

04;12

Определение удельной ионной эрозии катода вакуумной дуги на основе измерения полного ионного тока из разрядной плазмы

© А. Андерс,¹ Е.М. Окс,² Г.Ю. Юшков,² К.П. Савкин,² Я. Браун,¹ А.Г. Николаев²¹ Lawrence Berkeley National Laboratory University of California, Berkeley, California, USA² Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055 Томск, Россия
e-mail: savkin@opee.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 13 февраля 2006 г.)

Представлены результаты определения удельной ионной эрозии катода γ_i на основе измерения полного ионного тока из плазмы вакуумной дуги для материалов: C, Mg, Al, Ti, Co, Cu, Y, Mo, Cd, Sm, Ta, W, Pt, Pb, Bi. Показано, что в токе вакуумного дугового разряда α_i изменяется от 5 до 19%, в зависимости от катодного материала. Экспериментально обнаружена обратная зависимость между долей ионного тока α_i и энергией связи атомов материала катода. Установлено, что создание внешнего магнитного поля в катодной области разряда приводит к увеличению извлекаемого из плазмы разряда полного ионного тока только за счет появления в плазме ионов с более высокими зарядовыми состояниями, при этом значение удельной ионной эрозии γ_i остается постоянной величиной.

PACS: 82.45.Fk, 52.80.Vp

Введение

Основные методические трудности экспериментально-исследования катодных процессов вакуумного дугового разряда связаны с его физическими особенностями. Действительно, все основные процессы испарения и ионизации материала катода сосредоточены в катодных пятнах — нестационарных плазменных образованиях, быстро перемещающихся по поверхности катода и окруженных плотной плазмой с концентрацией свыше 10^{20} cm^{-3} . Характерный пространственный масштаб катодного пятна — доли микрометра, временной масштаб их существования — десятки наносекунд [1]. Ввиду исключительной экспериментальной сложности исследования параметров плазмы в самом катодном пятне перспективным методом является изучение продуктов взрывной эмиссии, эмитированных катодным пятном, и восстановление из этих данных динамики процесса их функционирования. Указанный подход, названный нами эмиссионным методом, был продемонстрирован на примере исследования зарядовых состояний и скоростей ионного компонента плазмы вакуумной дуги [2].

Одной из принципиальных задач дальнейшего исследования физики катодных процессов вакуумного дугового разряда является точное определение количества катодного материала, трансформировавшегося в разряде из твердотельной фазы в плазменную. Оно характеризуется удельной ионной эрозией γ_i , параметром равным отношению произведения атомной массы материала катода M_i на число ионов N_i к количеству перенесенного вакуумным дуговым разрядом электрического заряда q :

$$\gamma_i = \frac{N_i M_i}{q}. \quad (1)$$

В результате несложных действий данное выражение можно преобразовать к следующему виду:

$$\gamma_i = \alpha_i \frac{M_i}{\bar{Q}_i}, \quad (2)$$

где M_i — атомная масса материала катода, \bar{Q}_i — средняя зарядность ионов плазмы данного материала, e — заряд электрона, а символ α_i характеризует полный ионный ток I_i , нормированный на ток разряда I_d :

$$\alpha_i = \frac{I_i}{I_d}. \quad (3)$$

Исследования по определению удельной ионной эрозии, выполненные ранее Кимблиным [3], проводились с использованием разрядной системы из плоскопараллельных катода и анода, окруженных цилиндрическим экраном, выполнявшим функцию коллектора ионов. Вакуумный дуговой разряд функционировал с амплитудой тока до нескольких сотен ампер в непрерывном режиме. Длительность единичного цикла воздействия дуги на катод составляла единицы секунд, при полном временном цикле от десяти до нескольких сотен секунд. Для измерения полной катодной эрозии применялся метод определения массы израсходованного материала путем взвешивания катода до и после воздействия на него разряда. Степень эрозии определялась по соотношению

$$g = \frac{\Delta m}{q}, \quad (4)$$

где Δm — расход катодного материала, а $q = \int I_{\text{arc}}(t) dt$ — перенесенный заряд. Очевидно, что при помощи подобных методов не представлялось возможным оценить долю ионов в катодной плазме, участвующих в процессе переноса массы материала, поскольку

наряду с ионами катодный материал расходуется в виде микрокапельной фракции. Именно возрастание катодной эрозии с увеличением количества заряда, перенесенного вакуумной дугой, замеченное впоследствии Даалдером [4], было интерпретировано в работах [5,6] как рост доли микрокапельной фракции в процессах переноса катодного материала. Это было связано с увеличением температуры катода при росте количества перенесенного разрядом электрического заряда. Предположение о совпадении значений полной катодной g и удельной ионной γ_i эрозий при низких токах (десятки ампер) и малых длительностях вакуумного дугового разряда [4] оказывалось в достаточной степени условным, так как впоследствии Г. А. Месяцем [1] было показано, что именно в процессе отрыва капли от струи жидкого металла происходит образование нового эмиссионного центра катодного пятна.

