

Дуговой разряд с холодным полым катодом в скрещенных электрическом и магнитном полях

© П.М. Щанин, Н.Н. Коваль, Ю.Х. Ахмадеев, С.В. Григорьев

Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055 Томск, Россия
e-mail: schanin@opee.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 25 июля 2003 г.)

Дуговой разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях с холодным полым катодом вследствие поступления электронов из катодного пятна, инициируемого на внутренней поверхности катода разрядом по поверхности диэлектрика, горит стабильно при низких давлениях рабочего газа 10^{-2} – 10^{-1} Па и зависящих от магнитного поля и рода газа напряжениях 20–50 В в диапазоне разрядных токов 20–200 А. Наибольшее влияние на напряжение горения и ток разряда оказывает магнитное поле. При увеличении магнитного поля из-за падения совпадающей с направлением электрического поля проводимости плазмы в прикатодной области разряда уменьшается ток разряда и повышается напряжение его горения. Погасание разряда происходит при достижении критического, зависящего от рода газа магнитного поля. Вследствие отсутствия накаливаемых элементов полый катод длительно функционирует при горении дуги как в инертных, реактивных, так и в химически активных газах.

Введение

Низкое напряжение горения, высокие значения разрядных токов и широкий диапазон давлений, при которых зажигается и стабильно горит дуга низкого давления, объясняет широкое ее применение в различных газоразрядных устройствах. В ионных источниках дуговой разряд позволяет получать как газовые ионы, так и ионы практически всех проводящих материалов [1–3]. При создании плазмы в больших объемах для проведения процессов поверхностной модификации конденсированных сред вакуумные и газовые дуговые разряды позволяют решить актуальную проблему обеспечения высокой энергетической эффективности в устройствах технологического назначения. Широко используемый в настоящее время для ионного азотирования тлеющий разряд имеет высокое напряжение горения (сотни вольт) и давление азота $\sim 10^4$ Па, при котором зажигается и стабильно горит разряд, поэтому требует введения водорода для связывания кислорода, присутствующего в остаточном газе. А дуговой разряд с накаливаемым катодом [4] имеет ограниченный срок службы вследствие разрушения катода в результате его бомбардировки ионами и отравления при горении дуги в химически активных средах. Вакуумный дуговой разряд в некоторых технологических процессах неприемлем вследствие большого количества микрокапель и атомов материала катода в плазменном потоке, хотя, как показано в [5], при некотором изменении конструкции можно существенно увеличить процентное содержание газовых ионов в вакуумном дуговом разряде. В [6] приведено краткое сообщение, что в плазменном потоке аммиака, создаваемого дуговым разрядом, проведено азотирование поверхности без ее существенного нагрева.

Дуговой разряд с холодным полым катодом, в котором катодное пятно функционирует на внутренней поверхно-

сти полого катода [7,8], позволяет при сохранении всех достоинств дуги значительно уменьшить или исключить проникновение материала катода в анодную область разряда — рабочую камеру и обеспечивает длительное горение разряда в химически активных газах.

Разрядная система

В разрядной системе, схематично представленной на рис. 1, дуга, инициируемая разрядом по поверхности диэлектрика, зажигается между полым цилиндрическим водоохлаждаемым катодом диаметром $D = 110$ мм и

