

Измерения температуры поверхности катода сильноточной вакуумной дуги с малой длительностью импульса

*А.Г. Николаев**, *А.В. Никоненко*, *В.П. Фролова*, *В.Д. Гридилев*, *Г.Ю. Юшков*

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

**nik@opee.hcei.tsc.ru*

Аннотация. В работе представлены эксперименты по измерениям температуры поверхности катода сильноточной вакуумной дуги с короткой длительностью импульса около 1 мкс и с амплитудой тока уровня нескольких килоампер. Использование вакуумной дуги с такими параметрами позволяет получать в дуговой плазме ионы металлов высоких зарядовых состояний 10⁺ и выше. Измерения проводились с помощью быстродействующего инфракрасного бесконтактного пирометра с диапазоном измерений температуры (350–3500) °С. Были исследованы катоды из углерода, магния, титана, меди, циркония, ниобия, молибдена, серебра, олова, лантана, гадолиния и свинца. Эти материалы катодов различаются между собой и имеют широкий диапазон физических свойств, таких как атомная масса, температура плавления, теплоемкость и теплопроводность и др. Было показано, что при увеличении тока импульса дуги с уровня (150–300) А до (3–3.4) кА максимальная температура поверхности катодов увеличивается со значений (370–380) °С в 1.5–3 раза, в зависимости от свойств материала катода. Значение этой температуры при токе дуги 3 кА может различаться от 600 °С, для титана, до 1100 °С, для гадолиния.

Ключевые слова: вакуумный дуговой разряд, многозарядные ионы, пирометр, температура катода.

1. Введение

Увеличение зарядовых состояний ионов плазмы вакуумной дуги является одной из актуальных проблем развития ионных источников такого типа, поскольку позволяет увеличить энергию в извлекаемом пучке без соответствующего повышения ускоряющего напряжения. При решении задач ионно-пучковой модификации свойств поверхности [1–3], это может существенно расширить технологические возможности ионных источников. Если в типичном вакуумном дуговом ионном источнике без специальных мер для повышения зарядовых состояний ионов, функционирующем при амплитуде импульса тока дуги уровня сотен ампер при субмиллисекундной длительности импульса [4], средняя зарядность ионов металлов в ионном пучке при использовании любых материалов катодов, не превышает значения 3⁺ [4, 5], то использование методов увеличения зарядности [6–9] позволяеткратно повышать эту величину [10]. Это дает возможность при ускоряющем напряжении уровня десятков киловольт значительно увеличивать энергию ионов в пучке источника.

Использование сильноточной дуги с килоамперным диапазоном амплитуды тока длительностью импульса около 1 мкс [10, 11] является простым и эффективным методом достижения высокой зарядности ионов в вакуумной дуговой плазме ионного источника. Поскольку при этом к разрядному промежутку прикладывается напряжение уровня (10–15) кВ, то импульсная мощность, выделяемая в таком разряде, может достигать уровня 10 МВт, что может приводить к расплавлению поверхности катода в течении разрядного импульса [10]. Это делает актуальным вопрос измерения температуры поверхности катода в течение импульса. В данной работе впервые представлены эксперименты по измерениям температуры поверхности катодов, изготовленных из материалов, имеющих широкий диапазон физических свойств, при функционировании вакуумной дуги с такими параметрами. Результаты данных исследований вносят вклад в понимание особенностей работы сильноточного вакуумного разряда субмикросекундной длительности импульса с катодами из различных материалов.

2. Экспериментальное оборудование.

