



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.44>

УДК: 537.525.5

17-я Международная конференция

«Газоразрядная плазма и ее применения»

Екатеринбург, Россия, 8-12 сентября 2025

ИЗМЕРЕНИЕ ПОРОГОВОГО ТОКА ВАКУУМНОЙ ДУГИ

ДЛЯ КАДМИЕВОГО КАТОДА:

ТОК ОБРЫВА ДУГИ И ВЕРОЯТНОСТЬ ИНИЦИРОВАНИЯ ДУГИ

П.С. Михайлов, И.Л. Музюкин, И.В. Уйманов, Д.Л. Шмелев

**Институт электрофизики УрО РАН,
620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106**

Статья поступила в редакцию 28 ноября 2025 г.

Аннотация. В данной работе для исследования пороговых параметров вакуумного дугового разряда с кадмievым катодом разработаны две экспериментальные методики. Первая позволяет определять пороговый ток вакуумной дуги как наиболее вероятное значение тока обрыва разряда при спаде тока, сформированном однополярным импульсом разрядки RC контура на дуговой промежуток. Вторая методика направлена на определении вероятности зажигания дуги, при которой реализуется механизм самоподдержания катодного пятна в зависимости от тока разряда в случае пробоя вакуумного промежутка высоковольтным импульсом. При этом существенное внимание было уделено первоначальной подготовке и последующей очистке поверхности катода в области формирования вакуумной дуги с помощью длинных дуговых разрядов с током в несколько ампер. Такой способ позволяет эродировать поверхность катода на глубину в несколько микрон. Так же в рамках данной методики

на основе экспериментальных данных было определено среднее время функционирования дугового разряда при пороговом токе и при токах ниже порогового значения.

Ключевые слова: пороговый ток, вакуумная дуга.

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

Автор для переписки: Михайлов Павел Сергеевич, gmgm01@mail.ru

Введение

Высоковольтное вакуумное оборудование и приборы нашли широкое применение в различных областях науки и техники [1]. Во многих из них вакуум используется в качестве электрической изоляции. Нарушение вакуумной изоляции происходит в виде электрических разрядов, называемых вакуумными. В вакуумных разрядах в отличии от газовых, плазма возникает из материала электродов. Вакуумные разряды состоят из трех последовательных стадий [2]. Первая стадия вакуумный пробой, во время которого образуется катодная плазма. Вторая стадия искра, ток разряда увеличивается, а падения напряжения уменьшается, эта стадия происходит пока плазма летит от катода к аноду. За этим следует дуговая стадия разряда. Вакуумная дуга представляет собой самоподдерживающийся электрический разряд с низким напряжением горения и высокой плотностью тока. Высокая плотность тока достигается в катодных пятнах, которые хаотически передвигаются по поверхности электрода. Они меняют микрорельеф поверхности катода, что может снизить прочность вакуумной изоляции [3]. Температура в катодном пятне значительно выше температуры плавления металла поэтому в дуге присутствует жидккая капельная фракция металла катода.

Вакуумные дуги уже давно используются в науке и технике: для осаждения различных пленок [4] и нанесения покрытий [5], получения пучков ионов металлов [6] и в вакуумных выключателях. Однако, вакуумная дуга может быть нежелательным паразитным явлением. Образование капель и изменение

микрорельефа поверхности в процессе вакуумного разряда представляют собой серьезную проблему для – международного проекта термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР). Капли, появляющиеся в результате униполярной дуги на поверхности диверторах, проникают в термоядерную плазму и резко понижают ее температуру, что мешает термоядерной реакции [7].

Одной из важнейших характеристик вакуумного дугового разряда является пороговый ток, ниже которого дуга не горит [2,8]. Кесаев [8] предложил метод определения порогового тока дугового разряда путем зажигания разряда методом размыкания электродов. Значение тока, при котором все еще можно было обнаружить на осциллограмме дуговой разряд, было принято за пороговый ток. Существенным недостатком этого метода было то, что измерения проводились на воздухе, что неизбежно приводило к образованию различных типов неметаллических загрязнений на поверхности электродов, облегчая инициирование и поддержание вакуумного дугового разряда [2,9].