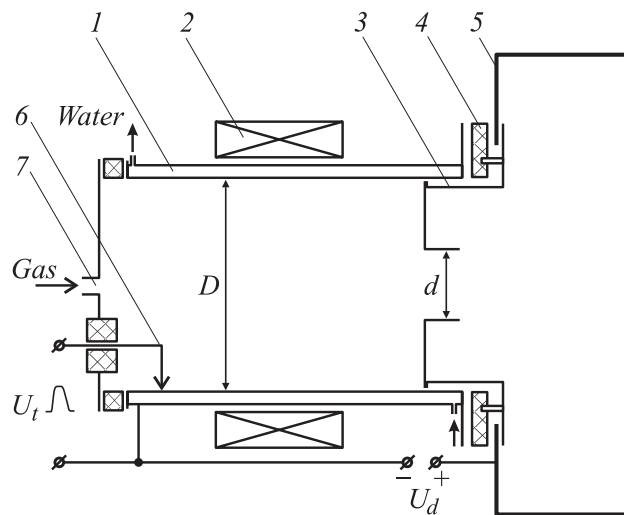


Рис. 1. Схема разрядной системы дугового источника с полым катодом: 1 — полый катод, 2 — магнитная катушка, 3 — дугогаситель, 4 — изолятор, 5 — рабочая вакуумная камера, 6 — поджигающее устройство, 7 — газопровод.

длиной $L = 200$ мм и полым анодом, роль которого играет рабочая вакуумная камера, имеющая размер $600 \times 600 \times 600$ мм. Разряд стационарно горит через отверстие диаметром $d = 15\text{--}50$ мм в дугогасителе, расположенном на торце полого катода и находящемся под „плавающим“ потенциалом.

Дугогаситель с диафрагмой препятствует выходу катодного пятна на торцевую кромку полого катода и переходу дуги из режима диффузного горения в анодной области, к режиму контракции с образованием анодного пятна на близлежащем участке анода.

Аксиальное магнитное поле в катодной области разряда создается короткой магнитной катушкой, надетой на полый катод. Как показали исследования [8], в скрещенных электрическом и магнитном полях катодное пятно движется по круговой орбите по внутренней поверхности полого катода в максимуме неоднородного магнитного поля, причем скорость движения пятна повышается с увеличением магнитного поля. Продукты распыляемого материала катода — микрокапли, атомы и ионы оседают в основном на противоположной относительно катодного пятна поверхности полого катода, снижая интегральную эрозию полого катода и повышая его ресурс. Некоторая часть распыляемого материала катода, зависящая от диаметра отверстия в дугогасителе, в виде ионов, атомов и микрокапель может поступать в анодную часть разряда.

Существуют различные способы фильтрации микрокапель [9–11]. В данной работе при исследовании поступления материала катода в анодную полость изменялся диаметр отверстия в торцевом дугогасителе. Однако при уменьшении диаметра отверстия d вследствие изменения условий горения разряда могут изменяться параметры плазмы в анодной части разряда.

Исследование разряда и обсуждение результатов

Основные результаты исследования горения разряда были проведены при использовании трех различных газов и нескольких полых катодов, изготовленных из нержавеющей стали, меди, алюминия и графита при диаметре отверстия в дугогасителе $d = 50$ мм.

Для всех исследованных газов при постоянном давлении газа $p = 4.4 \cdot 10^{-1}$ Па и магнитном поле $B = 0.6\text{--}14$ мТ напряжение горения разряда в широких пределах практически не зависит от тока разряда. В атмосфере аргона дуга горит при наиболее низком напряжении. В рабочем диапазоне давлений $p = 8 \cdot 10^{-2}\text{--}8.0 \cdot 10^{-1}$ Па изменения напряжения горения разряда не превышают 10% при горении дуги во всех газах (рис. 2).

Вследствие близких значений катодных падений напряжений (15–21 В для Cu, 16–20 В для Al и 17–18 В для Fe [12]) напряжения горения, как видно из рис. 3, практически одинаковы для катодов, изготовленных из

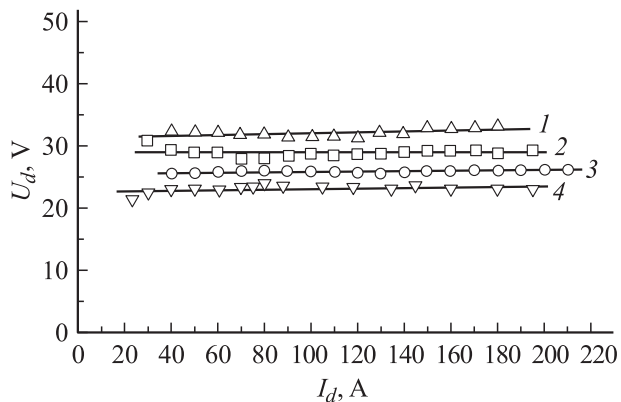


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики разряда при напуске азота (1), кислорода (2), аргона (3) в разрядный промежуток с медным полым катодом и аргона с полым катодом из нержавеющей стали (4). Давление газа $p = 4.4 \cdot 10^{-1}$ Па, магнитное поле $B = 3$ мТ.

