

## Исследования нагрева поверхности катода во время импульса вакуумной дуги субмиллисекундной длительности

*А.С. Бугаев, В.Д. Гридилев, П.В. Москвин, А.Г. Николаев\*, Е.М. Окс, Г.Ю. Юшков*

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

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

**Аннотация.** В работе представлены результаты пирометрического измерения температуры поверхности катода вакуумного дугового разряда при одиночных импульсах тока амплитудой до 1 кА и длительностью 250 мкс, типичных для ионных источников типа Mevva. На примере катодов из меди, магния и цинка показано, что температура поверхности катода к концу разрядного импульса может достигать величины 600–700 °С. В то время как при частоте повторения импульсов тока дуги один импульс в 10 сек температура объема катода между импульсами даже при длительной работе не превышала 40 °С. Обсуждается влияние динамики изменения температуры поверхности катода на соотношение потоков атомов и ионов с поверхности катода.

**Ключевые слова:** вакуумный дуговой разряд, плазма, пирометр, температура катода.

### 1. Введение

Вакуумно-дуговые источники ионов [1–3] широко используются в технологических процессах ионной имплантации с целью модификации поверхности [4–6]. В некоторых применениях, например, [4], требуется длительная работа источника ионов и при этом поверхность катода вакуумной дуги может нагреваться до высоких температур. Поскольку процесс отвода тепла с поверхности катода относительно инертен, то тепло с рабочей поверхности катода распространяется в катод на глубину всего около десятков микрон за импульс дуги субмиллисекундной длительности. В этом случае нагрев поверхности катода может происходить в течении самого импульса вакуумной дуги. Таким образом, в зависимости от параметров импульса вакуумной дуги может возникнуть ситуация, когда поверхность интегрально холодного катода может нагреваться до высоких температур, вплоть до температуры плавления, и это может оказывать влияние на катодные процессы самой дуги. Целью настоящей работы является измерение температуры поверхности катодов, выполненных из широко используемых в вакуумных дуговых ионных источниках при ионной модификации материалов - меди, магния и цинка. Параметры импульса вакуумного дугового разряда были типичны для ионных источников типа Mevva [1, 7] – длительность квазипрямоугольного импульса тока дуги 250 мкс и амплитуда импульса тока 0.2–1 кА. Результаты данных исследований вносят вклад в понимание особенностей работы вакуумных дуговых разрядов субмиллисекундной длительности импульса с катодами из различных материалов.

### 2. Методика и техника экспериментов

Схема разрядной системы используемой при измерениях температуры поверхности катода вакуумной дуги, приведена на Рис. 1. Была использована типичная конструкция электродов дуги ионного источника типа Mevva с "поджигом" дуги импульсным разрядом по поверхности диэлектрика [7]. Вакуумный дуговой разряд зажигался между катодом и кольцевым анодом, расположенным на расстоянии 5 см, в центре которого было отверстие диаметром 2.5 см, через которое происходило измерение температуры объективом пирометра. Объектив располагался снаружи вакуумной камеры напротив окна, перекрытого оптическим стеклом. Он был настроен таким образом, чтобы измерительное поле пирометра диаметром около 4 мм полностью находилось на поверхности катода дуги диаметром 6.3 мм. Был использован быстродействующий инфракрасный бесконтактный пирометр KLEIBER

KMGA 740-LO (производитель Kleiber Infrared GmbH, Германия) со временем отклика 10 мкс и с диапазоном измерений температуры 350–3500 °С.

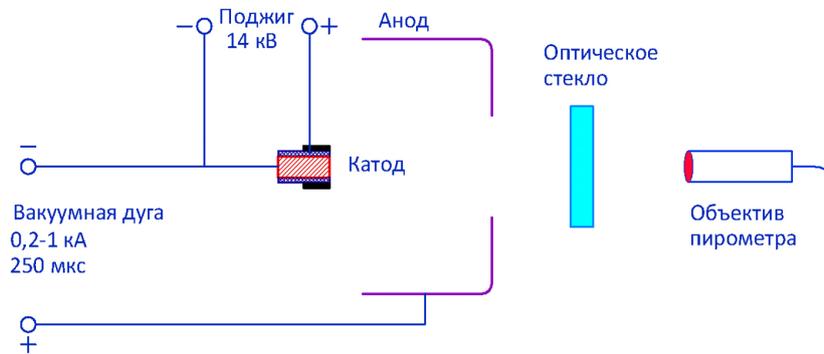


Рис. 1. Схема экспериментального стенда.