Другим принципиальным моментом измерения удельной ионной эрозии по эмитированному ионному току с использованием плоскопараллельной геометрии электродов [3] является некорректность предположения об изотропном пространственно-угловом распределении ионного потока из катодных пятен. В более поздних работах [7] было показано, что степень анизотропии распределения определяется в основном материалом катода и тем больше, чем выше температура плавления катодного материала. Именно это делает невозможным расчет полного ионного тока исходя из измерения части ионов, эмитированных в пределах заданного телесного угла.

Настоящая работа посвящена определению удельной ионной эрозии материала катода γ_i из катодных пятен в вакуумном дуговом разряде методом измерения доли ионного тока на основе разрядной системы, позволяющей регистрировать полный ионный ток из катодной плазмы. Следует особо отметить, что полученные значения γ_i характеризуют отношение расхода массы материала катода в виде ионов к количеству заряда, перенесенного в результате функционирования вакуумной дуги, независимо от эмиссии микрокапельной фракции или углового распределения ионного потока из катодных пятен.

Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования удельной ионной эрозии материала катода вакуумного дугового разряда осуществлялись с применением разрядной системы, схематически представленной на рис. 1. Для инициирования катодных пятен на рабочей поверхности катода использовался вспомогательный разряд по торцевой поверхности керамической трубки между катодом 2 и коаксиальным ему, охватывающим керамику, инициирующим электродом 3. При заполнении плазмой вспомогательного разряда основного разрядного промежутка, образованного анодом 1 и катодом 2, происходил его

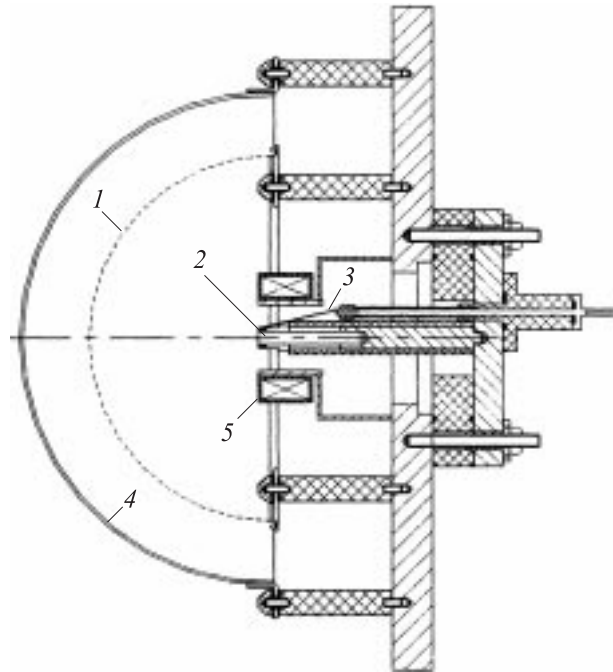


Рис. 1. Конструкция диагностической разрядной системы.

пробой, приводивший к возникновению на торцевой поверхности электрода 2 катодных пятен вакуумного дугового разряда. Длительность функционирования разряда определялась параметрами источника питания на основе искусственной формирующей линии и составляла $500 \mu\text{s}$ при токе амплитудой до 500 А. Источником питания цепи инициирующего разряда служила батарея конденсаторов с регулируемой емкостью от 1 до $25 \mu\text{F}$, разряжаемая через повышающий трансформатор, обеспечивающий импульсы напряжения амплитудой от 0.5 до 2.5 kV. Вакуумная откачка производилась криосорбционным насосом с обеспечением остаточного давления до 10^{-7} Торг.