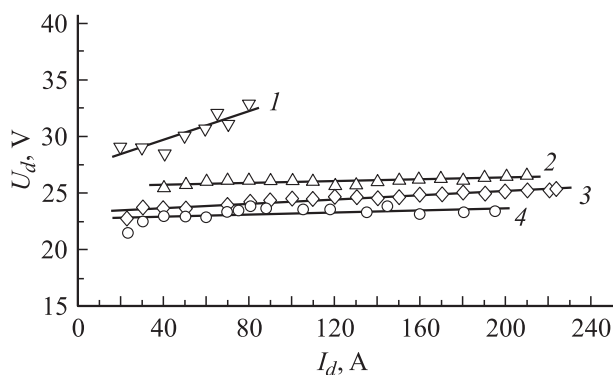


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики разряда при работе на графитовом (1), медном (2) алюминиевом (3) катоде и катоде из нержавеющей стали (4). Рабочий газ аргон при $p = 4.4 \cdot 10^{-1}$ Па, $B = 3$ мТ.

нержавеющей стали и меди. Для катода из графита напряжение горения исследуемого разряда увеличивается на 35–50%, хотя, согласно литературным данным на графите [13], оно должно иметь наименьшее значение.

Второй особенностью горения дуги на графите является то, что катодное пятно практически останавливается на внутренней поверхности полого катода. Скорость его движения падает до 3 мм/с, в то время как при том же магнитном поле на чистых металлах скорость движения достигает 15 м/с.

Наиболее существенное влияние на напряжение горения и ток разряда оказывает магнитное поле. После зажигания разряда при некотором начальном магнитном поле дальнейшее увеличение магнитного поля приводит к повышению напряжения горения и снижению тока разряда (рис. 4).

Снижение тока разряда и его погасание после достижения критического значения связаны с уменьшением

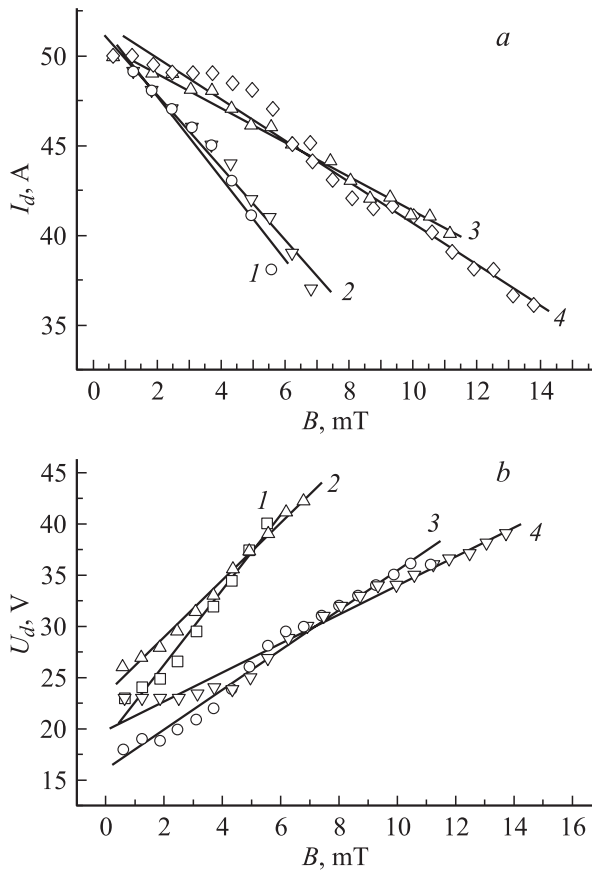


Рис. 4. Зависимость тока разряда (а) и напряжения горения (б) от изменения магнитного поля при напуске кислорода (1), азота (2), аргона (3) в разрядный промежуток с медным полым катодом и аргона с полым катодом из нержавеющей стали (4). Давление газа $p = 4.4 \cdot 10^{-1}$ Па.

