

УДК 537.525.5
P.A.C.S. 52.80.Mg, 52.80.Vp

DOI 10.54708/26587572_2023_521279

MEASUREMENTS OF VACUUM ARC THRESHOLD CURRENT FOR W CATHODE

Pavel Sergeevich Mikhailov^a, Ilya Lvovich Muzyukin

Institute of Electrophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Amundsen str. 106, Yekaterinburg, 620016, Russia

^a gmgm01@mail.ru

ABSTRACT

An experimental technique was developed to measure the threshold current of a vacuum arc with a tungsten cathode. Main point was to measure the arc cutoff current while it is powered by a slowly decreasing current pulse. The average value of the cutoff current for a series of discharges was assumed to be equal to the threshold current of the arc discharge. For a tungsten wire cathode, a value ~ 2.4 A was obtained, which is slightly higher than the standard value of the threshold current (1.6 A) obtained by Kesaev using the method of opening contacts. This can be explained by thorough preparation of the cathode surface.

KEYWORDS

Threshold currents; vacuum arc.

ИЗМЕРЕНИЕ ПОРОГОВОГО ТОКА ВАКУУМНОЙ ДУГИ ДЛЯ ВОЛЬФРАМОВОГО КАТОДА

Павел Сергеевич Михайлов^a, Илья Львович Музюкин

Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106

^a gmgm01@mail.com

АННОТАЦИЯ

В данной работе представлена методика определения порогового тока вакуумной дуги с вольфрамовым катодом. Она заключается в измерении тока обрыва дуги при ее питании однополярным спадающим импульсом. Средняя величина тока обрыва для серии разрядов была принята равной пороговому току дугового разряда. Для проволочного вольфрамового катода было получено значение порядка 2,4 А, что несколько больше стандартного значения порогового тока (1,6 А), полученного Кесаевым в классических работах. Это можно объяснить тщательной очисткой поверхности образца.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Пороговый ток; вакуумная дуга.

Введение

Дуговой разряд – это явление, которое прочно заняло свое место в науке и технике. Особенное место занимает вакуумная дуга, которая является эффективным источником ионов и электронов [1, 2]. На основе вакуумной дуги были созданы источники ионов для ускорителей [3]. Плазма, полученная в вакуумных разрядах, применяется для осаждения различных пленок [4, 5] и модификации поверхности [6, 7]. Высокая эффективность образования плазмы и высокая начальная скорость ионов нашли применение в электрических космических двигателях [8, 9].

Несмотря на активное применение, вакуумный разряд остается не полностью изученным особенно в областях малых токов. С уменьшением тока разряда появляются значительные нестабильности тока и напряжения горения, а также явления самопроизвольного погасания.

Средняя продолжительность горения разряда зависит от тока и тщательно исследована [10]. Для вольфрамового катода она составляет порядка 10 мкс при токе 3,5 А [11]. Одно из свойств дугового разряда – это существование порогового тока. Этот ток, ниже которого дуга гаснет, является минимальным током для поддержания одной ячейки катодного пятна.

Исследования пороговых токов для различных материалов выполнил Кесаев [10]. Он использовал метод размыкания контактов для инициализации дуги на воздухе. За пороговый ток он принимал минимальный ток, при котором на осциллограмме напряжения есть признаки дугового разряда. Значение порогового тока необходимо для построения физической модели катодного пятна.

С момента исследований Кесаева экспериментальная техника сильно улучшилась, поэтому имеет смысл уточнить значения порогового тока для вольфрама. Предлагается

обратить внимание на некоторые аспекты, которые можно улучшить. Состояние поверхности катода играет ключевую роль в образовании катодных пятен. Опыты Кесаева были проведены при атмосферном давлении, поэтому авторы [2] предполагают образование катодных пятен первого типа на поверхности катодов. Катодные пятна первого типа возникают на диэлектрических пленках и различных включениях, они быстро перемещаются по поверхности катода и несут токи значительно меньшие, чем токи, переносимые катодными пятнами второго типа, образующимися на чистой металлической поверхности [12, 13]. Поэтому важно проводить эксперименты в условиях высокого вакуума и уделить внимание чистоте поверхности катода. Одним из способов очистки поверхности катода является вакуумная переплавка дуговым разрядом [14].