Схема экспериментальной установки, используемой для измерения температуры поверхности катода при работе сильноточного вакуумного дугового разряда приведена на рис. 1. Цилиндрический катод вакуумной дуги *1* диаметром 6.3 мм и длиной 35 мм из исследуемого материала находился внутри системы инициирования *2*, которая состояла из керамического изолятора диаметром 12 мм, на торце которого располагался кольцевой анод поджигающего разряда. Катодный узел монтировался на высоковольтном низкоиндуктивном вакуумном вводе *3*. Ввод *3* размещался на одном из торцов крестообразной вакуумной камеры *4*. Вакуумная камера откачивалась криогенным насосом через патрубок *5* до рабочего давления уровня 10^{-6} Торр. Вакуумный дуговой разряд формировался между катодом *1* и кольцевым анодом *6*, расположенным на расстоянии 50 мм. В центре анода было отверстие диаметром 25 мм, чтобы обеспечить видимость поверхности катода для объектива инфракрасного пирометра *7*. Для этой же цели противоположный от катодного узла торец вакуумной камеры был перекрыт оптическим стеклом *8* толщиной 10 мм.

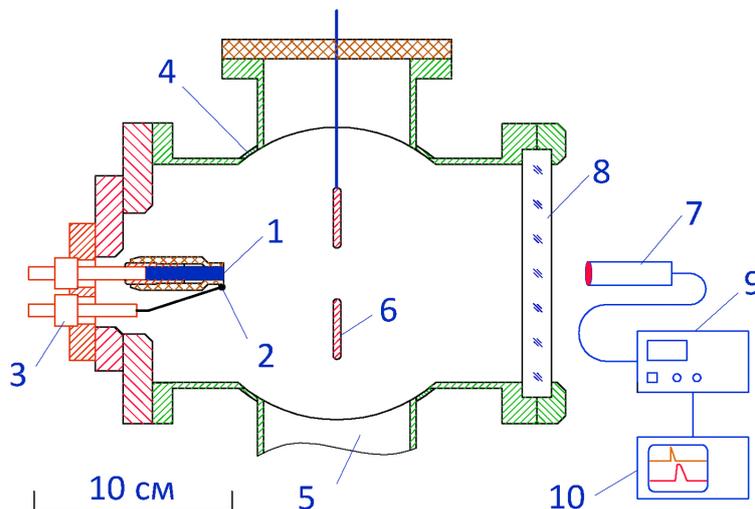


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – катод, 2 – система инициирования, 3 – вакуумный ввод, 4 – вакуумная камера, 5 – патрубок откачки, 6 – анод, 7 – объектив пирометра, 8 – оптическое стекло, 9 – пирометр, 10 – осциллограф.

Объектив пирометра *7* размещался снаружи вакуумной камеры на расстоянии 10 мм от оптического стекла. Он был настроен по расстоянию таким образом, чтобы измерительное поле пирометра находилось на поверхности катода *1*. Объектив соединялся с пирометром *9* через оптоволокно. Для измерений использовался быстродействующий инфракрасный бесконтактный пирометр KLEIBER KMGA 740-LO с диапазоном измерений температуры (350–3500) °С. Для каждого исследуемого материала катода пирометр калибровался в соответствии с коэффициентом излучения для соответствующего материала. Результаты измерений пирометра отображались на цифровом осциллографе *10*, на другой канал которого подавался сигнал от пояса Роговского с чувствительностью 100 А/В, предназначенного для регистрации тока дугового разряда.

Вакуумный дуговой разряд запускался системой инициирования *2* при пробое торцевой поверхности керамического изолятора высоковольтным импульсом с напряжением более 10 кВ. При этом происходила разрядка низкоиндуктивного конденсатора емкостью 0.22 мкФ, заряжаемого от схемы питания дуги с напряжением до 14 кВ, подключенного к разрядному промежутку между катодом *1* и анодом *6*. При этом формировался импульс вакуумного

дугового разряда с амплитудой тока $I_{\text{дуги}}$ до 3.5 кА и длительностью $t_{\text{имп}}$ около 1 мкс (ширина на полувысоте). Частота повторения импульсов в данных экспериментах составляла 1 импульс в 10 секунд, чтобы обеспечить остывание поверхности катода в промежутках между импульсами дуги. Были измерены температуры поверхности катодов из углерода, магния, титана, меди, циркония, ниобия, молибдена, серебра, олова, лантана, гадолиния и свинца. Эти материалы имеют широкий диапазон физических свойств, таких как атомная масса температура плавления, теплоемкости и теплопроводность и др.