продольной (совпадающей с направлением электрического поля) проводимости плазмы, определяемой из выражения

$$\sigma'' = \frac{\sigma_e}{1 + \omega_H^2 / \nu_m^2}, \quad (1)$$

где $\sigma_e = e^2 n_e / m v_m$ — проводимость в отсутствие магнитного поля, $\omega_H = eB/m$ — циклотронная частота, $\nu_m = n_g v \sigma$ — частота столкновений электрона. Здесь v — скорость электрона, n_e — концентрация электронов, n_g — концентрация нейтралов, σ — транспортное сечение упругих столкновений. Как следует из формулы (1), с увеличением магнитного поля и соответственно циклотронной частоты происходит уменьшение продольной проводимости, что и приводит к снижению тока разряда. В исследованном диапазоне магнитного поля циклотронная частота изменялась от $9.0 \cdot 10^7$ до $9.0 \cdot 10^8$ s^{-1} . При давлении аргона $p = 4.4 \cdot 10^{-1}$ Па и средней энергии электрона вблизи катода $\varepsilon = 10-20$ eV частота упругих столкновений $\nu_m = 1.5 \cdot 10^8$ s^{-1} . Снижение тока разряда при увеличении магнитного поля по крайней мере качественно согласуется с зависимостью проводимости от магнитного поля. Отличия в скорости

изменения тока разряда при увеличении магнитного поля и горения дуги в различных газах можно объяснить различными значениями частоты упругих столкновений электрона. В рассматриваемом диапазоне энергий электронов вблизи катода (10–20 eV) частота столкновений электронов в аргоне примерно в два раза выше, чем в азоте и кислороде, поэтому в аргоне происходит более медленное снижение тока разряда, а его погасение при магнитных полях выше в 1.5–2 раза, чем в азоте.

Магнитное поле по-разному оказывает влияние на напряжение горения и ток разряда при изменении давления газа. При низких значениях магнитного поля ($B = 3$ мТ) в исследованном диапазоне рабочих давлений от 0.25 до 1.4 Па ток разряда не зависит от давления (рис. 5).

При высоком магнитном поле ($B = 9$ мТ) зажигание и стабильное горение разряда происходит в области более высоких давлений и дальнейшее повышение давления приводит к линейному снижению напряжения и увеличению тока разряда (рис. 6). Повышение начального давления стабильного горения разряда при больших

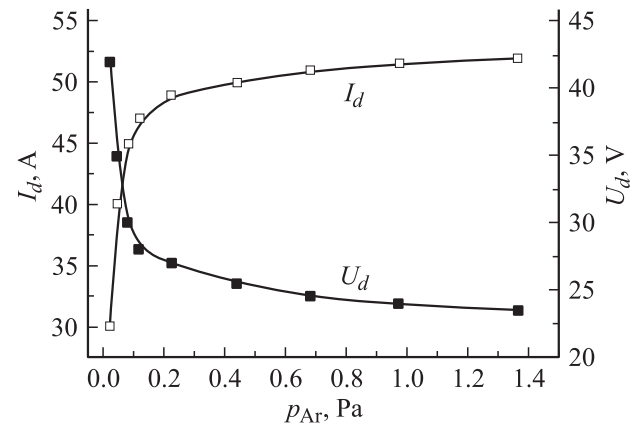


Рис. 5. Зависимость тока разряда и напряжения горения от изменения давления при напуске аргона в разрядный промежуток. Магнитное поле $B = 3$ мТ.

