УДК 536.212.2

ПРОЦЕССЫ МАССО – И ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ИОННЫХ ИСТОЧНИКАХ МЕТАЛЛОВ

¹Злобин В.Н., ¹Куш Л.Р., ²Зеляковский Д.В., ³Горбунова Н.Р.

¹ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет»,
Волгоград, e-mail: vlazlobin@yandex.ru;

²ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный аграрный университет», Волгоград,
e-mail: z.intersvet@yandex.ru;

³ЧУВО «Московский институт энергобезопасности и энергосбережения», Москва,
e-mail: ukplmiee@mail.ru

Рассмотрены основные свойства высоковольтного разряда Пеннинга, которые позволяют использовать его для создания источников ионов металлических элементов. Показано влияние процессов массо – и теплопереноса между электродами источника на параметры пучка, выходящего из источника ионов. Аналитическая оценка процессов, происходящих в разрядном промежутке и на электродах разряда, подтверждена экспериментами, проведенными на источнике ионов серебра. Показано, что в высоковольтном разряде Пеннинга при высоких давлениях можно получить давление паров металла, равное давлению рабочего инертного газа. Испаряясь с анода, рабочее вещество попадает на катоды, с которых катодное распыление переносит рабочее вещество снова на анод, одновременно ионизируясь электронными соударениями в разрядном промежутке. Этот процесс повышает коэффициент использования рабочего вещества.

Ключевые слова: ионный источник, нейтрали, разрядная камера, катодное распыление, плотность ионного тока

THE PROCESSES OF MASS – AND HEAT TRANSFER IN ION SOURCES OF METALS

¹Zlobin V.N., ¹Kusch L.P., ²Zelyakovskiy D.V., ³Gorbunova N.R.

¹FGBOU VPO «Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering»,
Volgograd, e-mail: vlazlobin@yandex.ru;

²FGBOU VPO «Volgograd state agrarian University», Volgograd, e-mail: z.intersvet@yandex.ru;

³CHUVA «Moscow Institute of energy safety and energy saving», Moscow, e-mail: ukplmiee@mail.ru

The main properties of high-voltage penning discharge, which make a major contribution to use it to create a source of ions of metallic elements. The influence of processes of mass – and heat transfer between the electrodes of the source on parameters of the beam emerging from the ion source. Analytical evaluation of the processes occurring in the discharge gap and the electrodes of the discharge is confirmed by the experiments conducted on the source of silver ions. It is shown that in the high-voltage penning discharge at high pressures is possible to obtain the vapour pressure of the metal is equal to the pressure inert gas. Evaporating from the anode of the working substance falls on the cathode, from which cathode sputtering takes working substance back to the anode, while ionizers electron collisions in the discharge gap. This process improves the utilization ratio of the working substance.

Keywords: cathodic spraying, heat transfer, ion source, Penning discharge, regeneration of metal

Для создания технологических источников ионных металлов используется высоковольтный разряд Пеннинга [1, 2]. Основным свойством разряда является наличие катодной и анодной темных областей, разделенных светящимся облаком квазинейтральной плазмы. В темных областях разряда происходит основное падение приложенного напряжения. Величина катодного падения напряжения может составлять более половины разрядного напряжения, остальная часть которого приложена к анодной области, причем абсолютная величина катодного падения может достигать 5...7 кВ. При этом, значительная часть мощности разряда выделяется на аноде, разогревая его до высокой температуры.

Подбором режима разряда можно поддерживать температуру электродов на уровне, при котором можно получать заданное давление паров рабочего вещества. До-

полнительное количество паров рабочего вещества вносится в разряд с катодов, армированных материалом анода, вследствие их интенсивного распыления ионами. Кроме паров заданного металла в состав рабочих паров входит инертный газ, служащий для вывода ионного источника на рабочий режим. Парциальное давление инертного газа в источнике обычно равно или меньше парциального давления паров металла. Пары металла и газ ионизируются в разряде соударениями с электронами и в виде положительных ионов извлекаются через эмиссионное отверстие в катод [3, 4].

