Т. 14. С. 269.
4. Полищук В.П. // ТВТ. 2005. Т. 43. С. 11.
5. Benilov M.S., Carpaij M., Cunha M.D. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. V. 39. P. 2124.
6. Ortega D., Sillero Marin J.A., Munoz-Serrano E., Casado E. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42. P. 085202.
7. Gleizes A. // Plasma Chem. Plasma Process. 2015. V. 35. P. 455.
8. Murphy A.B. // Plasma Chem. Plasma Process. 2015. V. 35. P. 471.
9. Benilov M.S. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. V. 41. P. 144001.
10. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. 3-е изд. М., 2009. С. 736.
11. Haidar J., Farmer A.J.D. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1994. V. 27. P. 555.
12. Sillero J.A., Ortega D., Munoz-Serrano E., Casado E. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. V. 43. P. 185204.
13. Gadzhiev M.Kh., Sargsyan M.A., Tereshonok D.V., Tyufityaev A.S. // EPL. 2015. V. 111. P. 25001.
14. Пустогаров А.В., Колесниченко А.Н., Гаврюшенко Б.С., Захаркин Р.Я., Драган В.Д. // ТВТ. 1973. Т. 11. С. 174.
15. Haidar J., Farmer A.J.D. // Rev. Sci. Instrum. 1993. V. 64. P. 542.
16. Haidar J. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1995. V. 28. P. 2494.
17. Исакаев Э.Х., Тюфтяев А.С., Гаджиев М.Х. // Физика и химия обработки материалов. 2016. № 3. С. 27.
18. Гаджиев М.Х., Куликов Ю.М., Сон Э.Е., Тюфтяев А.С., Саргсян М.А., Юсупов Д.И. // ТВТ. 2020. Т. 58. С. 15.
19. Konjevic N., Lesage A., Fuhr J.R., Wiese W.L. // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2002. V. 31. P. 819.
20. Goryachev S.V., Isakaev E.H., Myasnikov M.I., Chinov V.F. // High Temperatures. 2008. V. 46. P. 1.
21. Cagran C., Brunner C., Seifiteru A., Pottlacher G. // High Temperatures—High Pressures. 2002. V. 34 (6). P. 669.
22. Cagran C., Pottlacher G., Rink M., Bauer W. // Internat. J. Thermophysics. 2005. V. 26 (4). P. 1001.
23. Gadzhiev M.Kh., Sargsyan M.A., Tereshonok D.V., Tyufityaev A.S. // Europ. Phys. Lett. 2015. V. 111. P. 25001.
24. Gadzhiev M.Kh., Sargsyan M.A., Tereshonok D.V., Tyufityaev A.S. // Europ. Phys. Lett. 2016. V. 115. P. 35002.
25. Sargsyan M.A., Tereshonok D.V., Valyano G.E., Scherbakov V.V., Konovalov P.A., Gadzhiev M.Kh. // Phys. Plasmas. 2020. V. 27. P. 023506.