

04;12

Прохождение потока металлической плазмы через плазмооптическую транспортирующую систему

© В.Л. Паперный, В.И. Красов

Иркутский государственный университет,
E-mail: paperny@math.isu.runnet.ru

Поступило в Редакцию 17 сентября 2010 г.

Исследовалось прохождение плазменного потока стационарного вакуумно-дугового разряда через транспортирующую плазмооптическую систему на основе криволинейного магнитного поля. Особенностью системы является отсутствие металлического плазмовода и несовпадение осей соленоидов ведущего магнитного поля с осью плазменного потока. Показано, что положение и форма плазменного потока на выходе системы варьируется в широком диапазоне путем изменения токов соленоидов и положительного смещения на управляющем электроде, введенном в плазменный поток, причем при неизменных параметрах транспортирующей системы положение потока зависит от отношения масса/заряд ионов плазмы.

Электромагнитные транспортирующие системы на основе криволинейного магнитного поля широко используются для очистки потоков металлической плазмы от макрочастиц материала катода в технологических вакуумно-дуговых установках [1–3]. Для повышения коэффициента прохождения плазмы в таких системах (т.е. отношения выходного и входного ионных токов) используют принципы плазмооптики [4]. С этой целью на обычно используемый в таких системах металлический плазмовод, помещенный в криволинейное магнитное поле, подают положительное смещение [3]. Было обнаружено, что оптимальная величина смещения, при которой коэффициент прохождения достигает максимума, зависит от материала катода (т.е. массы и, возможно, заряда ионов), а также от тока дуги, т.е. от плотности плазмы [5,6].

Эти результаты свидетельствуют о том, что подобная система может быть использована также в качестве фильтра ионов по параметру $\mu = t/Z$, который определяет характер движения ионов в

электромагнитном поле. Действительно, если на вход такой системы подать многокомпонентный плазменный поток, то на выход пройдут преимущественно ионы, для которых приложенное смещение является оптимальным, а остальные ионные компоненты уйдут из потока, попав на стенку плазмоведа. Подобную плазмооптическую транспортирующую систему можно использовать и для задач сепарации по массе (деленной на заряд) многокомпонентного ионного потока, однако для этого необходима конструкция, обеспечивающая транспортировку на выход системы всех разделенных в пространстве ионных компонентов потока. Этого можно добиться, используя конструкцию, в которой отсутствует плазмовод, ограничивающий прохождение ионных компонент, для которых параметры системы не являются оптимальными. Целью данной работы является изучение возможности осуществления масс-сепарации ионов с помощью транспортирующей системы подобного типа.

Эксперименты проводились в вакуумно-дуговой установке, снабженной транспортирующей системой на основе криволинейного магнитного поля, играющей роль фильтра макрочастиц. Схема установки приведена на рис. 1. Стационарный разряд инициировался на передней торцевой поверхности диаметром $d_c = 40$ mm водоохлаждаемого катода, изготовленного в виде усеченного конуса (Al, содержание 99.9% или Ti, содержание более 99.5%). Кольцевой анод с внутренним диаметром 60 mm был соединен с вакуумной камерой, где поддерживалось давление не выше $2 \cdot 10^{-3}$ Pa. Струя металлической плазмы, генерируемой на поверхности катода, проходила через отверстие анода и затем двигалась вдоль силовых линий магнитного поля магнитной системы. Ток дуги в эксперименте составлял 50 A. Магнитное поле фильтра формировалось пятью соленоидами, три из которых (3, 4, 5 на рис. 1) были коаксиальны, а ось двух остальных (6 на рис. 1) была перпендикулярна оси первых. Геометрические и электрические параметры соленоидов, а именно: внешний (D) и внутренний (d) диаметры, длина (L), число витков (N) и диаметр намоточного провода (a), — приведены в таблице (рис. 1, а). Соленоиды 3 и 4 использовались для стабилизации и удержания катодного пятна на торцевой, рабочей, поверхности катода. В данной серии экспериментов токи этих соленоидов поддерживались в диапазоне 0.3–0.5 A в зависимости от тока соленоида 5 таким образом, чтобы обеспечить стабильное горение дуги. Соленоид 5 располагался вблизи области движения катодной струи и служил для