В работах [15–17] пришли к выводу, что цикл жизни катодного пятна составляет десятки наносекунд, поэтому важно проводить измерения с наносекундной точностью. У Кесаева на осциллограмме в качестве временной развертки было записано 20 500 Гц импульсов, что говорит о разрешении десятки микросекунд.

Также разработка и тестирование новой методики определения порогового тока необходима для исследования дуговых свойств новых материалов. В термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы под действием ионов гелия образуется наноструктурированный вольфрамовый слой (пух) [18]. Он увеличивает вероятность появления униполярных дуг, которые загрязняют плазму и ускоряют эрозию диверторов [19]. При исследовании наноструктурированных материалов необходимо учитывать разрушения поверхностного слоя дугой [20], поэтому важно использовать короткие дуговые разряды, которые можно зажечь и локализовать на конкретной области исследуемого образца.

1. Экспериментальное оборудование и методика исследования

Основная идея экспериментов заключалась в измерении тока обрыва вакуумной дуги при ее питании однополярным спадающим импульсом. Среднюю величину тока обрыва для серии разрядов можно принять равной пороговому току дугового разряда. На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки. Она была собрана на основе высоковакуумной камеры с безмасляной системой откачки и давлением не хуже $1 \cdot 10^{-8}$ мм рт.ст.

В качестве метода возбуждения дуги использовался пробой промежутка при помощи вспомогательного электрода. Триггерный электрод располагался на расстоянии нескольких десятков мкм от катода. На него подавался высоковольтный импульс (15–30 кВ, 500 нс, 3,5 А). Образовавшейся плазмы было достаточно для замыкания промежутка катод анод и возбуждения дугового разряда.

Для питания дуги использовался конденсатор C_1 емкостью 40 нФ, который заряжался через резистор R_1 до 200 В. Резистор R_2 служил ограничением тока дуги; $\tau = R_2 \cdot C_1 = 1,42$ мкс. Параметры цепи питания подобраны таким образом, чтобы дуговой разряд начинался при токе в 2–3 раза больше порогового и спадал до пороговых значений за 1–2 мкс. Время горения разряда подобрано с учетом двух фактов. С одной стороны, уменьшение времени горения дуги уменьшает вероятность самопроизвольного погасания дуги. С другой стороны, разряд должен существовать сравнимое время с длительностью импульса поджига.

Ток измерялся низкоиндуктивным шунтом R_5 , выполненным из 10 параллельно соединенных резисторов. Напряжение горения дуги измерялось на конденсаторе C_1 при помощи пассивного щупа с коэффициентом деления 10. Сигналы тока и напряжения регистрировались осциллографом с полосой пропускания 1 ГГц.