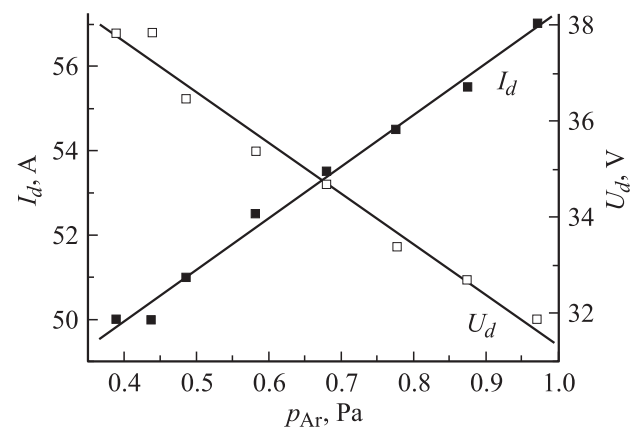


Рис. 6. Зависимость тока разряда и напряжения горения от изменения давления при напуске аргона в разрядный промежуток. Магнитное поле $B = 9$ мТ.

Таблица 1. Влияние диаметра отверстия на параметры плазмы

Диаметр d , мм	U_d , В	φ_p , В	$n \cdot 10^9$, cm^{-3}	T_e , эВ	φ_f , В	φ_f (расчет), В
50	26.5	4.0	5.3	3.4	-11.5	(-16.2)
20	27.0	3.8	5.2	3.6	-11.5	(-17.1)
15	27.0	3.2	3.9	4.0	-11.5	(-18.6)

магнитных полях связано с необходимостью увеличения, согласно выражению (1), частоты упругих столкновений электронов для сохранения продольной проводимости плазмы.

Параметры плазмы в полом аноде

Изменение диаметра отверстия d может вызывать изменение режима горения дуги и соответственно параметров плазмы в анодной части разряда. Экспериментальное измерение параметров Ar плазмы осуществлялось на расстоянии 30 см от внешнего торца дугогасителя с помощью плоского зонда с охранным кольцом при трех диаметрах отверстия $d = 5, 2, 1.5$ см, токе разряда 50 А и давлении аргона $p = 4.4 \cdot 10^{-1}$ Па. Результаты исследования представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что при неизменном напряжении горения U_d уменьшение диаметра отверстия приводит к снижению концентрации плазмы n , понижению ее потенциала φ_p и повышению электронной температуры T_e . Плавающий потенциал φ_f остается неизменным и отличается от значений плавающего потенциала φ_f , рассчитанных по формуле

$$\varphi_f = T_e \ln \left(\frac{M}{2\pi m} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где T_e — температура электронов в вольтах, M — масса ионов, m — масса электронов.

Как показывают визуальные наблюдения, наряду с изменением параметров плазмы в анодной части разряда уменьшение диаметра отверстия ведет к некоторой перестройке структуры разряда. При малых диаметрах отверстия в центре наблюдается более яркое свечение, которое, по всей вероятности, связано с наличием в отверстии быстрых электронов с плотностью, изменяющейся по закону $n_e(r) \approx 1/r$ [4], и более высокой концентрацией плазмы. При сечении упругого рассеяния электронов в аргоне $\sigma = 1.2 \cdot 10^{-15}$ cm^{-2} , давлении $p = 4.4 \cdot 10^{-1}$ Па и длине свободного пробега $\lambda \approx 10$ см имеется вероятность их захвата в осцилляторное движение в плазме полого катода и выхода нерелаксированных быстрых электронов в анодную полость, которые осуществляют в ней ионизацию газа.

В анодной части разряда, как видно из табл. 2, в которой представлены результаты измерений параметров плазмы при токе разряда $I_d = 50$ А и магнитном

Таблица 2. Параметры плазмы в зависимости от давления

Давление, Па	$n \cdot 10^9$, cm^{-3}	φ_f , В	φ_p , В	T_e , эВ
0.05	4.4	-16.5	7.2	3.6
0.33	9.2	-13.5	4.4	2.0
0.44	6.8	-12.5	3.6	3.1
0.9	4.0	-11.5	2.7	4.2

поле $B = 3$ мТ, при изменении давления аргона в диапазоне от $3 \cdot 10^{-1}$ до $9 \cdot 10^{-1}$ Па повышается электронная температура и снижаются концентрация, потенциал плазмы относительно анода и плавающий потенциал. Однако при низком давлении $5 \cdot 10^{-2}$ Па концентрация и температура плазмы не подчиняются закономерностям, которые наблюдаются при более высоких давлениях.

