

Измерение порогового тока вакуумной дуги по вероятности поджига дуги для вольфрамового и медного катода

*П.С. Михайлов**, *И.Л. Музюкин*, *И.В. Уйманов*

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

**gmgm01@mail.ru*

Аннотация. В данной работе показана методика и результаты исследования порогового тока вакуумной дуги для проволочных вольфрамовых и медных катодов. Методика состоит в измерении вероятности горения дуги после пробоя вакуумного промежутка в двухэлектродной системе катод-анод дольше 100 нс. Для питания и поджига дуги использовался прямоугольный импульс длиной 1.3 мкс и амплитудой от 0.3 до 3.8 А. В результате вероятность горения дуги стремится к 100% при токе > 3.2 А.

Ключевые слова: вакуумная дуга, пороговый ток, вольфрамовый катод, медный катод.

1. Введение

Дуговой вакуумный разряд активно применяют в промышленности и научных исследованиях. Вакуумную дугу используют в качестве источника ионов и электронов [1, 2], для создания импульсных источников нейтронов [3], и различных ускорителей [4]. С помощью вакуумной дуги можно достаточно легко и эффективно получить металлическую плазму, которая используется для осаждения тонких пленок [5], и модификации поверхности [6]. Полученная в результате дуги плазма имеет достаточно высокую температуру и скорость, что позволило разработать на основе дугового разряда космические двигатели [7].

Для проектирования и моделирования различных источников на основе вакуумной дуги необходимо знать основные параметры разряда такие как: среднее время горения разряда, условия возникновения, величину катодного падения и пороговый ток. Пороговый ток — это статистическая величина тока ниже которой дуговой разряд не может функционировать. Обширные данные по пороговым токам для различных металлов представлены в работе Кесаева [8]. Работа написана в 1960-х, и с того времени экспериментальная техника значительно изменилась, поэтому имеет смысл разработать новую методику определения порогового тока и уточнить значение порогового тока для вольфрама и меди.

В своей работе Кесаев использовал метод замыкания контактов для поджига дуги в условиях воздуха. За пороговый ток он брал минимальный ток, при котором дуговой разряд виден на осциллограмме. В качестве временной шкалы был записан сигнал частотой 500 Гц, что говорит о временном разрешении в несколько десятков мкс. В работе [9] показано, что диэлектрические включения и пленки на поверхности меняют тип катодных пятен, что может сильно отразиться на пороговом токе. Поэтому в данной работе большое внимание уделено чистоте поверхности образцов. Одним из способов эффективной очистки поверхности является дуговой разряд [10].

Вопрос определения порогового тока стоит не только для однородных металлов, но и для различных наноструктурных материалов таких как W-Fuzz (вольфрамовых пух). W-Fuzz образуется на вольфрамовых стенках в термоядерных реакторах [11] и значительно изменяет электрофизические свойства вольфрама [12, 13]. Он имеет толщину от нескольких мкм до десятков нм. Исходя из этого методика определения порогового тока должна включаться себя метод инициализации и питания вакуумной дуги, которая будет минимально воздействовать на поверхность образца.

2. Экспериментальное оборудование и методика исследования

Для измерения порогового тока вакуумной дуги была разработана экспериментальная установка, схематично показанная на Рис. 1. Она собрана на основе высоковакуумной камеры с без масляной системой откачки и остаточным давлением не хуже $1 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст.