Вакуумный дуговой разряд инициировался при пробое торцевой поверхности керамического изолятора высоковольтным импульсом с напряжением 14 кВ. При этом происходила разрядка формирующей линии между катодом и анодом и зажигался дуговой разряд с амплитудой импульса тока, регулируемой в диапазоне 0.2–1 кА, при длительности 250 мкс. Частота повторения импульсов составляла 1 импульс в 10 секунд, чтобы обеспечить остывание поверхности катода в промежутках между импульсами дуги. Результаты температурных измерений пирометра выводились на осциллограф, на другом канале которого отображался ток дугового разряда. Вакуумная камера откачивалась криогенным насосом до давления уровня  $3 \times 10^{-7}$  Торр. Перед измерениями пирометр калибровался для определения коэффициента излучения (серости) для соответствующего материала катода. Для этого был создан стенд, в котором катод, оптическое окно и объектив пирометра располагались относительно друг друга на расстояниях, соответствующих эксперименту при измерении температуры поверхности катода при горении вакуумной дуги. Катод дуги нагревался до фиксированной температуры резистивным нагревателем, и эта температура измерялась при помощи калиброванной термопары Fluke 80BK-A (Туре - К), размещаемой в теле катода на расстоянии около 1 мм от поверхности торца катода. Для предотвращения окисления поверхности катода, влияющего на точность измерения пирометра, камера с оптическим окном, в которой был расположен катод, заполнялась инертным аргоном высокой чистоты. Коэффициенты излучения на пирометре выставлялись из условий равенства температур, измеряемых пирометром и калиброванной термопарой. Их величина с достаточной точностью совпадала с многочисленными данными о коэффициентах излучения используемых материалов катода (см., например, [8]).

Отдельно изучался вопрос влияния излучения столба плазмы дуги на точность измерения пирометром температуры поверхности катода. Для этого измерительное поле пирометра смещалось относительно рабочей поверхности катода так, чтобы излучение, регистрируемое пирометром, исходило только от столба плазмы вакуумной дуги. Кроме этого, температура поверхности катода измерялась через окно, расположенное на другом фланце под углом 90 град. к оптическому окну, показанному на Рис. 1. В этом случае при измерении температуры поверхности катода в объектив пирометра попадало излучение только из малой области столба плазмы вблизи катода. Все эти эксперименты не выявили влияния излучения столба плазмы вакуумной дуги на точность измерения температуры поверхности катода. Это связано с тем, что спектральный диапазон измерения температуры поверхности пирометром лежит в области длин волн излучения от 2.0 до 2.2 мкм в то время,

как диапазон излучения полностью ионизованной плазмы многозарядных ионов материала катода вакуумной дуги лежит в области длин волн менее 1 мкм [9].