Как показывают визуальные наблюдения, при этом давлении происходит перестройка разряда: из диффузной формы разряд переходит в струйную форму, причем струя привязана к вращающемуся в полом катоду катодному пятну. Вероятно, это связано с выходом из полого катода быстрых электронов, которые производят в анодной полости возбуждение и ионизацию молекул газа.

Как и следовало ожидать, параметры плазмы в анодной части разряда при горении дуги с полым катодом, изготовленным из графита, существенно отличаются. Так, при токе разряда в аргоне $I_d = 50$ А, напряжении горения $U_d = 40.5$ В и магнитном поле $B = 12$ мТ потенциал плазмы относительно анода сдвигается в отрицательную область значений $\varphi_p = -3.2$ В, увеличивается отрицательный плавающий потенциал до $\varphi_f = -20.5$ В и повышается электронная температура до $T_e = 8$ эВ.

Поступление материала катода в анодную полость

Горение дуги с катодным пятном сопровождается эрозией катода, зависящей от тока разряда. При токах разряда 60–80 А удельная эрозия в зависимости от материала катода составляет $0.5–1.2 \cdot 10^{-4}$ г/С [15]. Как указывалось выше, в анодную область разряда материал катода может поступать в виде ионов, атомов и микрокапель. В рассматриваемой конструкции электродов разрядной системы поступление материала будет зависеть от диаметра отверстия в дугогасителе и распределения атомов и ионов в полом катоду. С учетом упругих