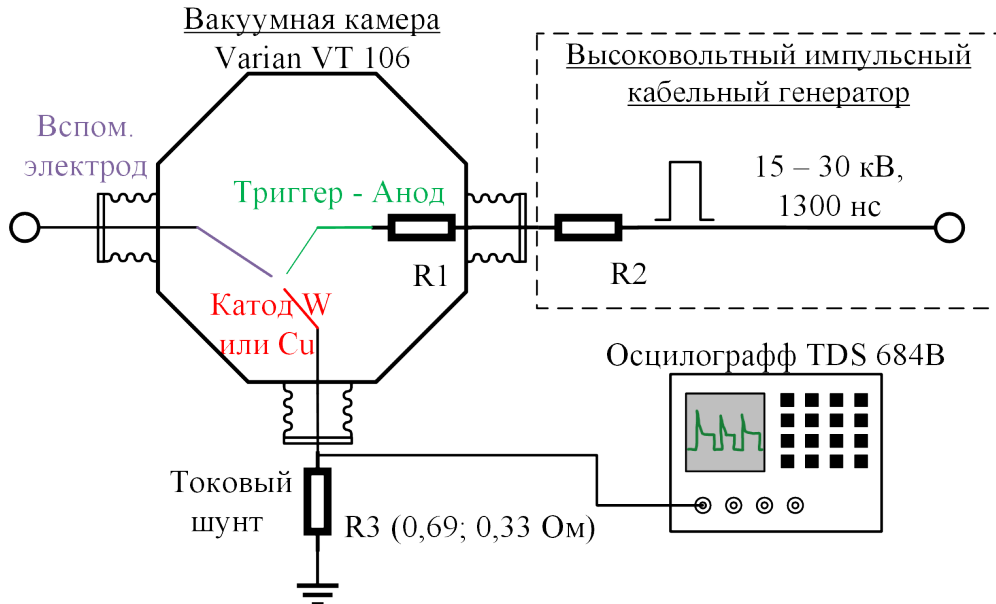


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

Метод определения порогового тока заключается в измерении вероятности горения дуги после пробоя вакуумного промежутка дольше определенного времени (100 нс). В данном методе использовалась двухэлектродная разрядная система, вспомогательный электрод во время основных измерений отодвигался на расстояние нескольких сантиметров и заземлялся. При этом высоковольтный импульс кабельного генератора подавался на триггерный электрод, который одновременно являлся и анодом. Таким образом, в электродной системе приближение анода к катоду и подаче на него высоковольтного импульса обеспечивало инициирование дугового разряда путем самопробоя вакуумного промежутка и последующее питание разряда.

Кабельный генератор формирует прямоугольные высоковольтные импульсы амплитудой 10–20 кВ и длительностью 1300 нс, ток импульса ограничивается резисторами R2 (2–200 кОм), R1 (1–20 кОм) (см. Рис. 1). Резистор R1 находился внутри вакуумной камеры непосредственно перед триггерным электродом, для уменьшения влияния паразитной емкости вакуумного ввода. В данном методе напряжение горения дуги не измерялось, а ток разряда, измерялся мало индуктивным шунтом R3 сигнал которого записывался при помощи осциллографа Tektronix TDS 684B, с полосой пропускания 1 ГГц.

В данной работе использовались медные и вольфрамовые электроды. Вольфрамовые электроды изготовлены из вольфрамовой проволоки марки ВА с массовой долей вольфрама 99.95 %. Диаметр катода составлял 200 мкм, а анода 90 мкм. Медные электроды изготовлены из медной проволоки диаметром 0.3 мм, марки М1 с массовой долей меди 99.9 %. На Рис. 2 показана фотография электродов внутри вакуумной камеры.

Особое внимание уделялось чистоте поверхности электродов, так как диэлектрические включения и пленки могут сильно повлиять на полученные результаты. Перед установкой в вакуумную камеру электроды полировались электрохимическим методом, вольфрамовые в

растворе 20% NaOH, медные в растворе 60% H₃PO₄. Электроды крепились в вакуумной камере на подвижные вводы. После откачки камеры вольфрамовые электроды прокаливались при температуре ~1500 °С. Перед каждой серией измерений поверхность катода очищали дуговыми разрядами при помощи вспомогательного электрода, длительностью порядка 100 мкс и амплитудой 80 А для вольфрама и 15 А, 100 мкс для меди.

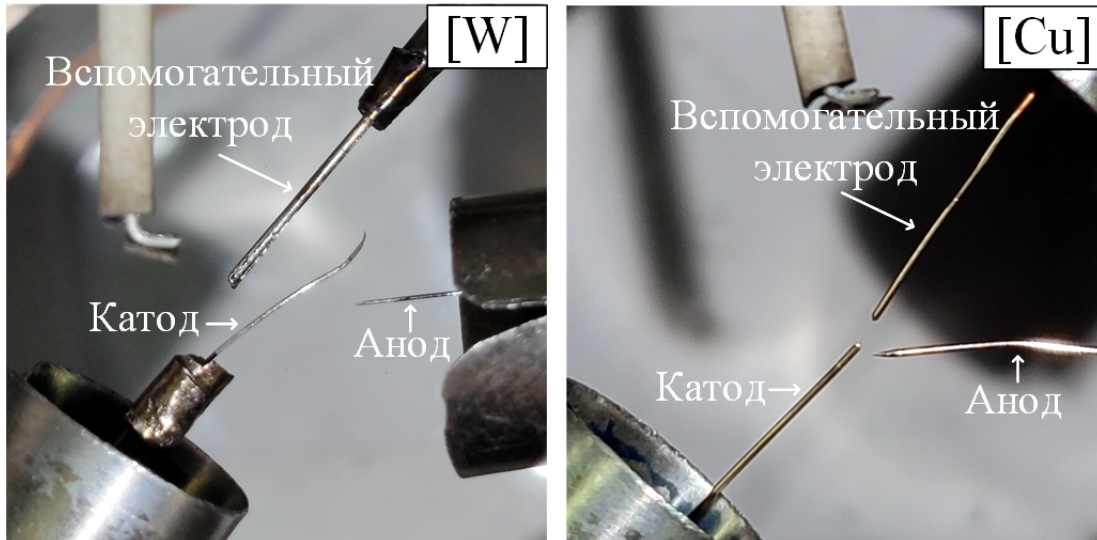


Рис. 2. Фотография электродов в вакуумной камере. Слева- вольфрамовые электроды, справа - медные электроды.