Вопрос определение пороговых параметров вакуумной дуги стал актуальным из-за появления новых материалов, например, как наноструктурированной вольфрам (W-Fuzz). Он образуется в термоядерных реакторах на поверхности диверторов [10]. Его электрофизические свойства значительно отличаются от обычного вольфрама [11]. Для работы со сложными материалами такими как W-Fuzz необходимо разработать и отработать методику определения пороговых параметров вакуумной дуги на чистых металлах. В данной работе был выбран кадмий, так как его пороговый ток 0,19 А по данным Кесаева [8], что довольно близко к значениям тока с W-Fuzz.

В статье для исследования пороговых параметров вакуумного дугового разряда с кадмием катодом представлены две экспериментальные методики. Первая позволяет определять пороговый ток вакуумной дуги как наиболее вероятное значение тока обрыва разряда при спаде тока, сформированном однополярным импульсом разрядки RC контура на дуговой промежуток. Вторая методика направлена на определении вероятности зажигания дуги, при котором

реализуется механизм самоподдержания катодного пятна в зависимости от тока разряда в случае пробоя вакуумного промежутка высоковольтным импульсом.

1. Экспериментальное оборудование и методика исследования

Для обоих методик определения пороговых параметров вакуумного дугового разряда все эксперименты проводились в высоковакуумной камере с без масляной системой откачки с давлением не хуже $1 \cdot 10^{-8}$ мм.рт.ст.. На рис. 1 представлена принципиальная схема экспериментальной установки для первой методики с током обрыва.

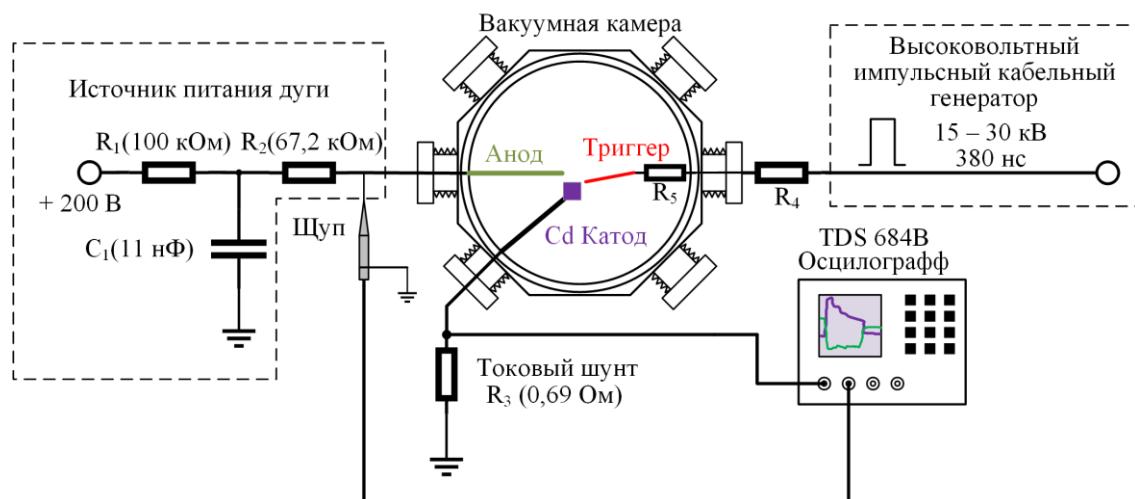


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки для методики определения тока обрыва дуги.

Ток горения дуги измерялся мало индуктивным шунтом с сопротивлением $R_3 = 0,69$ Ом сигнал которого оцифровывался при помощи осциллографа Tektronix TDS 684B, с полосой пропускания 1 ГГц. В данной работе использовался катод, изготовленный из кадмииевой стружки показанный на рис. 2. Триггерный электрод и анод изготавливались из вольфрамовой проволоки ВА с диаметром 90 мкм и 400 мкм соответственно. Электроды крепились в вакуумной камере на подвижных 3D вводах, что позволяло позиционировать электроды относительно друг друга и выполнить обе методики на одном наборе электродов. Перед каждой серией измерений поверхность катода очищали дуговыми разрядами длительностью порядка 100 мкс и амплитудой 1-2 А. Для этого использовалась вспомогательная цепь питания дуги с $C_2 = 100$ мкФ.