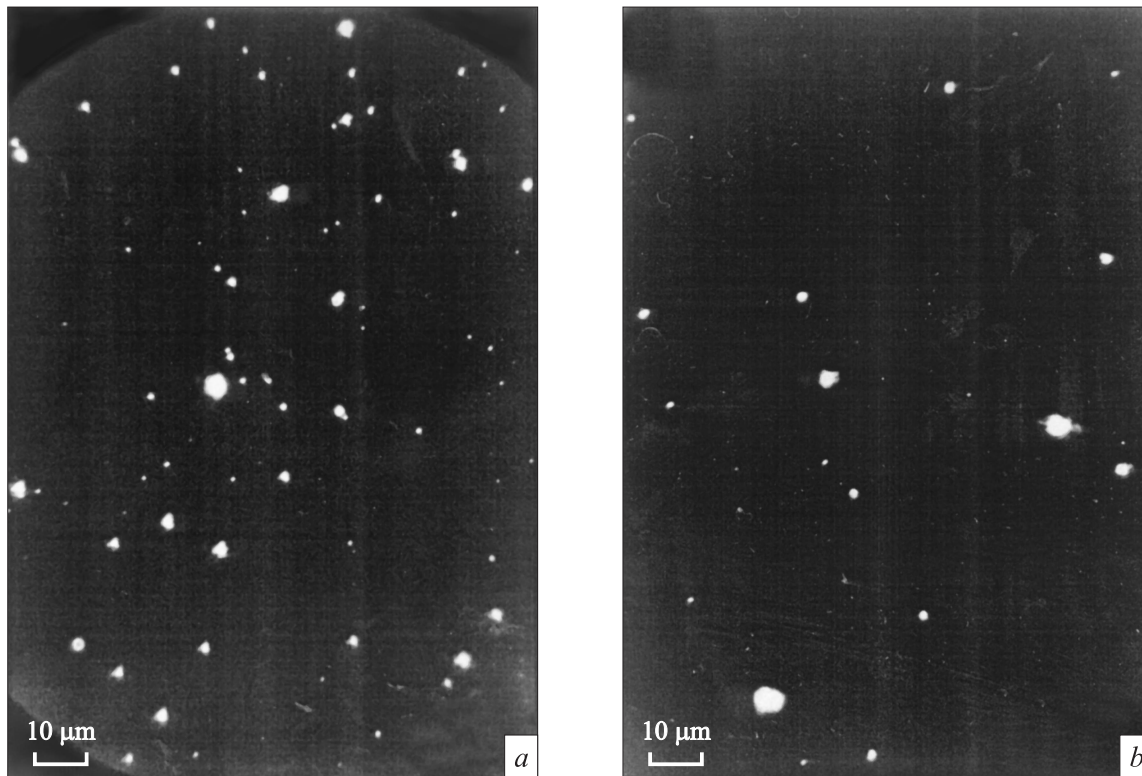


Рис. 7. Поверхность образцов после горения дуги на медном полой катоде при напуске в вакуумную камеру аргона. Диаметр отверстия 5 (а) и 1.5 см (b)

столкновений частиц материала катода с атомами газа проведем оценку возможного их распределения. Будем считать, что атомы и ионы покидают катод перпендикулярно его поверхности, тогда после прохождения расстояния x в результате упругих столкновений и потери импульса количество частиц, изменивших свое первоначальное направление, определяется соотношением

$$\Delta N = N_C \left[1 - \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right) \right], \quad (3)$$

где N_C — количество частиц, покидающих катод; $\lambda = 1/n_g \sigma$ — длина свободного пробега частиц.

Если считать, что сечения упругих столкновений атомов материала катода (Fe, Al и Cu) не сильно отличаются от атомов Ar, то при давлении $p = 4.4 \cdot 10^{-1}$ Па и $\lambda = 1.5$ см практически все атомы после прохождения расстояния до оси полого катода ($x = D/2 = 5$ см) испытывают столкновения и изменяют свое направление. Вследствие явлений перезарядки и поляризации нейтралов рассеяние ионов материала катода будет более сильным, чем атомов, поэтому в первом приближении можно считать, что распределение частиц в полой катоде является изотропным. Проведем грубую оценку выхода ионов и атомов в анодную полость. В случае их изотропного распределения в полой катоде выход частиц материала катода определяется отношением площади отверстия к общей площади катода $f_a = S_a/S_c$. Так, при диаметре отверстия $d = 5$ см количество частиц, поступающих в анодную полость $N_a = f_a N_0 = 1 \cdot 10^{-2} N_0$,

а при диаметре $d = 1.5$ см $N_a = 1 \cdot 10^{-3} N_0$, где N_0 — количество частиц в полой катоде. Если учесть, что в стандартной напылительной системе в аналогичных условиях в течение 2h наносится слой толщиной $3 \mu\text{m}$, то в рассматриваемой разрядной системе при 80%-ном содержании ионизированной и паровой фазы в продуктах эрозии толщина слоя осажденных примесей не будет превышать нескольких десятков атомных слоев.

Для экспериментального определения микрокапель, поступающих в анодную область разряда, на расстоянии 30 см от промежуточного электрода устанавливались стеклянные и металлические мишени. Как показали исследования, при диаметре отверстия 5 см после горения дуги в течение 1 h на поверхности мишени осаждаются капли размером $0.5\text{--}4 \mu\text{m}$ с плотностью $100\text{--}120$ и $10\text{--}20 \text{mm}^{-2}$ при диаметре отверстия 1.5 см (рис. 7).

При использовании в качестве материала катода нержавеющей стали при тех же токах разряда количество микрокапель уменьшается на порядок величины. Микрокапли на мишени практически полностью исчезают, если к металлической мишени прикладывается отрицательное смещение свыше ~ 100 В. Это известное явление [16–18] связано с отражением от образца, находящегося под отрицательным смещением, микрокапель, отрицательно заряженных до плавающего потенциала в плазме разряда.