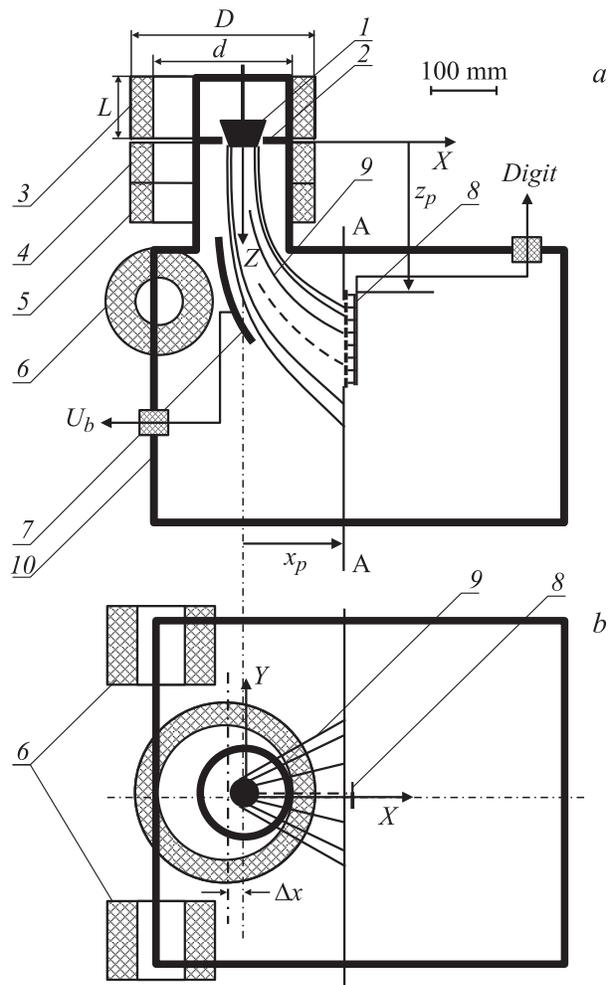


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: *a* — вид сверху, *b* — вид спереди. 1 — катод; 2 — анод; 3–6 — соленоиды магнитного поля; 7 — управляющий электрод; 8 — ленгмюровские зонды; 9 — силовые линии трубки магнитного поля, опирающейся на катод для токов соленоидов, равных 0.4, 0.5, 3.0, 1.4 А соответственно; 10 — вакуумный объем.

Геометрические и электрические параметры соленоидов магнитной системы

N	D, mm	d, mm	L, mm	N	a, mm
3	240	180	85	1570	1.25
4	240	180	55	1100	1.25
5	240	180	55	1100	1.20
6	145	65	110	1270	1.85

управления ее движением. Соленоиды 6 были включены навстречу друг другу и служили для дополнительного, независимым образом регулируемого, отклонения катодной струи в рабочей камере. Ток соленоидов 5 варьировался в диапазоне 1.5–3.0 А, токи соленоидов 6 — в диапазоне 1.0–2.0 А. Карта силовых линий магнитного поля соленоидов рассчитывалась на компьютере, расчетные данные сопоставлялись с результатами измерений поля в контрольных точках, при этом различие не превышало 15%.