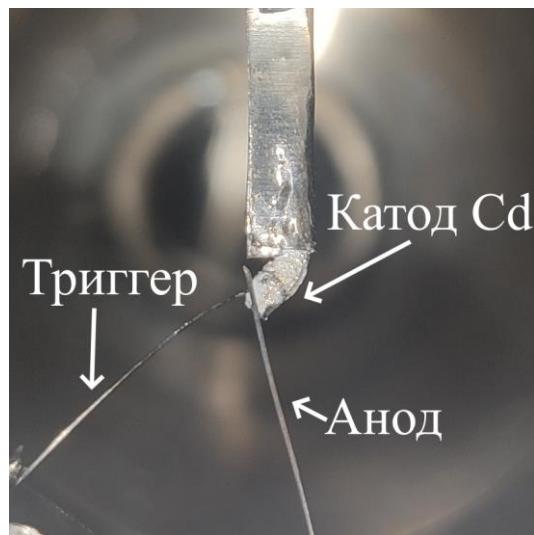
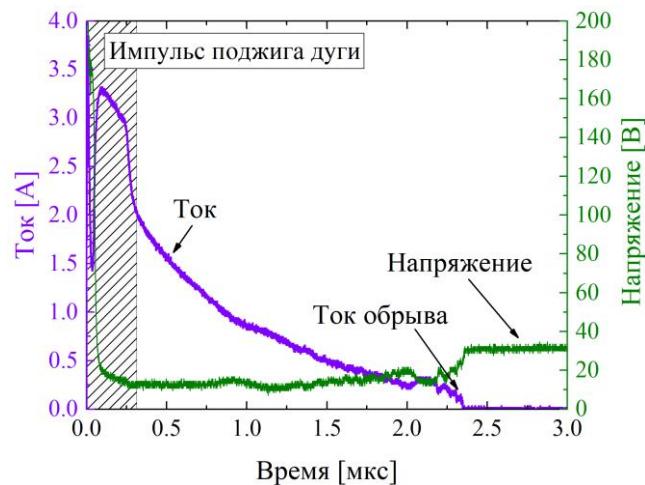


Рис. 2. Фотография электродов в вакуумной камере.

Рис. 3. Пример типичной осциллограммы дуги на кадмииевом катоде. $U = 200$ В, $C_1 = 11$ нФ, $R_2 = 67,2$ Ом.

1.1 Методика измерения тока обрыва вакуумной дуги при спадающем токе разряда и определение порогового тока как его наиболее вероятного значения

В качестве метода инициирования основного дугового разряда в промежутке катод-анод использовался метод формирования плазмы катодного пятна за счет зажигания вспомогательного разряда в промежутке катод-триггер (см. рис. 2). Подвижный триггерный электрод мог располагаться на расстоянии нескольких десятков микрон от катода. На него подавался высоковольтный импульс от кабельного генератора с амплитудой 15-30 кВ и длительностью 380 нс. За счет конечного времени задержки до пробоя промежутка катод-триггер

длительность вспомогательного триггерного разряда варьировалась от ~50 нс до ~380 нс. При этом преимущественно его длительность составляла ~250-350 нс. Ток триггерного импульса ограничивается резисторами R_4 (2-20 кОм) и R_5 (2 к Ом) (см. рис. 1). Резистор R_5 находился внутри вакуумной камеры непосредственно перед триггерным электродом. Образовавшейся плазмы было достаточно для замыкания промежутка катод-анод и возбуждения основного дугового разряда. Питание основного дугового разряда в промежутке катод-анод осуществлялось экспоненциально спадающим однополярным импульсом, формирующимся при апериодическом разряде R_2C_1 контура на дуговой промежуток (см. рис. 1). Конденсатор контура C_1 заряжался через высокоомный резистор R_1 до 200 В, тем самым отвязывая зарядный источник при зажигании дуги. Время горения дуги в промежутке катод-анод выбрано с учетом двух фактов. С одной стороны, уменьшение времени горения дуги уменьшает вероятность ее самопроизвольного погасания. С другой стороны, разряд должен существовать сравнимое время с длительностью импульса поджига. Напряжения горения дуги измерялись на конденсаторе при помощи пассивного щупа с коэффициентом деления 10 (см. рис. 1).