Термодинамика катодного распыления в ионном источнике. Будем считать, что электроды разрядной камеры ионного источника – катоды и анод – нагреты до температуры T . В одном из катодов имеется эмиссионное отверстие с площадью S_0 . Если

пренебречь процессом испарения рабочего металла и принять коэффициент конденсации металла на распыляемом электроде, равным единице, то уравнение баланса частиц распыляемого рабочего материала получим в виде [1]:

$$\frac{\rho \cdot I_+}{e} = n \cdot \left(\frac{k \cdot T}{2 \cdot \pi \cdot M} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot S + n \cdot \left(\frac{k \cdot T}{2 \cdot \pi \cdot M} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot S_0 + \frac{I_{+0}}{e}, \quad (1)$$

где n – концентрация атомов металла в камере, ед./м³;

I_+ – ток ионов на распыляемый электрод (катод), А;

ρ – коэффициент катодного распыления, ед./ион;

S – площадь катода, которая подвергается катодному распылению, м²;

I_{+0} – поток ионов распыленного металла через отверстие эмиссии, А/м²;

k – постоянная Больцмана;

M – атомный вес рабочего вещества, а.е.м.;

e – заряд электрона, Кл;

T – температура электродов, К.

Левая часть уравнения соответствует количеству частиц, поступающих в разрядный промежуток с катодов за счет их распыления ионами рабочего вещества и инертного газа, а также за счет испарения материала с внутренней поверхности разогретого анода.

Правая часть представляет собой сумму количества частиц, оседаемых на поверхность катода в виде нейтралей и проходящих через отверстие эмиссии в виде нейтралей и ионов.

Так как коэффициент использования вещества у таких ионных источников значительно меньше единицы, то через эмиссионное отверстие поток молекул намного больше потока ионов:

$$n \cdot \left(\frac{k \cdot T}{2 \cdot \pi \cdot M} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot S_0 \gg \frac{I_{+0}}{e}, \quad (2)$$

Выражая плотность ионного тока $J_+ = \frac{I_+}{S}$ получаем из (1):

$$n = \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot M}{k \cdot T} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{S}{S + S_0} \cdot \rho \cdot \frac{J_+}{e}, \quad (3)$$

Если $S \gg S_0$, то

$$n = \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot M}{k \cdot T} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \rho \cdot \frac{J_+}{e}. \quad (4)$$

Таким образом, в высоковольтном разряде высокого давления за счет катодного распыления создается значительная концентрация паров рабочего металла, достаточная для поддержания режима разряда с заданным ионным током рабочего вещества на выходе ионного источника [5, 6].

Теплопередача между электродами ионного источника. В ионном источнике рабочая температура анода поддерживается на заданном уровне путем регулирования мощности, рассеиваемой на аноде электронами.

Электрическая мощность, которую необходимо подводить к аноду источника ионов для поддержания постоянной его температуры в стационарном режиме, теряется за счет лучеиспускания (Q_1) и за счет теплопроводности через держатели анода (Q_2).

Мощность, теряемая за счет лучеиспускания, состоит из мощности рассеиваемой наружной поверхностью анода и некоторой доли мощности, рассеиваемой его внутренней поверхностью. Доля мощности, рассеиваемая внутренней поверхностью, может быть определена по формуле А.И. Ансельма [2]:

$$q_a = \frac{Q_{\text{внут}}}{Q_{\text{нар}}} = \sqrt{1 + \left(\frac{h}{d} \right)^2} - \frac{h}{d}, \quad (5)$$

где h и d – длина и внутренний диаметр анодного цилиндра.

Полная мощность, теряемая анодом на излучение, запишется в виде:

$$Q_1 = \eta \cdot \pi \cdot d \cdot h \cdot (1 + q_a), \quad (6)$$

где η – удельная мощность излучения поверхности анода при рабочей температуре.

Мощность, теряемая за счет теплоотвода по держателям анода, определяется выражением:

$$Q_2 = n \cdot \lambda \cdot f \cdot \frac{\Delta T}{l_d}, \quad (7)$$

где n – число держателей;

λ – коэффициент теплопроводности материала держателя;

f – площадь сечения держателя;

l_d – длина держателя;

ΔT – разность температур держателя.

Таким образом, полная мощность, теряемая анодом, определяется выражением:

$$Q_0 = I \cdot U = Q_{\text{нар}} \cdot (1 + q_a) + Q_2 = \eta \cdot \pi \cdot d \cdot h \cdot (1 + q_a) + n \cdot \lambda \cdot f \cdot \frac{\Delta T}{l_d}, \quad (8)$$

Эта мощность должна подводиться к аноду путем электронной бомбардировки его внутренней поверхности.

Величины, входящие в выражение (8), должны учитываться при выборе материалов электродов и конфигурации разрядного промежутка.