Для проведения измерений ионного тока с необходимым учетом азимутального распределения плазменного потока из катодных пятен вакуумной дуги сеточный анод 1 с прозрачностью сетки $\eta = 0.72$ и коллектор ионов 4 были выполнены в виде полусфер, причем рабочая поверхность катода 2 размещалась в центре полусфер. Между заземленным сеточным анодом и коллектором прикладывалось стабилизированное постоянное напряжение, извлекавшее ионы на коллектор и препятствовавшее попаданию на него плазменных электронов. Напряжение 100 В было достаточно, с одной стороны, чтобы наблюдалось насыщение ионного тока в широком диапазоне токов вакуумного дугового разряда, а с другой — чтобы электроны, эмитированные в результате вторичной ионно-электронной эмиссии, не вносили существенных искажений в измерения ионного тока. Для исследования влияния внешнего магнитного поля на функционирование вакуумного дугового разряда в ряде экспериментов в катодной области магнитное поле

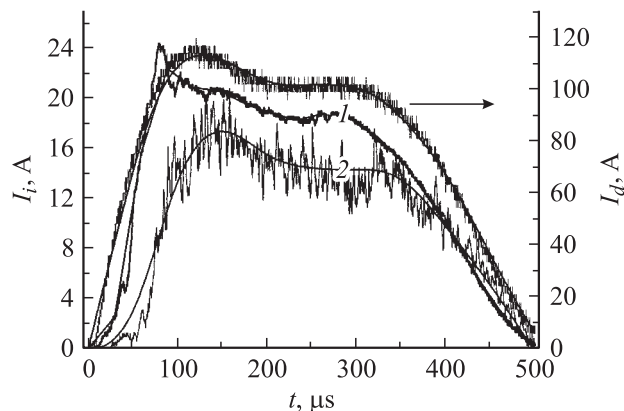


Рис. 2. Типичные осциллограммы импульсов тока вакуумного дугового разряда и ионных токов коллектора (с учетом прозрачности анодной сетки 0.72%). Ток ионов: 1 — углерода, 2 — меди.

индукцией до 1 Т создавалось магнитной катушкой 5 при пропускании через нее импульсов тока амплитудой до 1 кА и длительностью 1 мс от отдельного источника питания. Для измерения параметров разрядов и ионного тока коллектора использовались пояса Роговского и высокоомные делители напряжения. Сигналы импульсов тока инициирующего и вакуумного дугового разрядов, а также ионного тока в цепи коллектора, регистрировались при помощи цифрового осциллографа Tektronix TDS 224. Анализ результатов исследований производился на основе усреднения многократных измерений. Осциллограммы ионного тока (рис. 2) повторяют форму разрядного тока, что косвенно свидетельствует о корректности измерений. Временной сдвиг импульсов ионного тока I_i относительно импульсов тока дуги I_d обусловлен временем пролета ионов из катодной области к коллектору [2]. Согласно проведенным оценкам, относительная погрешность измерения амплитуды ионного тока составляла не более 15% независимо от высокочастотных флуктуаций параметров разрядной плазмы, определяемых хаотическими процессами функционирования катодных пятен.

Измерение полного ионного тока

В качестве модельных материалов для исследования были выбраны 14 металлов с различными физическими свойствами: Mg, Al, Ti, Co, Cu, Y, Mo, Cd, Sm, Ta, W, Pt, Pb, Bi, а также графит. Определение α_i производилось по методу регистрации полного потока ионов из разрядной плазмы для указанных материалов катодов с использованием диагностической разрядной системы (рис. 1). Экспериментально измеренные зависимости ионного тока от величины тока разряда для некоторых материалов катодов приведены на рис. 3. Линейный характер зависимостей свидетельствует о том, что доля ионов, переносящих заряд в сторону анода в вакуумном

дуговом разряде, постоянна для каждого материала. Кроме того, различная степень крутизны характеристик извлечения ионов указывает на очевидные отличия ионно-эмиссионной способности катодной плазмы разных материалов. Очевидное несовпадение долей ионного тока α_i может определяться физическими свойствами модельного материала катода. В качестве параметра, характеризующего твердотельные физические свойства, по которому можно систематизировать данные о максимальном ионном токе, может выступать энергия связи атомов материала катода E_{ce} , подобно полученному ранее полуэмпирическому „закону энергии связи“ [8] для напряжения горения вакуумной дуги.