Интересно, что излучение самих катодных пятен, в области которых материал поверхности катода может быть нагрет до температуры кипения [10], также слабо влияло на точность измерения в настоящих экспериментах. Это связано с тем, что суммарная площадь нагретой до высоких температур поверхности катода в области катодных пятен при реализуемых в эксперименте амплитуде тока разряда мала по сравнению с площадью области измерения температуры поверхности катода пирометром. Подтвердим это предположение оценками. Так, согласно эктонной гипотезе Г.А. Месяца [10], для медного катода радиус нагретой до высоких температур одним катодным пятном области можно принять равной радиусу кратера катодного пятна  $r_c = 2 \times 10^{-4}$  см, т.е. площадь нагретой до высокой температуры поверхности катода каждым пятном будет равна  $\pi r_c^2 = 1.3 \times 10^{-7}$  см<sup>2</sup>. Через каждое катодное пятно протекает ток дуги, равный пороговому току катодного пятна  $i_n$ , для меди  $i_n = 1.6$  А. Таким образом, при максимальной в настоящих экспериментах амплитуде импульса тока дуги 1 кА на катоде одновременно функционирует около 600 элементарных катодных пятен, а суммарная площадь катода, нагретая ими до высокой температуры, будет около  $8 \times 10^{-5}$  см<sup>2</sup>. Эта площадь в  $1.6 \times 10^3$  раз меньше, чем площадь поверхности катода, температура которой измеряется пирометром при измерительном поле пирометра на катоде диаметром около 4 мм. Поскольку, при измерении пирометром излучение с различных областей поверхности, а, следовательно, и измеряемая пирометром температура, усредняются по всему полю измерения, то, даже при температуре в области катодных пятен равной температуре кипения меди 2562 °С, погрешность измерения температуры поверхности катода, за счет излучения катодных пятен не будет превышать единиц градусов.

### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

При горении вакуумной дуги происходит нагрев поверхности катода как за счет джоулева нагрева при протекании тока дуги через его поверхность, так и за счет потока заряженных частиц и излучения из плазмы разряда на неё. Осциллограммы импульсов тока вакуумного дугового разряда для катодов из цинка, магния и меди при амплитудном значении тока дуги  $I_{дуги} = 800$  А приведены на Рис. 2. Ниже на осциллограммах Рис. 2 показано изменение температуры поверхности катода  $T_{катод}$  в течение соответствующих импульсов дуги. Из представленных на Рис. 2 осциллограмм видно, что во время всего импульса тока дуги наблюдается постоянный рост  $T_{катод}$ , затем, при окончании импульса, температура быстро спадает ниже границы диапазона измерения пирометра. Однако, осциллограммы изменения температуры различаются для всех рассмотренных материалов. В случае цинкового катода наблюдается быстрый рост  $T_{катод}$  в течение переднего фронта импульса тока дуги до, примерно, 600 °С, затем, когда ток дуги выходит в насыщение, скорость роста  $T_{катод}$  резко снижается, доходя к концу импульса до максимальной температуры  $T_{макс} = 720$  °С. На осциллограмме температуры поверхности магниевый катод нет такой ярко выраженной «ступеньки». Скорость роста  $T_{катод}$  в течение импульса снижается и в конце импульса достигается температура около 640 °С. Температура поверхности медного катода растёт линейно в течение всего импульса до значения  $T_{макс} = 610$  °С.

В общем случае, динамика изменения температуры нагреваемой поверхности зависит от величины коэффициента температуропроводности её материала  $\alpha$ , который, в свою очередь, пропорционален теплопроводности и обратно пропорционален плотности и теплоемкости материала. Чем выше значение  $\alpha$ , тем быстрее протекают тепловые процессы в этом материале. Для используемых в эксперименте материалов катода  $\alpha$  имеют следующие

значения: цинк –  $4.3 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ , магний –  $8.2 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$  и медь  $1.1 \times 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ . Таким образом, тепло с поверхности катода наиболее быстро передается вглубь объема катода в случае меди, а наиболее медленно – в случае цинка. Поэтому, поверхность катода из цинка быстро нагревается, и форма осциллограммы  $T_{\text{катод}}$  коррелирует с формой импульса тока дуги. В случае меди, процесс нагрева катода в течении импульса более медленный, за счет отвода тепла вглубь объема катода, и рост  $T_{\text{катод}}$  происходит в течении всего импульса. Отметим также, что при реализуемой в экспериментах частоте повторения импульсов тока дуги (один импульс в 10 сек) температура самого катода между импульсами даже при длительной работе не поднималась выше  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Это связано с тем, что, несмотря на высокую импульсную мощность в дуге уровня 20 кВт, средняя мощность составляла всего 0.5 Вт и была недостаточна для нагрева всего объема катода.