3. Экспериментальные результаты.

Типичный импульс тока вакуумной дуги для катода из циркония приведен на рис.2. Видно, что для данного материала катода максимальный ток дуги составил $I_{\text{дуги}} = 3.4$ кА, при длительности импульса на полувысоте $t_{\text{имп}} = 0.97$ мкс. Ниже на рис.2 показано изменение температуры поверхности катода $T_{\text{катод}}$ в течение этого импульса дуги. Отметим, что «нулевое» значение температуры 350 °С на графике соответствует нижней границе диапазона измерения пирометра. Во время импульса тока дуги наблюдается рост температуры $T_{\text{катод}}$, затем, при окончании импульса температура экспоненциально снижается в течение десятков микросекунд. Для представленного на рис.2 импульса дуги с циркониевым катодом максимальная температура его поверхности достигала $T_{\text{катод}} = 960$ °С.

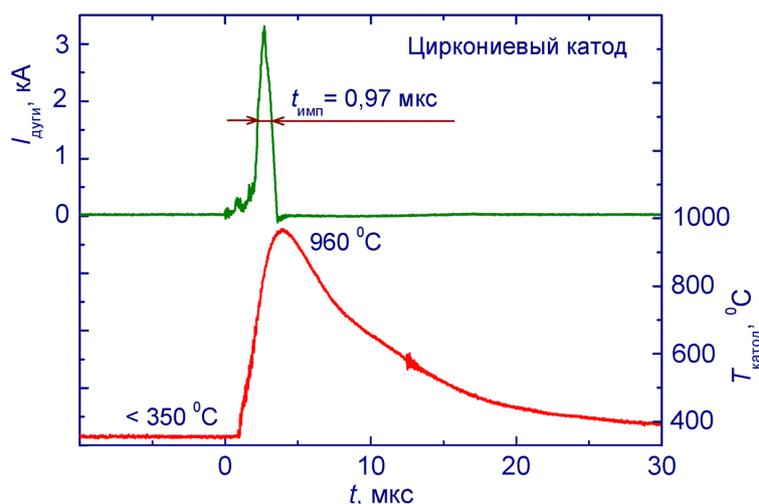


Рис. 2. Импульс вакуумного дугового разряда с циркониевым катодом (вверху) и соответствующая ему температура поверхности катода (внизу).

Зависимости температуры поверхности катода от амплитуды тока сильноточной вакуумной дуги длительностью около 1 мкс для различных материалов катода приведены на рис.3. Видно, что зависимости максимальной температуры поверхности катода носят линейный характер от амплитуды импульса тока дуги. Отметим, что при малых токах дуги разброс температуры для различных материалов незначителен и при $I_{\text{дуги}} = 0.5$ кА находится в пределах $T_{\text{катод}} = 400 - 500$ °С. По мере увеличения тока дуги, этот разброс увеличивается и при $I_{\text{дуги}} = 3$ кА температура поверхности катода для различных материалов различается почти в 2 раза, от 600 °С для титана, до 1100 °С для гадолиния.

Для большинства из 12 исследованных материалов максимальная температура поверхности катода находится ниже их температуры плавления $T_{\text{пл}}$ (Таблица 1). Т.е. для таких материалов расплавленная поверхность существует в области катодных пятен вакуумной дуги. Но для двух материалов поверхность катода должна быть полностью расплавлена во всем диапазоне токов дуги. Это олово ($T_{\text{пл}} = 230$ °С) и свинец ($T_{\text{пл}} = 330$ °С).

Таблица 1. Температура плавления $T_{пл}$ исследованных материалов катодов.