На рис. 3 приведен пример типичной осцилограммы разряда для кадмievого катода. Штрихованной областью отмечено время действия триггерного импульса. Для обработки полученных экспериментальных данных была разработана компьютерная программа, определяющая момент обрыва тока дуги и вычисляющая ток обрыва путем усреднения осцилограммы тока за 50 нс до ее погасания. Такая процедура позволяет избавиться от учета нестабильностей тока и шумовой составляющей сигнала при определении тока обрыва по данным из осцилограммы. Затем на основе полученных данных по токам обрыва строилась гистограмма, показывающая зависимость отношения количества измерений с током обрыва (N_i^A) попадающем в задаваемый интервал тока Δ к полному количеству выполненных измерений (N_i^{tot}). Из данной гистограммы определялось наиболее вероятное значение тока обрыва с точностью до Δ и полагалось величиной порогового тока дуги.

1.2 Методика измерения времени горения вакуумной дуги в зависимости от тока разряда вблизи пороговых значений и определение вероятности инициирования самоподдерживающейся дугового разряда при пробое вакуумного промежутка

В данной методике использовалась двухэлектродная разрядная система катод-триггер. Как уже говорилось выше, электроды крепятся в вакуумной камере на подвижных вводах, что дает возможность позиционировать электроды относительно друг друга. Это позволило выполнить обе методики на одном наборе электродов. Для этого в двухэлектродной методике анод просто отодвигался на расстояние, намного превосходящее длину промежутка катод-триггер (нескольких сантиметров) и заземлялся (см. рис. 4). При этом высоковольтный импульс кабельного генератора амплитудой 15-30 кВ и длительностью 1300 нс подавался на триггерный электрод, который в этой методике одновременно являлся и анодом дугового разряда. Таким образом, в двухэлектродной системе приближение данного электрода к катоду и подаче на него высоковольтного импульса обеспечивало инициирование дугового разряда путем самопробоя вакуумного промежутка и последующее питание разряда.

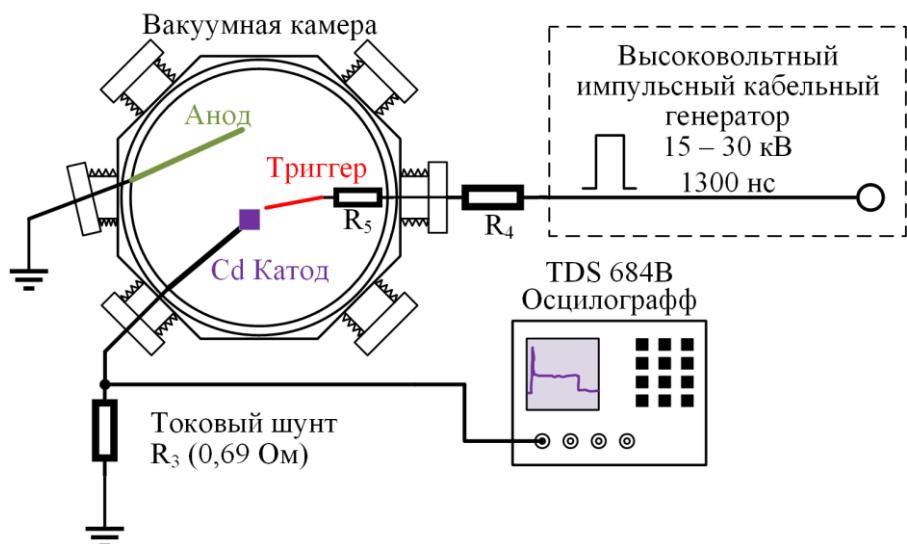


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для измерения времени горения дугового разряда в двухэлектродной системе катод-триггер (анод).

Так как внутренне сопротивление кабельного генератора составляет 75 Ом ток дуги преимущественно определяется величинами сопротивлений R_4 и R_5 (см. рис. 3), диапазон которых составил 10-510 кОм для R_4 и 1-20 кОм для R_5 в исследованном диапазоне тока дуги 0,04-1,6 А. В данном методе напряжение горения дуги не измерялось, а ток разряда, как и в предыдущем методе, измерялся мало индуктивным шунтом $R_3 = 0,69$ Ом.