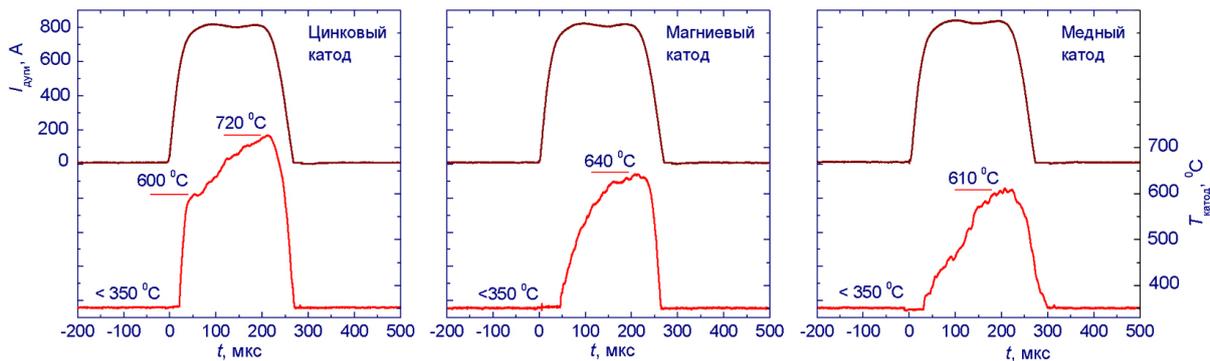


Рис. 2. Импульсы вакуумного дугового разряда с цинковым, магниевым и медным катодами (на осциллограммах – вверху) и соответствующая им температура поверхности катода (внизу).

Зависимости  $T_{\text{макс}}$  от  $I_{\text{дуги}}$  для трех исследуемых материалов катода приведены на Рис. 3. Видно, что для меди и магния зависимости температуры возрастают при  $I_{\text{дуги}} = 100\text{--}600 \text{ А}$ , а затем переходят в насыщение, устанавливаясь на уровне примерно  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  для меди и  $650 \text{ }^\circ\text{C}$  магния. Таким образом, в этих случаях,  $T_{\text{макс}}$  не достигают температуры плавления материала катода. Но для цинка, у которого температура плавления  $420 \text{ }^\circ\text{C}$ , плавление поверхности катода может происходить при амплитуде тока свыше  $200 \text{ А}$ .

При максимальной наблюдаемой в эксперименте температуре поток испаренных с поверхности катода атомов цинка  $\Phi_a$  можно оценить, как:

$$\Phi_a \approx \frac{p_{\text{нас}} \cdot S_{\text{катод}}}{\sqrt{2\pi \cdot M_a \cdot kT_{\text{макс}}}}, \quad (1)$$

где  $p_{\text{нас}} = 4 \times 10^3 \text{ Па}$  – давление насыщенных паров цинка при температуре поверхности катода  $750 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $S_{\text{катод}} = 0.32 \text{ см}^2$  – рабочая площадь поверхности катода;  $M_a = 1.1 \times 10^{-25} \text{ кг}$  – масса атома цинка;  $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ Дж/К}$ . Согласно (1), при  $T_{\text{макс}}$  поток испаренных атомов цинка достигает  $\Phi_a \approx 10^{22}$  атомов/сек. Поток ионов цинка с катода можно оценить, как:

$$\Phi_i \approx \frac{0.1 \cdot I_{\text{дуги}}}{Q_i}, \quad (2)$$

где  $I_{\text{дуги}} = 960 \text{ А}$ , величина тока дуги при котором  $T_{\text{макс}} = 750 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $Q_i = 2 \times 10^{-19} \text{ Кл}$  – средний заряд иона цинка в плазме дуги. Согласно (2),  $\Phi_i \approx 5 \times 10^{20}$  ионов/сек. Таким образом, при амплитуде импульса тока дуги около  $1 \text{ кА}$  и типичной для ионных источников типа Mevva длительности импульса около  $250 \text{ мкс}$  при достижении максимальной температуры поверхности катода поток испаренных с поверхности цинкового катода атомов может