3. Результаты

На Рис. 3. показана типичная осциллограмма электрического разряда при подачи высоковольтного импульса кабельного генератора амплитудой 15 кВ и длительностью ~1300 нс.

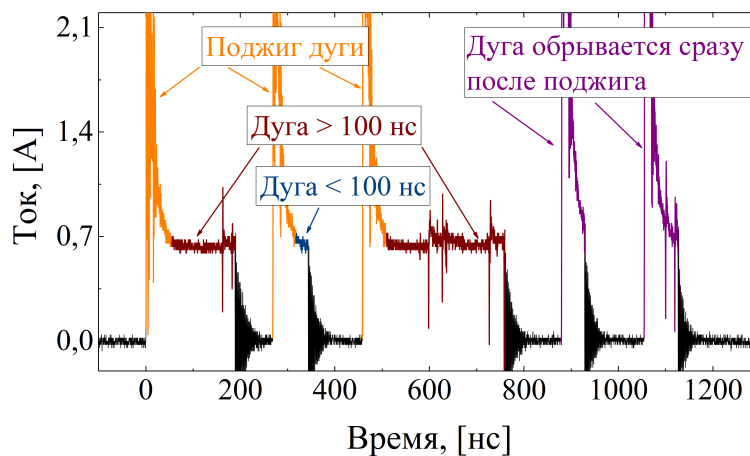


Рис. 3. Типичная осциллограмма дугового разряда.

На осциллограмме видно, что дуга за один импульс генератора дуга может загораться и погаснуть несколько раз. В начале каждой дуги присутствует резкий скачок тока (~60 нс, оранжевый и фиолетовый цвет на осциллограмме) он вызван паразитной емкостью электродной системы и высоковольтного ввода в вакуумную камеру. При обработке экспериментальных данных на каждой осциллограмме фиксировалось количество пробоев (оранжевый и фиолетовый цвет) и время горения дуги (без начального скачка, синий и

темно-красный цвет), а также рассчитывался средний ток. При этом время горения дуги определялось на уровне от 1.1 до 0.9 от среднего значения тока дугового разряда. Для обработки экспериментальных данных было разработано специальное программное обеспечение, позволяющее по данным осциллограммы тока разряда фиксировать факт пробоя промежутка, определять время горения дуги и рассчитывать средний ток. Всего для различных токов разряда для медных электродов было зафиксировано ~7000 дуг с длительностью > 100 нс при регистрации ~22000 пробоев. Для вольфрамовых электродов зафиксировано ~6800 дуг с длительностью больше 100 нс при регистрации ~19000 пробоев.

Для расчета вероятности подхвата дуги мы взяли за минимальное время горения дуги величину 100 нс, что соответствует нескольким эктонным циклам [14, 15]. На Рис. 4 показана получившаяся после компьютерной обработки экспериментальных данных зависимость вероятности горения дуги длительностью не менее 100 нс для различных значений тока разряда. На графике одной точке соответствуют все значения тока в диапазоне ± 0.2 А. График начинается при значении среднего тока дуги, лежащего в диапазоне 0.2–0.6 А, где вероятность подхвата дуги менее 1% для обоих материалов электродов. При среднем токе < 0.8 А вероятность горения дуги длительностью > 100 нс для медного катода больше, чем для вольфрамового на ~ 10% и на ~ 4 % для средних токов > 1.8 А. При токе ~ 1.6 А вероятность примерно равна ~50% для обоих материалов. Когда значение среднего тока лежит в диапазоне 3.0–3.2 А большинство дуг горит дольше 100 нс и вероятность подхвата дуги близка к 100%, соответственно.

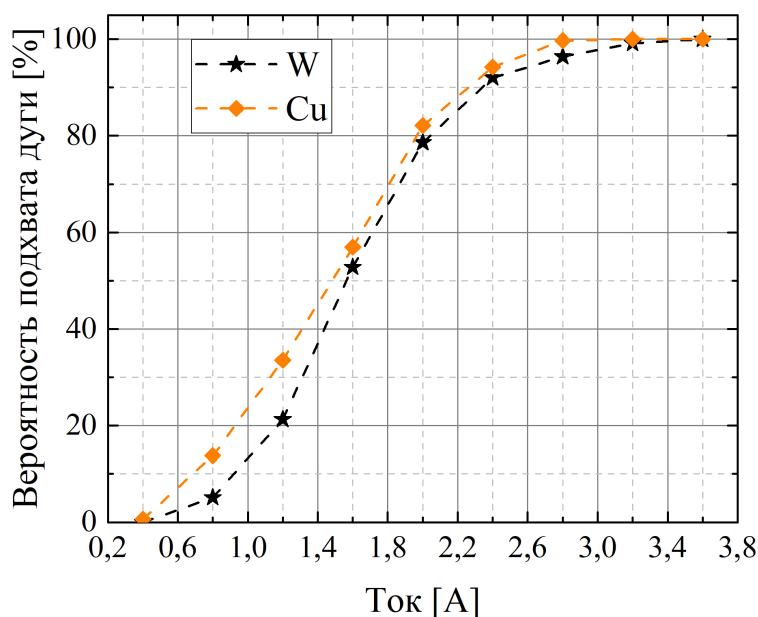


Рис. 4. График вероятности подхвата дуги.