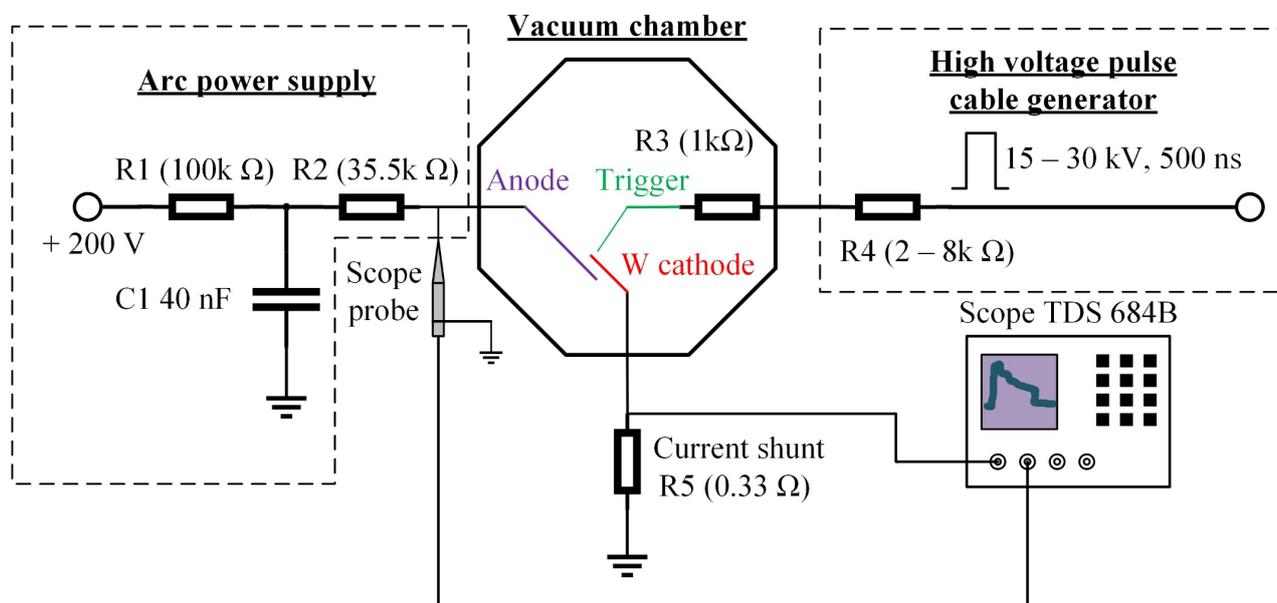


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup

Особое внимание уделялось чистоте поверхности электродов. На рис. 2 показана фотография электродов внутри вакуумной камеры. Электроды изготовлены из вольфрамовой проволоки марки ВА с массовой долей вольфрама 99,9%. Диаметр катода 200 мкм, анода 400 мкм, триггера 90 мкм. Перед установкой в камеру электроды полировались электрохимическим методом в растворе 20% NaOH. После установки электродов в вакуумную камеру и ее откачки, анод и катод замыкали и прогревали постоянным током в течении нескольких минут при температуре около 1500 °С. Перед измерениями поверхность электродов переплавляли дугвыми импульсами длительностью порядка

100 мкс и амплитудой 40–20 А. Для этого использовалась вспомогательная цепь питания с конденсатором 100 мкФ.

2. Результаты

Всего была записана и обработана 551 осциллограмма. На рис. 3, а приведен пример типичной осциллограммы. На нем отмечена область поджига дуги (trigger pulse), после этого ток спадет и в области 1,3 мкс дуга спонтанно гаснет. На рис. 3, б показан способ вычисления тока обрыва дуги. Для этого вычислялось среднее значения тока дуги за 25 нс (125 точек) до погасания дуги. Это необходимо для учета нестабильности тока и шумовой составляющей сигнала.