превышать количество ионов, эмитированных катодными пятнами, в 20 раз. Но снижение тока дуги до 200 А, согласно данным Рис. 3 и выражениям (1) и (2), изменяет это соотношение на противоположное. В этом случае поток ионов ( $\approx 10^{20}$  ионов/сек) уже в 2.5 раза превышает поток испаренных атомов ( $\approx 4 \times 10^{19}$  атомов/сек), а при амплитуде тока дуги 150 А в 16 раз ( $\sim 8 \times 10^{20}$  ионов/сек и  $\sim 5 \times 10^{19}$  атомов/сек, соответственно). Именно поэтому при функционировании катодов из легкоплавких материалов с высоким давлением насыщенных паров следует использовать меньшие импульсные токи разряда уровня 100 А. В противном случае, тонкий слой нагретой в разряде поверхности нерасплавленного в объеме катода будет производить большое количество испаренных атомов.

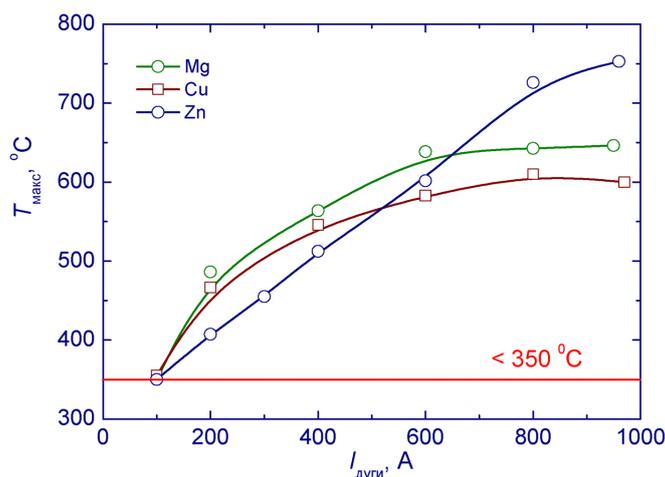


Рис. 3. Зависимости максимальной температуры поверхности катода от амплитуды тока вакуумной дуги.

В случае катода из магния при максимальной амплитуде тока дуги около 1 кА и  $T_{\text{макс}} = 642$  °C давление насыщенных паров ниже и составляет 0.1 Па. В этом случае, хотя  $\Phi_i > \Phi_a$ , но их значения являются величинами одного порядка:  $\sim 4 \times 10^{20}$  ионов/сек и  $\sim 1.5 \times 10^{20}$  атомов/сек, соответственно. Но при снижении амплитуды тока дуги до 150 А значения  $\Phi_i$  становятся в  $10^3$  раз больше, чем значения  $\Phi_a$ .

В случае катода из меди даже при максимальной амплитуде тока дуги поток ионов с катода ( $\sim 3 \times 10^{20}$  ионов/сек) на несколько порядков выше потока испаренных атомов ( $3 \times 10^9$  атомов/сек). Это связано с низкими значениями насыщенных паров меди при температуре поверхности катода, достигаемой в эксперименте. Таким образом, в случае катода из меди, в отличие от катодов из цинка и магния, испарение атомов является несущественным процессом при функционировании вакуумной дуги с параметрами импульса тока, типичного для вакуумных дуговых ионных источников типа Mevva.

Отметим также, что испарение атомов происходит со всей рабочей поверхности катода, тогда как эмиссия ионов осуществляется только из катодных пятен, имеющих микронные размеры. И, хотя направленные скорости испаренных с поверхности катода атомов существенно меньше скоростей ионов, например, для катода из цинка при температуре поверхности 750 °C средняя скорость атомов около  $7 \times 10^2$  м/с, в то время как ионов – около  $10^4$  м/с, концентрация испаренных атомов в области катодного пятна вакуумной дуги оказывается меньше концентрации ионов и испарение атомов с нагретой поверхности катода не должно существенно влиять на процессы в катодных пятнах.