Значения нормированного ионного тока α_i и энергии связи E_{ce} для ряда материалов, расположенных вдоль оси абсцисс в порядке возрастания их атомной массы, представлены на рис. 4. Из анализа представленных зависимостей следует, что из плазмы металла, обладающего большей энергией, необходимой для осуществления перехода атома данного вещества из твердого состояния

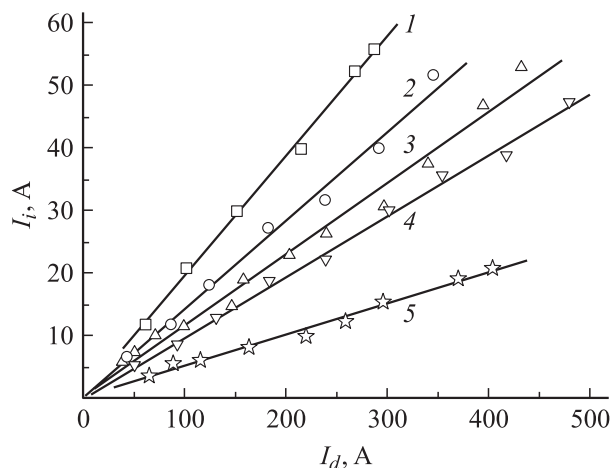


Рис. 3. Эмиссионные характеристики, полученные с использованием различных материалов катода: 1 — графит, 2 — свинец, 3 — медь, 4 — титан, 5 — вольфрам.

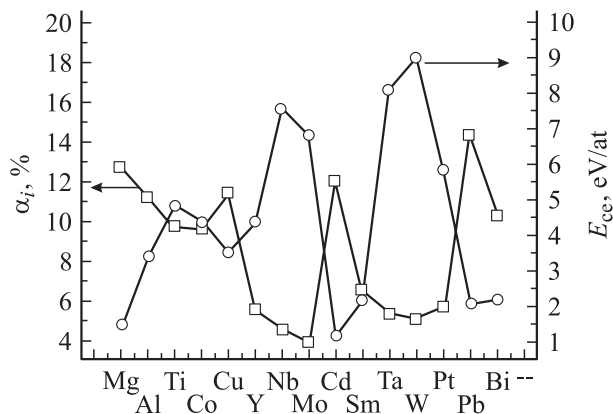


Рис. 4. Зависимость нормированного ионного тока α_i и энергии связи атомов E_{ce} от атомной массы материала катода.

Таблица 1. Результаты определения полного ионного тока α_i и удельной ионной эрозии γ_i

Материал катода	Экспериментальные результаты		Kimblin C. [3]	Месяц Г.А. [5]	Daalder J. [4]
	α_i , %	γ_i 10^{-9} kg/C	α_i , %	γ_i , 10^{-9} kg/C	
C	19	23.8	10	16–17	–
Mg	12.7	18.8	–	25	15
Al	11.2	15.9	–	25	15
Ti	9.7	22.4	8	–	–
Co	9.6	30.4	8	–	–
Cu	11.4	33.4	–	35–40	–
Y	5.5	21	–	–	–
Mo	3.8	11.6	–	47	–
Cd	12	94.6	8	130	79.1
Sm	6.5	46.1	–	–	–
Ta	5.3	31.2	–	–	59
W	5	27.1	7	62	57
Pt	5.6	50.6	–	–	–
Pb	14.3	172.8	–	–	120.8
Bi	10.2	171.5	–	–	168

в паровую фазу, извлекается меньшее количество ионов при заданном токе вакуумной дуги. Так, например, для вольфрама энергия связи составляет 8.99 eV/at при нормированном ионном токе 5%, в то время как доля ионного тока из плазмы вакуумной дуги со свинцовым катодом составляет 14.3% при энергии связи для свинца $E_{св} = 2.03$ eV/at.

Определение удельной ионной эрозии

Определение значений α_i с учетом геометрической прозрачности анодной сетки η при измеренном зарядовом составе позволило определить коэффициенты удельной ионной эрозии γ_i , характеризующие расход материала катода в виде ионов без учета переноса массы в виде нейтральных микрокапель:

$$\gamma_i = \left(\frac{I_i}{\eta I_d} \right) \frac{M_i}{e \langle Q \rangle}, \quad (5)$$

где выражение, заключенное в скобки, есть нормированный ионный ток α_i . Полученные значения α_i и γ_i в сравнении с результатами других работ [3–5] представлены в табл. 1.

Очевидное отличие долей ионного тока α_i , измеренных в ходе экспериментов, от значений, опубликованных в [3], для одних и тех же материалов в основном обусловлено конструкцией вакуумно-дуговой разрядной диагностической системы, позволяющей в настоящей работе регистрировать ионные потоки, направленные под любым углом к поверхности катода. Это, в свою очередь, повлияло на отличие коэффициентов удельной ионной эрозии от представленных в [4,5], поскольку осуществляемое при помощи выражения (5) определение γ_i

производится независимо от эрозии катодного материала в виде микрокапель. И, кроме того, значения средних зарядностей ионов, необходимых для вычисления удельной ионной эрозии, измерялись в идентичных условиях функционирования вакуумного дугового разряда [2].