4. Выводы

В данной работе продемонстрирована методика определения порогового тока по вероятности стабилизации вакуумной дуги. Полученные в результате экспериментов зависимости вероятности подхвата дуги от тока для меди и вольфрама похожи и не имеют существенных различий. При этом за пороговый ток можно взять ток, при котором вероятность подхвата дуги длительностью > 100 нс равна 50%. Для меди и вольфрама он составляет $\sim 1.6 \pm 0.2$ А, что хорошо согласуется с данными Кесаева (1.6 А) [8], что в свою очередь подтверждает работоспособность методики. При этом стоит отметить, что при токе

дуги равным двум пороговым ~ 3.2 А вероятность горения дуги длительностью >100 нс близка к 100%.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00360, <https://rscf.ru/project/23-19-00360/>

The research was carried out with financial support of RSF. grant № 23-19-00360, <https://rscf.ru/en/project/23-19-00360/>

5. Список литературы

- [1] R.L. Voxman, D.M. Sanders, P.J. Martin (ed.), *Handbook of vacuum arc science & technology: fundamentals and applications*, William Andrew, 1996.
- [2] A. Anders, *Cathodic arcs: from fractal spots to energetic condensation*, New York: Springer, 2008.
- [3] R. Amirov, et al., Vacuum arc with a distributed cathode spot as a plasma source for plasma separation of spent nuclear fuel and radioactive waste, *Plasma Physics Reports*, vol. **41**, 808, 2015, doi: 10.1134/S1063780X15100013
- [4] I.G. Brown, Vacuum arc ion sources, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. **65**, 3061, 1994, doi: 10.1063/1.1144756.
- [5] U. Helmersson, M. Lättemann, J. Bohlmark, A. P. Ehiasarian and J. T. Gudmundsson, Ionized physical vapor deposition (IPVD): A review of technology and applications, *Thin Solid Films*, vol. **513**, 1, 2006, doi:10.1016/j.tsf.2006.03.033
- [6] A. Inspektor, P. A. Salvador, Architecture of PVD coatings for metalcutting applications: A review, *Surface and Coatings Technology*, vol. **257**, 138, 2014; doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.08.068
- [7] D. Krejci and P. Lozano, Space Propulsion Technology for Small Spacecraft, in *Proceedings of the IEEE*, vol. **106**, 362, 2018, doi:10.1109/JPROC.2017.2778747
- [8] И.Г. Кецаев, *Катодные процессы электрической дуги*, Москва, Наука, 1968
- [9] Jüttner B. Cathode spots of electric arcs, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. **34**, R103, 2001, doi: 10.1088/0022-3727/34/17/202
- [10] J. Achtert et al., Influence of surface contaminations on cathode processes of vacuum discharges, *Beiträge Plasma Phys.*, vol. **17**, 419, 1977, doi:10.1002/ctpp.19770170606
- [11] M.J. Baldwin and R.P. Doerner, Helium induced nanoscopic morphology on tungsten under fusion relevant plasma conditions, *Nucl. Fusion*, vol. **48**, 035001, 2008, doi: 10.1088/0029-5515/48/3/035001
- [12] D. Hwangbo et al., Ignition and erosion of materials by arcing in fusion-relevant conditions, *Contrib. Plasma Phys.*, vol. **56**, 1, 2018, doi: 10.1002/ctpp.201700157
- [13] P.S. Mikhailov, I.L. Muzukin, Yu.I. Mamontov, Yu.A. Zemskov, I.V. Uimanov, A.V. Kaziev, M.M. Kharkov, S.A. Barenholts, Threshold parameters of vacuum arcs with W-fuzz cathodes, *Journal of Nuclear Material*, vol. **582**, 154479, 2023, doi: 10.1016/j.jnucmat.2023.154479
- [14] B. Jüttner, The dynamics of arc cathode spots in vacuum: new measurements, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. **30**, 221, 1997, doi:10.1088/0022-3727/30/2/009
- [15] V.F. Puchkarev, A.M. Murzakayev, Current density and the cathode spot lifetime in a vacuum arc at threshold currents, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. **23**, 26, 1990, doi:10.1088/0022-3727/23/1/005