По данным из представленных осцилограмм видно (рис. 5), что при малых токах за один импульс генератора длительностью τ_G может происходить несколько пробоев промежутка вследствие того, что дуга либо не загорается, либо ее время горения τ_{arc} мало по сравнению с τ_G . В начале каждого пробоя присутствует резкий скачек тока с экспоненциальным спадом длительностью до $\sim 50\text{-}60$ нс, вызванный разрядкой паразитной емкости электродной системы и высоковольтного ввода в вакуумную камеру. При обработке экспериментальных данных на каждой осцилограмме фиксировалось количество пробоев N_{br} и время горения дуги τ_{arc} (без учета длительности начального скачка) на каждом участке после пробоя, а также рассчитывался средний ток i_{av} для всех случаев инициирования дуги за один импульс генератора. Расчет i_{av} проводился для каждой дуги путем усреднения осцилограммы тока только по своему временному отрезку. В основе определения факта инициирования дуги после пробоя промежутка нами был выбран следующий критерий. Мы полагаем, что достоверным фактом развития самоподдерживающих процессов в катодном пятне вакуумной дуги является ее время горения τ_{arc} , которое должно превышать несколько эктонных циклов длительностью $\sim 25\text{-}30$ нс [2]. Поэтому на практике при обработке экспериментальных данных мы считали, что если $\tau_{arc} \geq 100$ нс, то дуга инициировалась и фиксировалось их количество N_{arc} . При этом время горения дуги τ_{arc} определялось на уровне от 1,1 до 0,9 от среднего значения тока дугового разряда i_{av} .

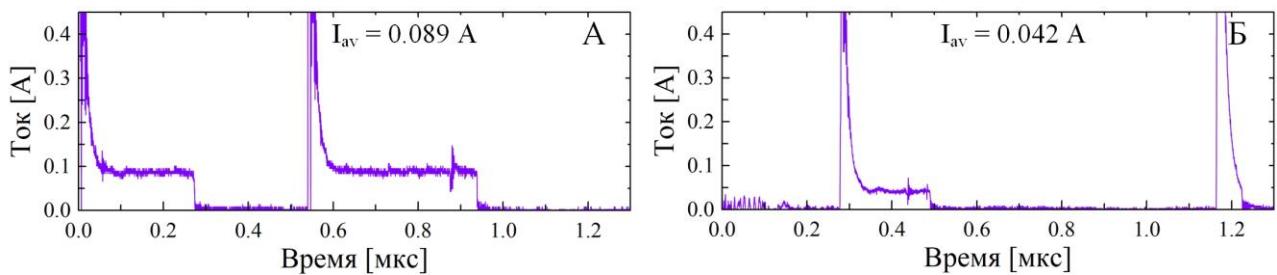


Рис. 5. Типичные осциллограммы электрического разряда в двухэлектродной системе с Cd катодом при различных токах дуги (указаны на графиках).

2. Результаты измерения тока обрыва вакуумной дуги и определение порогового тока дугового разряда

Результаты измерения тока обрыва вакуумной дуги для Cd электродов представлены на рис. 6 А. Всего было обработано 748 дуговых разрядов. Здесь же пунктирной линией показан линейная аппроксимация этих данных. Прежде всего отметим, что наклон линейного тренда практически незаметен. Это говорит о том, что проведенная подготовка электродов привела к получению стабильных свойств электродов в отношении горения вакуумной дуги.