В силу конструктивных особенностей установки ось катода была смещена относительно общей оси соленоидов 3, 4, 5 на величину $\Delta x = 30 \text{ mm}$ (рис. 1, б). Вследствие этого опирающаяся на рабочую поверхность катода трубка силовых линий суммарного магнитного поля оказывается искривленной вправо, так что в плоскости А–А, где регистрировалось распределение тока катодной струи, силовые линии трубки направлены под углами (60–90°) к первоначальному направлению (рис. 1, а). Соответственно, двигаясь вдоль этих силовых линий, таким же образом отклонялась катодная плазменная струя. Варьируя токи соленоидов, можно менять форму силовой трубки, вдоль которой движется струя, тем самым управляя транспортирующими свойствами магнитной системы. Следует отметить, что в данной геометрии магнитной системы величина поля существенно изменяется при движении плазмы от катода к области регистрации (плоскости А–А). Так, для типичных значений используемых в данном эксперименте токов соленоидов 3, 4, 5, 6, равных 0.4, 0.5, 3.0, 1.4 А соответственно, величина полного магнитного поля на силовой линии, проходящей через ось катода, вблизи него составляет около 20 мТ, а в плоскости А–А эта величина равна 2 мТ. Отсюда, полагая, что характерное значение температуры электронов в дуге не превышает 5 eV [7], находим оценку ларморовского радиуса электронов r_e на входе и выходе транспортирующей

системы, которая составляет 0,2 и 2 мм соответственно. Учитывая, что диаметр струи d_j в области катода близок к диаметру катода d_c , а в сечении А–А он составляет более 10 см, можно полагать, что условие замагниченности электронов $r_e \ll d_j$ с удовлетворительной точностью выполняется вдоль всей силовой трубки. При этом, поскольку для ионов во всем диапазоне токов соленоидов выполняется обратное неравенство $r_i \gg d_j$, их можно считать немагниченными. Таким образом, параметры описанной системы удовлетворяют условиям, необходимым для осуществления транспортировки катодной струи в магнитном поле [1].

Для выяснения возможностей управления параметрами катодного плазменного потока с помощью элементов плазмооптики в вакуумную камеру введен дополнительный управляющий электрод в виде изогнутой полосы, помещенный в области поворота плазменной струи (рис. 1, а). На электрод подавалось положительное смещение U_b от сильноточного источника.

В качестве метода диагностики использовалась подвижная линейка из восьми одинаковых лэнгмюровских зондов, на которые подавалось смещение -50 В, расположенная в среднем горизонтальном сечении рабочего объема на расстоянии $x_p = 110$ мм от оси катода (рис. 1). Таким образом, зонды измеряли распределение ионного тока насыщения на выходе транспортирующей системы вдоль горизонтального диаметра сечения катодной струи плоскостью А–А. Рабочая часть зондов представляла собой вольфрамовую проволочку длиной 6 мм и диаметром 1 мм. Сигналы зондов поступали на вход многоканального АЦП, после чего обрабатывались с помощью компьютера.

Результаты измерений распределения зондового ионного тока, т. е. профиля плазменной струи, для дуги с Al-катодом на выходе транспортирующей системы при фиксированном токе соленоида 5 и различных значениях тока соленоидов 6 представлены на рис. 2. В этих измерениях управляющий электрод был заземлен. На рис. 2 изображены также рассчитанные положения магнитной силовой трубки для этих же значений токов соленоидов. Из рисунка видно, что положение и ширина плазменной струи варьируются при изменении тока I_d соленоида 6. Кроме того, при увеличении I_d силовая трубка приближается к координатной плоскости XY ($z_1 > z_2$), при этом ширина силовой трубки уменьшается ($\Delta z_2 < \Delta z_1$). Сравнение с профилем плазменной струи показывает, что она ведет себя аналогичным образом. Отсюда можно заключить, что струя эффективно управляется данной магнитной системой.