Материал катода	C	Mg	Ti	Cu	Zr	Nb	Mo	Ag	Sn	La	Gd	Pb
Температура плавления, °C	337	650	1670	1080	1850	2470	2620	960	230	920	1310	330
	0											

У магния, имеющего $T_{пл} = 650$ °C, температура достигает точки расплава поверхности при токе дуги более 2.3 кА. Отметим, что, несмотря на высокую температуру поверхности катода, температура самого катода, которая измерялась пирометром после быстрой разборки катодного узла через несколько минут после завершения работы дугового разряда, увеличивалась незначительно и даже при длительной работе не превышало 50 °C. Это связано с тем, что несмотря на высокую пиковую мощность в течение разрядного импульса средняя мощность при частоте следования импульсов 0.1 Гц не превышала 1 Вт. Таким образом, в течение разрядного импульса нагревалась только поверхность, а затем тепло с поверхности отводилось вглубь катода за счет процессов теплопроводности.

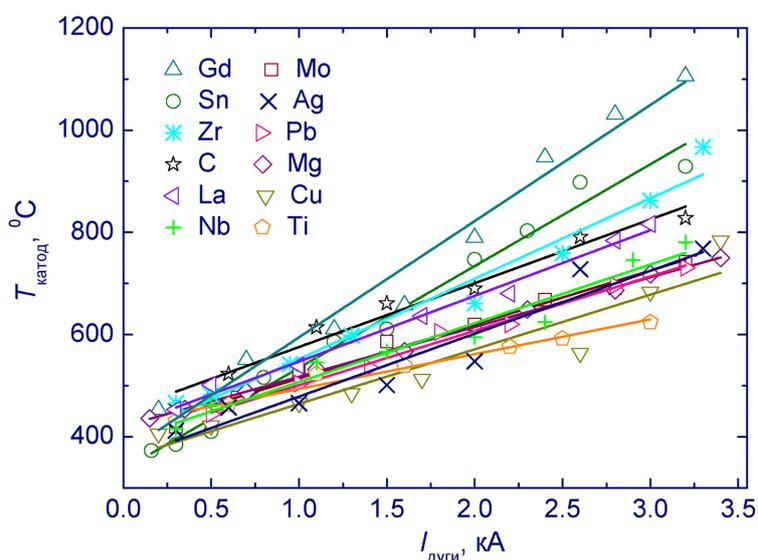


Рис. 3. Зависимости максимальной температуры поверхности катода от амплитуды тока сильноточной субмикросекундной вакуумной дуги.

Толщину нагретого в течении импульса слоя поверхности d (м) можно оценить, используя понятие глубины диффузии тепла. При использовании такого приближения изначально считается, что фронт температурного прогрева распространяется на глубину диффузии тепла, температурное поле до глубины диффузии изотропно и однородно, а поверхность является бесконечной. Такое приближение вполне правомерно, если глубина диффузии тепла меньше характерных размеров нагреваемой поверхности, как это реализуется в рассматриваемом случае. Таким образом, толщину нагретого в течении импульса слоя поверхности d (м) можно определить, как:

$$d = \sqrt{\lambda\tau/\rho C}, \tag{1}$$

где λ – коэффициент теплопроводности (Вт/м·К), τ – время температурного воздействия на поверхность катода (с), ρ – плотность катода (кг/м³), C – удельная теплоемкость материала катода (Дж/кг·К). Для рассматриваемых материалов катодов значение величины $(\lambda/\rho C)$ лежит в пределах от $5.7 \cdot 10^{-6}$ (м²с⁻¹) для гадолиния до $1.6 \cdot 10^{-4}$ (м²с⁻¹) для серебра. Принимая,

согласно зависимостям рис. 3 время температурного воздействия $\tau \approx 3$ мкс, можно оценить, что толщина нагретого в течении импульса слоя поверхности d для рассматриваемых материалов катода находится в пределах от приблизительно 4 мкм для гадолиния до 20 мкм для серебра. По-видимому, низкая скорость диффузии тепла в глубину катода для гадолиния и соответственно малая глубина прогрева поверхности приводит к тому что для этого материала достигаются наибольшие температуры поверхности среди других исследуемых материалов катодов (рис. 3).