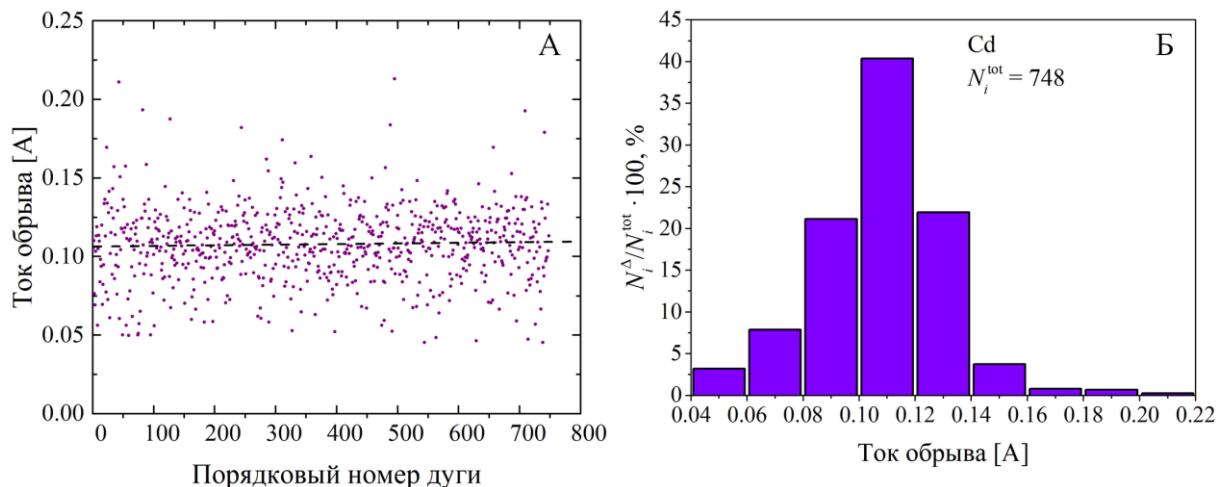


Рис. 6. А – результаты измерения тока обрыва вакуумной дуги для Cd катода, пунктирной линией показана линейная аппроксимация;
Б – гистограмма с распределением тока обрыва

Гистограмма распределения плотности вероятности погасания дуги от тока представлена на рис. 6. Здесь N_i^Δ – количество измерений с током обрыва попадающим в окно Δ , которое составляет 0,02 А, а N_i^{tot} – полное количество выполненных измерений. Согласно данным, представленным на рис. 6, для кадмия

большинство значений лежит в промежутке 0,06-0,16 А. Минимально зарегистрированное значение тока обрыва 0,045 А, а максимальное 0,213 А. Средний ток обрыва равен 0,108 А со стандартным отклонением 0,023 А. Значения порогового тока, определенного как наиболее вероятное значение составляет $0,11 \pm 0,01$ А. Эти данные ниже, чем у Кесаева 0,19 А [8].

2.1 Результаты измерения времени горения вакуумной дуги в зависимости от тока разряда вблизи пороговых значений

Всего для всех исследуемых токов разряда для вольфрамовых электродов зафиксировано 3205 дуг с длительностью больше 100 нс при регистрации 4771 пробоев, а для Cd катода. Подробная статистика показана в Таблице 1.

Рассчитанные по экспериментальным данным гистограммы вероятности горения дуги длительностью не менее 100 нс для различных интервалов значений тока представлены на рис. 7. Вероятность поджига дуги ~90 % соответствует пороговому току, который получили методом тока обрыва.

По данным, полученным в ходе эксперимента, можно определить среднее время горения дуги Θ [8] в диапазоне времен, не превосходящем длительность импульса генератора τ_G . Для этого нужно рассчитать гистограммы, которые определяют число дуг с длительностью горения большей чем t . Более подробно данный метод описан в [8,11]. Значения натурального логарифма гистограмм для различных i_{av} , построенных по полученным экспериментальным данным, представлены на рис. 8. Путем линейной аппроксимации получены средние времена горения дуги Θ , рассчитанные по тангенсу угла наклона к оси абсцисс кривых. Значения Θ для различных токов дуги указаны на рис. 8.

Таблица 1. Количество пробоев и дуговых разрядов для меди и вольфрама.

Диапазон среднего тока дуги, А	Количество пробоев	Количество дуг > 100 нс	Вероятность инициирования, %
0-0,04	1058	133	12,57
0,04-0,08	2074	1305	62,92
0,08-0,12	1009	952	94,35
0,12-0,16	264	260	98,4848
0,16-0,20	191	189	98,95
0,20-2,4	366	366	1

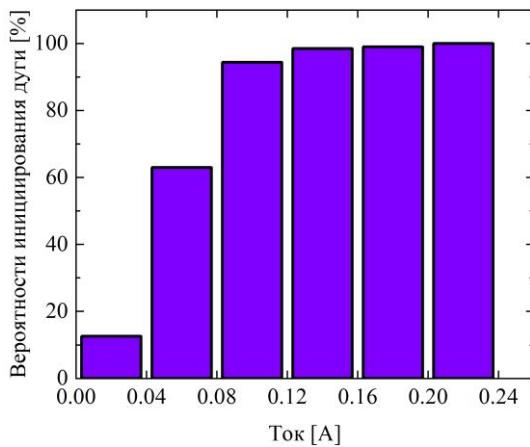


Рис. 7. Гистограммы вероятности горения дуги с длительностью не менее 100 нс.