Заключение

В дуговом разряде с холодным полым катодом катодное пятно, инициируемое разрядом по поверхности диэлектрика, в скрещенных электрическом и магнитном полях движется по внутренней поверхности катода в максимуме магнитного поля. При токах разряда 20–200 А газовая дуга низкого давления горит стабильно в узком диапазоне магнитных полей. При постоянном давлении и магнитном поле напряжение горения практически не зависит от тока разряда (плоская вольт-амперная характеристика) и составляет в зависимости от рода рабочего газа и материала катода 20–50 В. За счет осаждения микрокапель и атомов материала распыляемого катода на противоположную от катодного пятна поверхность катода увеличивается срок его службы и при определенных условиях исключается поступление материала катода в анодную область разряда. Перемещение максимума магнитного поля, создаваемого короткой катушкой, вдоль полого катода позволяет за счет смещения катодного пятна организовать равномерный износ катода и использовать большую часть рабочей поверхности катода. Фильтрация микрокапель, отраженных от внутренней поверхности полого катода, осуществляется изменением площади отверстия, соединяющего катодную и анодную области разряда. Наиболее приемлемым материалом катода для получения газовой плазмы является нержавеющая сталь, при использовании которой капельная фракция при горении дуги минимальна среди исследованных материалов.

Плазма, генерируемая исследованным разрядом, использовалась в экспериментах по модификации поверхности сталей и сплавов.

Список литературы

- [1] *Braun I.G.* The Physics and Technology of Ion Sources. New York: Wiley, 1989. 444 p.
- [2] *Bugaev S.P., Nikolaev A.G., Oks E.M.* et al. // Rev. Sci. Instrum. 1992. Vol. 63. N 4. P. 2422–2424.
- [3] *Oks E.M., Schanin P.M.* // Phys. Plasma. 1999. Vol. 6. N 5. P. 1649–1654.
- [4] *Борисов Д.П., Коваль Н.Н., Щанин П.М.* // Изв. вузов. Физика. 1994. № 3. С. 115–120.
- [5] *Bugaev A.S., Gushenets V.I., Nikolaev A.G.* et al. Emerging Application of Vacuum-Arc-Produced Plasma, Ion and Electron Beams. Netherlands: Kluwer Academic Publ. 2002. P. 79–90.
- [6] *Hirokazu Tahara, Yasutaka Ando, Takao Yoshikawa.* // IEEE Trans. on Plasma Science. 2002. Vol. 31. N 2. P. 281–288.
- [7] *Гаврилов Н.В., Крейнфельд Ю.Е., Месляц Г.А., Шведов Ф.Н.* // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 10. С. 965–969.
- [8] *Винтизенко Л.Г., Григорьев С.В., Коваль Н.Н.* и др. // Изв. вузов. Физика. 2001. № 9. С. 28–43.
- [9] *Аксенов И.И., Белоус В.А., Падалка В.Г.* и др. // ПТЭ. 1978. № 5. С. 236–238.
- [10] *Anders S., Anders A., Dickunson M., MakGill R., Brown I.* ISDEIV. Berkeley (USA), 1996. P. 904.
- [11] *Рябчиков А.И., Дегтярев С.В., Степанов И.Б.* // Изв. вузов. Физика. 1998. № 4. С. 193–195.
- [12] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 598 с.
- [13] *Лафферти Дж.* Вакуумные дуги. М.: Мир, 1982. 432 с.
- [14] *Жаринов А.В., Коваленко Ю.А.* // Изв. вузов. Физика. 2001. № 9. С. 44–47.
- [15] *Дороднов А.М.* // ЖТФ. 1978. Т. 48. С. 1858–1870.
- [16] *Keidar M., Aharonov R., Beilis I.I.* // J. Sci. Technol. 1999. A 17(5). P. 3067–3073.
- [17] *Schanin P.M., Koval N.N., Kozyrev A.V.* and et al. // J. Tech. Phys. (Poland). 2000. Vol. 41. N 2. P. 177–184.
- [18] *Schanin P.M., Koval N.N., Kozyrev A.V.* et al. // Proc. 5th Conf. on Modif. of Mater. with Particle Beams and Plasma Flows. Tomsk, 2000. P. 438–441.