#### 4. Заключение

Измерения температуры поверхности катода вакуумной дуги с параметрами, типичными для ионных источников типа Mevva для катодов из цинка, магния и меди, высокоскоростным

инфракрасным пирометром показали, что при амплитуде тока дуги уровня 1 кА эта температура увеличивается в течении импульса до значений 600–750 °С, при температуре объема катода менее 40 °С. Для катодов из меди и магния температура поверхности катода находится ниже температуры плавления, а в случае цинка, поверхность катода расплавлена при токах дуги более 300 А. При этом, в случае цинка термическое испарение атомов во время импульса вакуумной дуги может превалировать над ионной эрозией, а для катода из меди, имеющей низкое давление насыщенных паров при зарегистрированных температурах поверхности, вклад термического испарения является несущественным. Снижение амплитуды тока дуги до уровня 150 А приводит к снижению температуры катода из цинка и резкому уменьшению потока испаренных с его поверхности атомов, который становится на порядок величины меньше, чем поток ионов цинка, эмитированных катодными пятнами вакуумной дуги при её горении.

### Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания ИСЭ СО РАН, проект FWRM-2021-0006.

### 5. Список литературы

- [1] I.G. Brown, Some Reflections on Very Large-Scale Ion Beam Surface Modification *Russian Physics Journal*, vol. **63**, 1788, 2021; doi: 10.1007/s11182-021-02235-3
- [2] E.M. Oks, G.Yu. Yushkov, P.M. Schanin, and A.G. Nikolaev, Vacuum arc gas/metal ion sources with a magnetic field, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. **67**, 1213, 1996; doi: 10.1063/1.1146735
- [3] A.I. Ryabchikov, N.M. Arsubov, N.A. Vasilyev, and S.V. Dektyarev, The Raduga multipurpose ion/plasma source for surface modification of construction materials, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, vol. **59-60**, 124, 1991; doi: 10.1016/0168-583x(91)95190-o
- [4] A. Nikolaev, E.M. Oks, K. Savkin, et al., Surface resistivity tailoring of ceramic insulators for an ion microprobe application, *Surf. Coat. Technol.*, vol. **201**, 8120, 2007; doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.10.051
- [5] A.G. Nikolaev, G.Y. Yushkov, E.M. Oks, A. Oztarhan, A. Akpek, E. Hames-Kocabas, E.S. Urkac, and I.G. Brown, Modification of anti-bacterial surface properties of textile polymers by vacuum arc ion source implantation *Appl. Surf. Sci.*, vol. **310**, 51, 2014; doi: 10.1016/j.apsusc.2014.04.002
- [6] M.C. Salvadori, F.S. Teixeira, M. Cattani, A. Nikolaev, K.P. Savkin, E.M. Oks, H.-K. Park, L. Phillips, K.M. Yu, and I.G. Brown, On the electrical conductivity of Ti-implanted alumina, *J. Appl. Phys.*, vol. **111**, 063714, 2012; doi: 10.1063/1.3697900
- [7] V.P. Frolova, A.G. Nikolaev, G.Y. Yushkov, P.P. Kiziridi, and N.A. Prokopenko, Ion beam generation in a vacuum arc ion source with a multicomponent cathode, *Russian Physics Journal*, vol. **63**, 1783, 2021; doi: 10.1007/s11182-021-02232-6
- [8] *The degree of blackness of some surfaces* [online], Retrieved Mar. 28, 2014; <https://chipinfo.pro/infos/materials/emissivity.shtml>
- [9] B. Yotsombat, S. Davydov, P. Poolcharuansin, T. Vilaithong, and I.G. Brown, Optical emission spectra of a copper plasma produced by a metal vapour vacuum arc plasma source, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. **34**, 1928, 2001; doi:10.1088/0022-3727/34/12/325
- [10] G.A. Mesyats, *Cathode Phenomena in a Vacuum Discharge: The Breakdown, The Spark, and the Arc*, Moscow: Nauka, 2000.