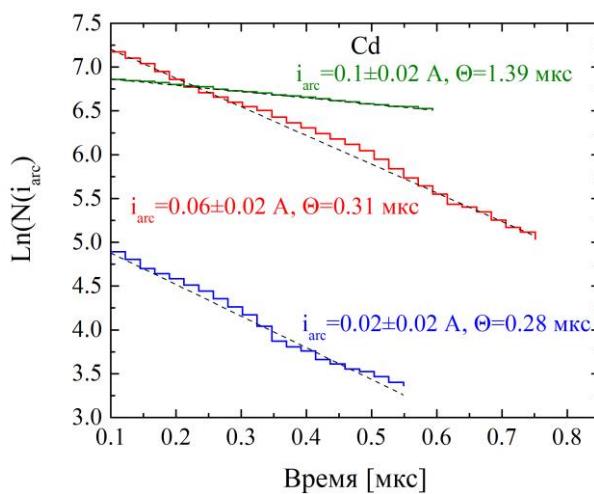


Рис. 8. Значения колонок гистограмм времени горения дуги.

Заключение

Предложены методики и проведен эксперимент по определению порогового тока, вероятности зажигания вакуумной дуги и среднему времени горения вакуумной дуги в зависимости от тока разряда для Cd катода. Было показано, что при неизменных условиях эксперимента ток обрыва вакуумной дуги сильно варьируется. Это связано с тем, что параметры зажигания и самоподдержания дуги зависят от состояния поверхности электродов непосредственно в ходе эксперимента. Поэтому значение порогового тока определяется как наиболее вероятное или среднее значение. Пороговый ток дуги для Cd катода равен 0.11 ± 0.01 А. В то же время существует ненулевая

вероятность зажигания дуги при токах, значительно меньших среднего порогового тока.

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

Литература

1. Boxman R. L., Sanders D. M., Martin P. J. (ed.). Handbook of vacuum arc science & technology: fundamentals and applications. – William Andrew, 1996.
2. Mesyats G. A. Cathode phenomena in a vacuum discharge: the breakdown, the spark and the arc. – Moscow: Nauka, 2000.
3. Mamontov Y. I. et al. Conditioning a Copper Cathode Surface by High-Voltage Subnanosecond Pulses //IEEE Transactions on Plasma Science. – 2024. – V. 52. – №. 9. – P. 4439-4449. <https://doi.org/10.1109/TPS.2024.3374898>
4. Helmersson U. et al. Ionized physical vapor deposition (IPVD): A review of technology and applications //Thin solid films. – 2006. – V. 513. – №. 1-2. – P. 1-24. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2006.03.033>
5. Inspektor A., Salvador P. A. Architecture of PVD coatings for metalcutting applications: A review //Surface and Coatings Technology. – 2014. – V. 257. – P. 138-153. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.08.068>
6. Brown I. G. Vacuum arc ion sources //Review of scientific instruments. – 1994. – V. 65. – №. 10. – P. 3061-3081. <https://doi.org/10.1063/1.1144756>
7. Barengolts S. A. et al. Explosive emission processes in thermonuclear facilities with magnetic plasma confinement and in linear electron–positron colliders //Phys. Uspekhi. – 2023. – V. 66. – P. 704-721. <https://doi.org/10.3367/UFNe.2022.02.039163>
8. Kesaev I. G. Cathode processes in electric arcs. – Moscow: Nauka, 1978 (in Russian).
9. Jüttner B. Cathode spots of electric arcs //Journal of Physics D: Applied Physics. – 2001. – V. 34. – №. 17. – P. R103. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/34/17/202>

10. Kajita S. et al. Formation process of tungsten nanostructure by the exposure to helium plasma under fusion relevant plasma conditions //Nuclear Fusion. – 2009. – V. 49. – №. 9. – P. 095005. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/49/9/095005>
11. Mikhailov P. S. et al. Threshold parameters of vacuum arcs with W-fuzz cathodes //Journal of Nuclear Materials. – 2023. – V. 582. – P. 154479. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2023.154479>

Для цитирования:

Михайлов П.С., Музюкин И.Л., Уйманов И.В., Шмелев Д.Л. Измерения порогового тока вакуумной дуги для кадмievого катода: ток обрыва и вероятность инициирования дуги. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.44>