Влияние магнитного поля на полный ионный ток

Одним из эффективных методов повышения доли ионного тока, отбираемого из плазмы вакуумной дуги, является создание магнитного поля в катодной области разряда. Относительно слабые магнитные поля (~ 10 мТ) приводят к фокусировке плазменного потока, дальнейшее увеличение магнитного поля ведет к увеличению зарядности ионов [9]. Оба явления сопровождаются увеличением извлекаемого ионного тока, и в связи с этим возникает вопрос о возможном увеличении расхода катодного материала в виде ионов. Однако одновременное влияние двух факторов (фокусировки плазменного потока и увеличения зарядности ионов) не позволяло ранее однозначно определить степень влияния магнитного поля на ионную эрозию катода. В условиях настоящего эксперимента электроды разрядной системы и каркас магнитной катушки не создавали геометрической „тени“ для ионного потока, тем самым исключалось влияние фокусировки плазменного факела при малых значениях магнитного поля на извлекаемый ионный ток. При достижении индукции магнитного поля в катодной области разряда 0.45–0.5 Т, доля ионного тока α_i достигала максимального значения при использовании всех материалов катода, что означало выход эффекта влияния магнитного поля на увеличение зарядности в насыщение [9]. Вместе с тем максимальные значения отношения долей ионного тока в присутствии и в отсутствие магнитного поля практически совпадают со значениями отношений средних зарядностей ионов при тех же условиях (в табл. 2 представлено их сопоставление для некоторых материалов). Заслуживает внимания тот факт, что при одинаковой кратности роста ионного тока и зарядности ионов значения удельной ионной эрозии γ_i , характеризующие отношение массы катодного вещества, израсходованного в виде ионов, к перенесенному заряду, согласно (5), остаются постоянными. Таким образом, возрастание ионного тока, извлекаемого из плазмы вакуумного дугового разряда, обусловлено

Таблица 2. Отношение нормированных ионных токов

Материал катода	Максимальное отношение нормированных ионных токов (α_{im}/α_{i0})	Отношение средних зарядностей ионов ($\langle Q \rangle_{im}/\langle Q \rangle_{i0}$)
C	2.05	1.8
Al	1.4	1.3
Cu	1.66	1.5
Pt	1.66	1.7

лишь увеличением зарядности ионов при неизменном переносе массы материала катода в виде заряженной компоненты.

Заключение

В результате исследования определены значения удельной ионной эрозии катода для ряда материалов. Установлено существование обратной зависимости между долей ионного тока в полном токе вакуумной дуги и энергией связи атомов для использовавшихся материалов катода. Экспериментально доказано отсутствие влияния внешнего магнитного поля на ионную эрозию катодного материала. На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что удельная ионная эрозия исследованных катодных материалов является постоянной в широком диапазоне токов вакуумной дуги и не зависит от внешнего магнитного поля.

Данная работа частично поддержана грантом РФФИ No 05-02-16256a.

Список литературы

- [1] *Месяц Г.А.* Эктонны в вакуумном дуговом разряде: пробой, искра, дуга. М.: Наука, 2000. 424 с.
- [2] *Бугаев А.С., Гушенец В.И., Юшков Г.Ю.* и др. // Изв. вузов. Физика. 2001. № 9. С. 15–22.
- [3] *Kimblin C.W.* // J. Appl. Phys. 1973. Vol. 44. P. 3074–3081.
- [4] *Daalder J.E.* // J. Phys. D. Appl. Phys. 1975. Vol. 8. P. 1647–1659.
- [5] *Месяц Г.А., Баренгольц С.А.* // УФН. 2002. Т. 172. № 10. С. 1113–1130.
- [6] *Eckhardt G.J.* // Appl. Phys. 1975. Vol. 46. P. 3282.
- [7] *Anders A., Yushkov G.Yu.* // Appl. Phys. Lett. 2002. N 14. P. 2457–2459.
- [8] *Anders A.* Book Emerging Applications of Vacuum-Arc-produced Plasma, Ion and Electron beams / Ed. by E.M. Oks, J.G. Brown. Amsterdam: Kluwer Academic Publishers, 2002. P. 1–15.
- [9] *Николаев А.Г., Окс Е.М., Юшков Г.Ю.* // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 5. С. 39–43.