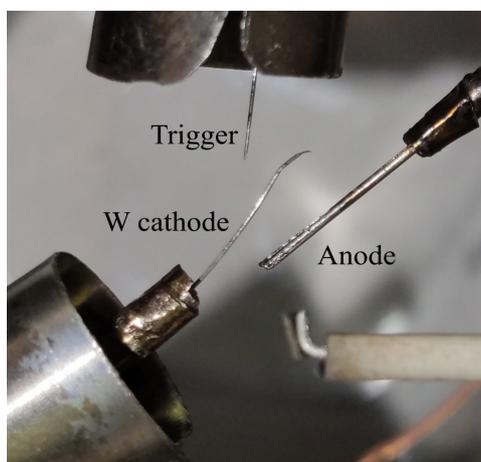


Рис. 2. Фотография электродов

Fig. 2. Photo of the electrode assemblies

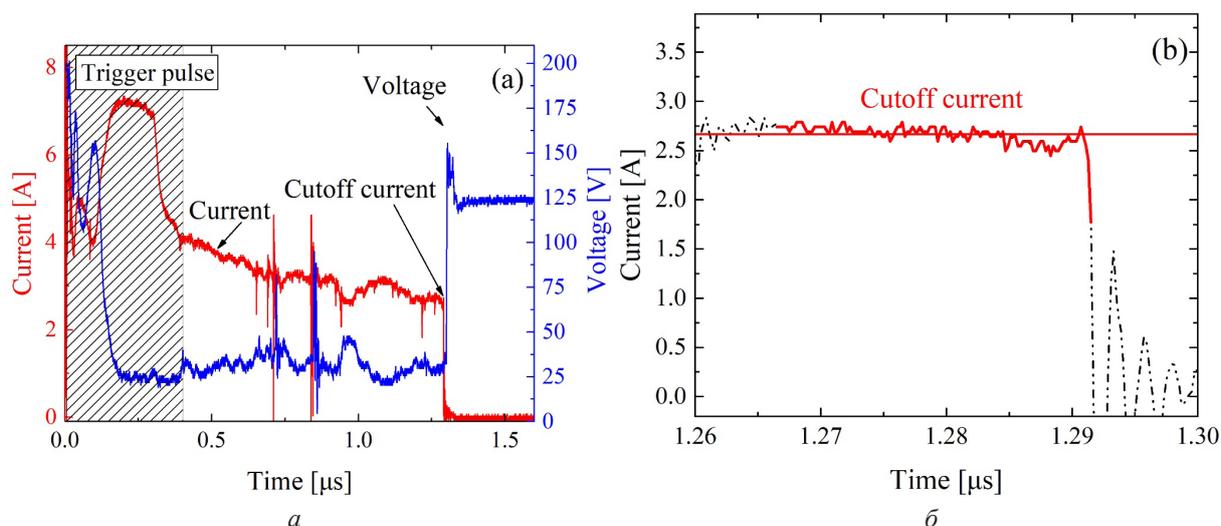


Рис. 3. Пример осциллограммы тока и напряжения (а), ток обрыва (б)

Fig. 3. Typical current and voltage waveforms (a), cutoff current (b)

На рис. 4 показана статистика по токам обрыва для всех осциллограмм. Статистика выполнена в виде гистограммы, состоящей из 11 столбцов шириной 0,4 А. По оси x указано количество разрядов с током обрыва в данном промежутке. Среднеквадратичное отклонение для тока обрыва находится в пределах 1–9%. Как видно из диаграммы, большинство значений (70%) лежит в промежутке 1,3–3,3 А. Минимально зарегистрированное значение тока обрыва 0,86 А, а максимальное – 4,38 А. Средний ток обрыва получился 2,44 А со стандартным отклонением 0,62 А.

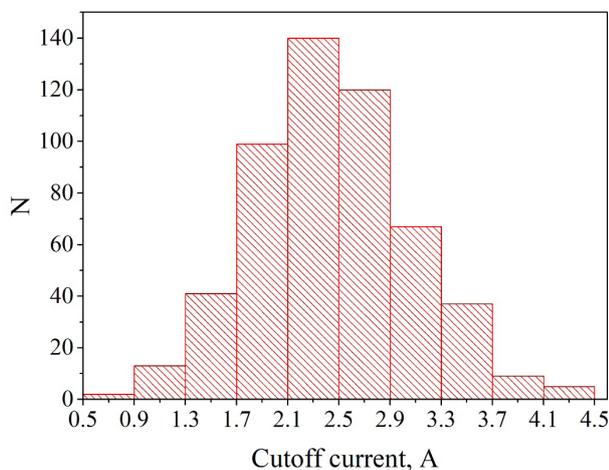


Рис. 4. Гистограмма с распределением тока обрыва

Fig. 4. Histogram of measured arc cutoff currents.

Выводы

В результате обработки данных средний ток обрыва получился 2,44 А с среднеквадратичным отклонением 0,62 А. Это значение можно принять за пороговый ток вольфрама для данного эксперимента. Полученный Кесаевым [10] пороговый ток для вольфрама методом размыкания контактов составляет 1,6 А, что значительно меньше, чем значения, полученные нами. Это можно объяснить более тщательной подготовкой поверхности образцов, а именно химической полировкой, отжигом в вакууме и дуговой переплавкой поверхности. Эта подготовка снижает вероятность появления катодных пятен 1 типа.

Катодные пятна первого типа возникают на диэлектрических пленках и различных включениях, они быстро перемещаются по поверхности катода и несут токи значительно меньшие, чем токи, переносимые катодными пятнами второго типа, образующимися на чистой металлической поверхности. Но, с другой стороны, полученные значения обладают большим разбросом, это может быть связано с большой длительностью дуги 1–2 мкс. Некоторые дуговые разряды, возможно, обрывались не из-за достижения порогового тока, а из-за накопления вероятности погасания за счет длительного времени горения. В будущих работах метод может быть улучшен за счет уменьшения импульса поджига и уменьшения длительности горения дуги.