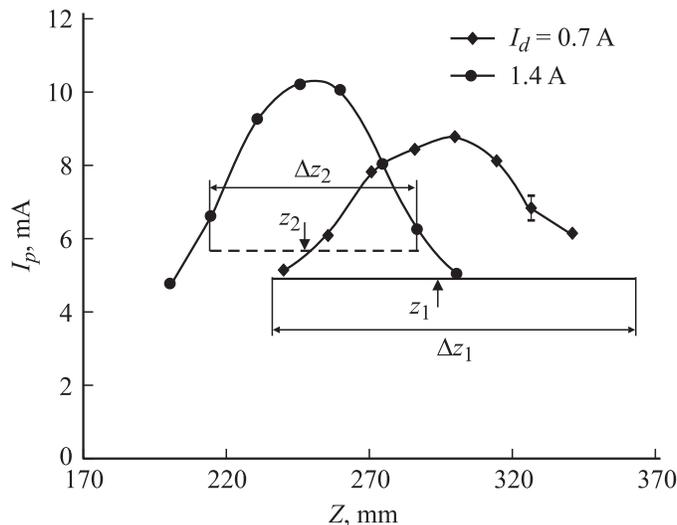


Рис. 2. Пространственные распределения ионного тока насыщения зондов вдоль поперечного сечения катодной струи в плоскости А–А (рис. 1) при токе соленоида 5, равном 1.6 А, для различных токов I_d соленоидов 6. Отрезками соответствующего типа линий изображены рассчитанные положения сечения А–А силовой трубки при тех же значениях I_d .

Далее были проведены измерения профиля плазменной струи в плоскости А–А для дуги с катодами из различных металлов (Al и Ti) при фиксированных значениях токов соленоидов и различных смещениях U_b на управляющем электроде. Было обнаружено, что при $U_b = 0$ профили струи совпадают в пределах точности измерений для обоих материалов катода. При подаче одинакового положительного смещения положения профилей различаются, причем максимальное различие для заданных токов соленоидов достигается при $U_b = +30$ V (рис. 3). Отсюда следует, во-первых, что положение плазменной струи на выходе транспортирующей системы зависит от величины смещения на управляющем электроде, следовательно, движением струи можно управлять методами плазмооптики. Во-вторых, плазменные струи с ионами разной массы ($m_{Al} = 27$ a.m.u., $m_{Ti} = 48$ a.m.u.) на выходе системы при одинаковых параметрах транспортирующей системы (токах

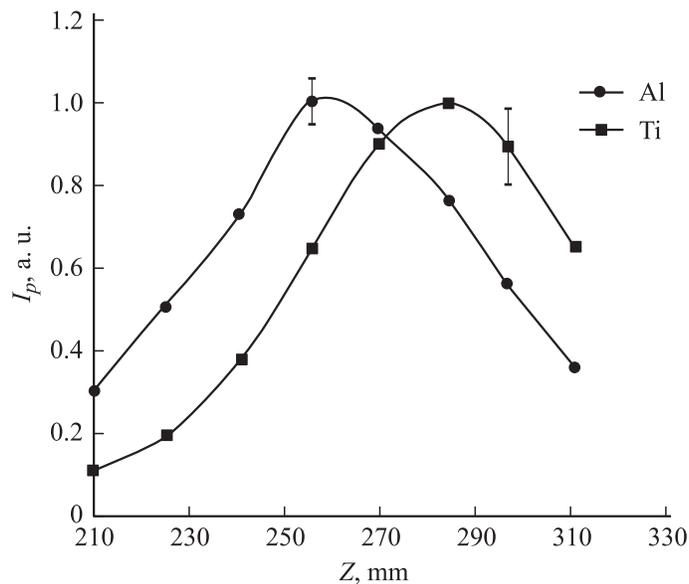


Рис. 3. Распределения зондового ионного тока насыщения в сечении катодной струи плоскостью $A-A$ для разных материалов катода (Al и Ti) при значениях как токов соленоидов 5 и 6 (2.5 и 1.4 А соответственно), так и смещения ($U_b = +30$ В), одинаковых для обоих материалов катода. Для удобства сравнения распределения нормированы на максимальные значения.

соленоидов и смещении на управляющем электроде) оказываются локализованы в разных областях. На основании этих результатов можно предположить, что если на вход системы подать плазменную струю, генерируемую композитным катодом сложного элементного или изотопного состава, то эта струя на выходе системы окажется пространственно разделенной на струи с ионами различной массы. Следовательно, такая транспортирующая система может быть, в принципе, использована для ионной масс-сепарации многокомпонентных потоков.