Наименование детали	Вес до эксперимента, г	Вес после эксперимента, г	Разность в весе Δm , г
Анод	15,4459	15,3069	-0,139
Катод 1	74,0185	74,0482	+0,0297
Катод 2	69,8164	69,8383	+0,0219
Держатель анода	12,6559	12,6584	+0,0035
Кольцо	76,7458	76,7528	+0,0070
Болты	1,5489	1,5505	+0,0016
Стекло	67,3109	67,3792	+0,0683
Держатель катода 1	41,1431	41,1442	+0,0011
Держатель катода 2	45,6553	45,6560	+0,0007

Экспериментальная оценка баланса частиц в ионном источнике. Известно, что коэффициент использования рабочего вещества в ионных источниках меньше единицы [3]. Это объясняется низким коэффициентом ионизации рабочего вещества в рабочей камере и тем, что рабочее вещество частично теряется на более холодных, по сравнению с анодом, внутренних деталях разрядной камеры.

Для оценки баланса частиц в ионном источнике серебра было проведено взвешивание деталей источника до и после работы. Источник работал в режиме: напряжение разряда – 5 кВ, ток разряда – 12 мА, давление в системе $933,1 \cdot 10^{-4}$ Па, температура анода – 1000 °К, ток на выходе источника – 1000 мкА при напряжении экстракции 1 кВ.

Время работы $t = 5,76 \cdot 10^3$ сек. Полученные в результате эксперимента данные приведены в таблице.

Из таблицы видно, что вес анода уменьшился на $\Delta m = 0,139$ г, а вес всех остальных деталей увеличился на 0,1342 г. Считая ионы серебра однозарядными, можно сравнить их вес с разностью весов анода и всех остальных деталей.

Число ионов, выходящих из источника за секунду, c^{-1} :

$$n = \frac{\Delta m \cdot N_A}{t \cdot M}, \quad (9)$$

где Δm – разность веса анода до и после процесса легирования, г;

M – массовый вес серебра (молярная масса), г/моль;

N – число Авогадро, моль $^{-1}$.

$$n = \frac{0,139 \cdot 6,022 \cdot 10^{23}}{5,76 \cdot 10^3 \cdot 107,868} = 1,35 \cdot 10^{14}$$

Это соответствует величине выходного ионного тока, А:

$$I_{\text{вых}} = n \cdot e \quad (10)$$

$$I_{\text{вых}} = 1,35 \cdot 10^{14} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 2,2 \cdot 10^{-5}$$

Согласно экспериментальным данным ионный ток на выходе источника составляет примерно 1 мА. Можно предположить, что

остальное количество ионов получается за счет ионизации материала катодов и инертного газа в источнике [6].

Выводы

При рассмотрении процессов, происходящих на электродах ионного источника, покрытых серебром, оказалось, что на внутренней поверхности анода имеется серебряная пленка, которая может быть от него отделена. Тот же эффект обнаружен на катодах источника. Это явление показывает, что в ионном источнике металлов происходит регенерация рабочего вещества. Испаряясь с анода, рабочее вещество попадает на катоды, с которых катодное распыление переносит рабочее вещество снова на анод, одновременно ионизируясь электронными соударениями в разрядном промежутке. Этот процесс повышает коэффициент использования рабочего вещества. Нейтрали рабочего материала, выходящие через эмиссионное отверстие покрывают обрабатываемую деталь пленкой, которая защищает структуру детали от разрушения, особенно в случае легирования многокомпонентных систем со слабой энергией связи между ними.

Список литературы

1. Злобин В.Н. Источник ионов для технологических установок / В.Н. Злобин, И.П. Васильев, В.В. Лукин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. – 2005. – № 4 (14). – С. 45–48.
2. Злобин В.Н. Особенности работы источника ионов установки ионной имплантации / В.Н. Злобин, А.В. Зотов, В.И. Васильев // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту імені Володимира Дала. – 2002. – № 11 (57). – С. 137–142.
3. Злобин В.Н. Использование ионной имплантации в двигателестроении / В.Н. Злобин, И.П. Васильев, Д.В. Зеляковский // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 7. – С. 707–711.
4. Пат. № 2010113619/02(019203) Рос. Федерация: МПК: С23С 14/46 Установка для нанесения покрытий / Куш Л.Р., Злобин В.Н., Кляхина Н.А., Фокин В.М. заявл. 07.04.2010; опубл. 27.09.2010 – 3 с.
5. Куш Л.Р., Злобин В.Н., Фокин В.М. Использование корпускулярного легирования для совершенствования горелочных устройств при сжигании газообразных топлив – Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. – Волгоград: Изд-во ВолГАСУ, 2008. – Вып. 9 (28). – С. 116–118.
6. Куш Л.Р., Злобин В.Н., Фокин В.М. Применение корпускулярного легирования в теплогенерирующих установках. – Инновации в науке и образовании: тр. VI юбилейной междунар. науч. конф., посвящ. 50-летию пребывания КГТУ на Калининградской земле, 21-23 октября – Калининград: Изд-во КГТУ, 2008. – Ч. I. – С. 209–211.