Благодарности / Acknowledgments

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 Russian Science Foundation grant № 23-19-00360, <https://rscf.ru/en/project/23-19-00360/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anders A. Cathodic arcs: from fractal spots to energetic condensation. New York: Springer, 2008. P. 544.
2. Boxman R. L., Sanders D. M., Martin P. J. (ed.). Handbook of vacuum arc science & technology: fundamentals and applications. William Andrew, 1996. P. 773.
3. Brown I. G. Vacuum arc ion sources // Review of scientific instruments. 1994. V. 65, Iss. 10. P. 3061–3081. DOI: 10.1063/1.1144756.
4. Helmersson U., Lattemann M., Bohlmark J., Ehasarian A. P., Gudmundsson J. T. Ionized physical vapor deposition (IPVD): A review of technology and applications // Thin solid films. 2006. V. 513, Iss. 1–2. P. 1–24. DOI: 10.1016/j.tsf.2006.03.033.
5. Anders A. (ed.). Handbook of plasma immersion ion implantation and deposition. New York: Wiley, 2000. P. 672.
6. Inspektor A., Salvador P. A. Architecture of PVD coatings for metalcutting applications: A review // Surface

- and Coatings Technology. 2014. V. 257. P. 138–153. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.08.068.
7. Anders A. Metal plasma immersion ion implantation and deposition: a review // *Surface and Coatings Technology*. 1997. V. 93, Iss. 2–3. P. 158–167. DOI: 10.1016/S0257-8972(97)00037-6.
8. Keidar M., Zhuang T., Shashurin A., Teel G., Chiu D., Lukas J., Haque S. E., Brieda L. Electric propulsion for small satellites // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2014. V. 57, Iss. 1. Article number 014005. DOI: 10.1088/0741-3335/57/1/014005.
9. Polk J. E., Sekerak M., Ziemer J., Schein J., Qi N., Anders A. A theoretical analysis of vacuum arc thruster and vacuum arc ion thruster performance // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2008. V. 36, Iss. 5. P. 2167–2179. DOI: 10.1109/TPS.2008.2004374.
10. Кесаев И. Г. Катодные процессы электрической дуги. М.: Наука, 1968. 244 с.
11. Farrall G. A., Lafferty J. M., Cobine J. D. Electrode materials and their stability characteristics in the vacuum arc // *IEEE Transactions on Communication and Electronics*. 1963. V. 82, Iss. 2. P. 253–258. DOI: 10.1109/TCE.1963.6373384.
12. Mesyats G. A. Cathode Phenomena in a Vacuum Discharge: the Breakdown, the Spark and the Arc. Moscow: Nauka, 2000. P. 399.
13. Jüttner B. Cathode spots of electric arcs // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2001. V. 34, Iss. 17. Article number R103. DOI: 10.1088/0022-3727/34/17/202.
14. Achtert J., Altrichter B., Jüttner B., Pech P., Pursch H., Reiner H.-D., Rohrbeck W., Siemroth P., Wolff H. Influence of surface contaminations on cathode processes of vacuum discharges // *Beiträge aus der Plasmaphysik*. 1977. V. 17, Iss. 6. P. 419–431. DOI: 10.1002/ctpp.19770170606.
15. Jüttner B. The dynamics of arc cathode spots in vacuum: new measurements // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1997. V. 30, Iss. 2. Article number 221. DOI: 10.1088/0022-3727/30/2/009.
16. Siemroth P., Schulke T., Witke T. Investigation of cathode spots and plasma formation of vacuum arcs by high-speed microscopy and spectroscopy // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 1997. V. 25, Iss. 4. P. 571–579. DOI: 10.1109/27.640667.
17. Puchkarev V. F., Murzakayev A. M. Current density and the cathode spot lifetime in a vacuum arc at threshold currents // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1990. V. 23, Iss. 1. Article number 26. DOI: 10.1088/0022-3727/23/1/005.
18. Kajita S., Sakaguchi W., Ohno N., Yoshida N., Saeki T. Formation process of tungsten nanostructure by the exposure to helium plasma under fusion relevant plasma conditions // *Nuclear Fusion*. 2009. V. 49, Iss. 9. Article number 095005. DOI: 10.1088/0029-5515/49/9/095005.
19. Ueda Y., Coenen J. W., Temmerman G. De, Doerner R. P., Linke J., Philipps V., Tsitrone E. Research status and issues of tungsten plasma facing materials for ITER and beyond // *Fusion engineering and design*. 2014. V. 89, Iss. 7–8. P. 901–906. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2014.02.078.
20. Hwangbo D., Kajita Sh., Barengolts S. A., Tsvetoukh M., Kawaguchi Sh., Mesyats V. G., Ohno N. Ignition and erosion of materials by arcing in fusion-relevant conditions // *Contributions to Plasma Physics*. 2018. V. 58, Iss. 6–8. P. 608–615. DOI: 10.1002/10.1002/ctpp.201700157.