4. Заключение

Прямые измерения температуры поверхности катода вакуумной дуги с амплитудой тока до 3.5 кА и длительностью импульса около 1 мкс для различных материалов катодов выполненные с помощью быстродействующей пирометрии показали, что наблюдается линейный рост этой температуры от амплитуды импульса разряда. При токе дуги 3 кА эта температура находится в пределах от 600 °С для титана, до 1100 °С для гадолиния. Для большинства исследованных материалов температура поверхности катода находится существенно ниже их температуры плавления, но поверхность катодов из олова и свинца расплавлена во всем диапазоне токов дуги, а для магния расплавление поверхности будет наблюдаться при амплитуде тока дуги более 2.3 кА. Полученные результаты представляются важными как для физики вакуумных разрядов, так и для техники ионных пучков.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 24-29-00249 (<https://rscf.ru/project/24-29-00249/>).

5. Литература

- [1] Nikolaev A., Oks E.M., Savkin K., Yushkov G.Yu., Brenner D.J., Johnson G., Randers-Pehrson G., Brown I.G., and MacGill R.A., Surface resistivity tailoring of ceramic insulators for an ion microprobe application, *Surf. Coat. Technol.*, **201**, 8120, 2007, doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.10.051
- [2] Nikolaev A.G., Oks E.M., Schanin P.M., and Yushkov G.Yu., Vacuum arc gas/metal ion sources with a magnetic field, *Rev. Sci. Instrum.*, **67**, 1213, 1996, doi: 10.1063/1.1146735
- [3] Sokullu Urkac E., Oztarhan A., Kaya N., Tihminlioglu F., Ila D., Muntele C., Budak S., Oks E., Nikolaev A., Ezdesir A., and Tek Z., Thermal characterization of Ag and Ag + N ion implanted ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE), *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B*, **261**, 699, 2007, doi: 10.1016/j.nimb.2007.04.102
- [4] Brown I.G., Vacuum arc ion sources, *Rev. Sci. Instrum.*, **65**, 3061, 1994, doi:10.1063/1.1144756
- [5] Anders A., Ion charge state distributions of vacuum arc plasmas: The origin of species, *Phys. Rev. E*, **55**, 969, 1997, doi: 10.1103/PhysRevE.55.969
- [6] Nikolaev A.G., Oks E.M. and Yushkov G.Yu., Charge-state distribution of ions in a vacuum arc discharge plasma in a high magnetic field, *Technical Physics*, **43**, 514, 1998, doi: 10.1134/1.1259030
- [7] Yushkov G., Oks E., Anders A. and Brown I., Effect of multiple current spikes on the enhancement of ion charge states of vacuum arc plasmas, *J. Appl. Phys.*, **87**, 8345, 2000, doi: 10.1063/1.373546
- [8] Bugaev A.S., Gushenets V.I., Yushkov G.Y., Oks E.M., Anders A., Brown I., Gershkovich A. and Spadke P., Generation of multiply charged ions in the plasma of a vacuum arc discharge, *Rus. Phys. J.*, **44**, 912, 2001, doi: 10.1023/A:1014349620595

- [9] Vodopyanov A.V., Golubev S.V., Khizhnyak V.I., Mansfeld D.A., Nikolaev A.G., Oks E.M., Savkin K.P., Vizir A.V. and Yushkov G.Yu., High current multicharged metal ion source using high power gyrotron heating of vacuum arc plasma, *Rev. Sci. Instrum.*, **79**, 02B304, 2008, doi: 10.1063/1.2802285
- [10] Frolova V.P., Nikolaev A.G., Oks E.M., Oreshkin V.I., Shmelev D.L., and Yushkov G.Yu., Experiment and simulation of generation of highly charged ions in a pulsed vacuum arc, *Vacuum*, **213**, 112062, 2023, doi: 10.1016/j.vacuum.2023.112062
- [11] Yushkov G.Yu. and Anders A., Extractable, elevated ion charge states in the transition regime from vacuum sparks to high current vacuum arcs, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 041502, 2008, doi: 10.1063/1.2839616