Эффективность масс-сепарации, полученную в данном эксперименте, можно оценить с помощью параметра $\mu = m/Z$, где в качестве заряда ионов используем средний заряд ионной компоненты \bar{Z} в плазме вакуумной дуги с соответствующим катодом: $\bar{Z}_{Al} = +1.7$; $\bar{Z}_{Ti} = +2.1$ [7].

Тогда, полагая, что на рис. 3 изображены разрешенные в пространстве профили плазменных струй с ионами Al и Ti, получим оценку разрешения $R = \mu/\Delta\mu \approx 3$. Реальное применение описанного метода для задач масс-сепарации, например изотопов какого-либо элемента, возможно лишь при существенном увеличении этого параметра, чего можно добиться, например, путем оптимизации параметров плазмооптической системы (геометрии электродов, распределения потенциалов на них и др.). Заметим также, что в данной сепарирующей системе управление плазменным потоком осуществляется через электронную компоненту магнитным полем относительно небольшой величины (≤ 20 мТ), при этом отсутствуют ограничения на ионный ларморовский радиус. В результате уровень энергозатрат на создание магнитного поля оказывается невысоким, в том числе и при работе с ионами массивных элементов.

Оценим также коэффициент прохождения данной транспортирующей системы плазменной струей. Для этого по данным рис. 2 определим величину полного ионного тока струи на выходе системы. Концентрацию плазмы n в сечении А–А можно оценить по сигналам зондов, что дает $n > 10^{11}$ см⁻³, следовательно, дебаевский радиус (менее $2 \cdot 10^{-3}$ см) мал по сравнению с диаметром зонда. Поэтому в качестве приемной поверхности зонда можно принять его продольное сечение площадью 6 мм². Предполагая далее, что сечение А–А струи представляет собой круг, диаметр которого на середине профиля плотности, как следует из рис. 2 (левая кривая), составляет 10 см, можно определить полный ионный ток струи в этом сечении I_{iA} . Оценка дает величину в диапазоне $I_{iA} = 5-6$ А в зависимости от предположения о распределении тока на периферии струи, где отсутствуют результаты зондовых измерений. С другой стороны, согласно приведенным в [8] данным, коэффициент ионной эрозии в дуге с Al-катодом составляет $\gamma = 22-25 \mu\text{g}/\text{C}$, откуда можно найти отношение ионного тока к полному току дуги [8] $\alpha_i = I_i/I = \gamma e \bar{Z}_{Al}/m_{Al} = 0.13-0.16$. Таким образом, ионный ток на входе транспортирующей системы составляет $I_i = 6.5-8$ А, а коэффициент прохождения системы $\eta = I_{iA}/I_i = 0.6-0.9$. Верхняя оценка превышает значения, достигаемые в традиционных транспортирующих системах с плазмоводами [5,6], однако при этом поперечный размер плазменной струи возрастает более чем в три раза.

Работа выполнена при поддержке ФЦП „Развитие потенциала высшей школы“, проект № 2.1.1/5955.

Список литературы

- [1] *Anders A.* Cathodic Arcs: From Fractal Spots to Energetic Condensation. New York: Springer, 2008. 543 p.
- [2] *Boxman R.L., Zhitomirsky V., Alterkop B.* et al. // Surf. Coat. Technol. 1996. V. 86–87. P. 243–247.
- [3] *Martin P.J., Bendavid A.* // Thin Solid Films. 2001. V. 394. P. 1–12.
- [4] *Аксенов И.И., Белоус В.А.* и др. // Физика плазмы. 1978. Т. 4. С. 425–430.
- [5] *Zhang T., Chu P.K., Brown I.G.* // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 80. P. 3700–3706.
- [6] *Zhang T., Chu P.K., Kwok D.T.K.* et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2002. V. 30. P. 1602–1609.
- [7] *Anders A., Yushkov G.Yu.* // J. Appl. Phys. 2002. V. 91. P. 4824–4829.
- [8] *Месяц Г.А.* Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. М.: Наука, 2000. 424 с.