

Оценка порогового тока вакуумной дуги на покрытии W-FUZZ путем вычисления вероятности установления разряда

И.Л. Музюкин^{1,*}, П.С. Михайлов¹, И.В. Уйманов¹, С.А. Баренгольц²

¹ИЭФ УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²ФИАН, Москва, Россия

**plasmon@mail.ru*

Аннотация. Для определения порогового тока на вольфрамовом катоде, покрытым наноструктурами W-FUZZ, была исследована вероятность получения стабильного вакуумного разряда. Для питания вакуумного разряда использовался кабельный генератор, генерирующий импульс продолжительностью 1.3 микросекунды с амплитудой 20 кВ. Используя ограничительные резисторы, ток разряда изменялся от 0.5 А до 0.05 А. Была оценена вероятность установления стабильного тока разряда после пробоя. Результаты статистической обработки показывают, что пороговый ток на W-FUZZ составляет 100 мА.

Ключевые слова: вакуумная дуга, катодное пятно, пороговый ток.

1. Введение

1.1. Эффект порогового тока вакуумной дуги

Впервые эффект порогового тока был описан в [1]. Этот эффект заключается в том, что существует такое значение дугового разряда, при котором дуга не может функционировать. Явление порогового тока может быть непосредственно связано с явлением внезапного обрыва тока дуги [2]. Обрыв тока дуги могут вызывать как условия в катодном пятне, так и условия в столбе разряда. В этом смысле невозможность горения разряда при токе ниже порогового может означать как невозможность функционирования катодного пятна (невозможность начать горение), так и стопроцентная вероятность погасания разряда в определенный период времени (невозможность продолжить). Все эти вопросы возникают при рассмотрении процесса горения дуги с наносекундным временным разрешением.

1.2. Экспериментальные исследования порогового тока

Первые исследования порогового тока дуги [2] проводились на аппаратуре, которая могла фиксировать процессы с временным разрешением в единицы микросекунд или даже миллисекунд. В этих исследованиях пороговый ток определялся по невозможности зажигания. Значение порогового тока представляло собой точно определенное число. Например, пороговый ток дуги на вольфраме определен в 1.6 А. В дальнейшем экспериментальные исследования порогового тока проводились с лучшим временным разрешением [3, 4]. В этих условиях при определении порогового тока он мог быть определен из статистического распределения погасания разряда при спадающем токе разряда конденсатора [4]. Оказалось, что существуют режимы горения дуги, при которых вероятность продолжения горения разряда в определенный временной период резко снижается. Таким образом эксперименты по определению порогового тока в наносекундном диапазоне ставят новые вопросы о природе явления порогового тока.

1.3. Теоретические модели катодного пятна, объясняющие пороговый ток

Теоретические модели катодного пятна в настоящий момент разделяются на стационарные и нестационарные.

Стационарные модели катодного пятна [5], как правило, сосредоточены на моделировании баланса потоков энергии в зоне катодного пятна для продолжения процессов испарения и ионизации катодного материала, которые, в свою очередь, обеспечивают функционирование всего разряда. В этих моделях как правило задается плотность тока, при

котором подобный баланс обеспечивается. Такие модели не могут описать процесс прекращения работы катодного пятна.

Нестационарные модели катодного пятна учитывают временные изменения условий в катодной поверхности по мере функционирования катодного пятна [6, 7]. Результатом моделирования всегда является прекращение функционирования КП в результате изменения баланса энергетических потоков в сторону охлаждения. Катодное пятно развивается из первоначального взрыва микроучастка катода при наличии тока, достаточного для взрыва этого микроучастка. Таким образом подобные модели естественным образом могут объяснить, как внезапное прекращение горения разряда [8], так и невозможность осуществления жизненного цикла катодного пятна.

1.4. Исследование условий горения дугового разряда на поверхности W-FUZZ

Одной из проблем создания устойчиво действующих термоядерных реакторов типа ТОКАМАК является появление униполярных дуговых разрядов на поверхностях конструкций. Появление на поверхности вольфрамовых конструкций слоя наноструктур названного W-FUZZ, существенно увеличивает вероятность появления униполярной дуги на такой поверхности. Были проведены ряд работ, исследовавших условия зажигания и устойчивости разряда на W-FUZZ покрытии [9, 10]. В результате были получены данные о том, что пороговый ток на W-FUZZ существенно снижен относительно порогового тока на чистом вольфраме. В этих исследованиях пороговый ток определялся по вероятности подхвата при иницировании дуги лазерным излучением [9] и вероятности погасания дугового разряда при достижении порогового тока в разряде конденсатора [4]. Эти исследования дали противоречивые результаты, которые можно объяснить влиянием множества дополнительных факторов на процесс зажигания и погасания дуги. В данном исследовании предпринята попытка исключить влияние столба разряда и внешней питающей цепи на функционирование катодного пятна. Для этого использовалась электродная коаксиальная система с расстоянием катод-анод около 50 мкм и питание разряда высоковольтным прямоугольным импульсом кабельного генератора.

2. Экспериментальная установка и методика обработки результатов

2.1. Экспериментальная установка

Эксперименты проводились в высоком безмасляном вакууме на вакуумной установке Varian. Схема установки представлена на Рис. 1 Разряд питался кабельным высоковольтным генератором с амплитудой импульса 15–30 кВ и длительностью 1300 нс. Дополнительных иницирующих электродов не применялось. Ток разряда регулировался резистором R4. Величина сопротивления резистора изменялась от 80 кОм до 300 кОм. Дополнительно в вакуумной части находился резистор R5 с сопротивлением 4 кОм. Анод был сделан из вольфрамовой проволоки диаметром 200 мкм. Расстояние от анода до поверхности катода составляло 30–50 мкм. Ток дуги регистрировался с помощью токового шунта R3 с сопротивлением 0.3 Ом. Ток регистрировался с помощью осциллографа Tektronix TDS684B. Катод представлял собой вольфрамовую пластину 10×10 мм, покрытую W-FUZZ. Условия получения этого покрытия описаны в [10]. Фотография катода после проведения исследований представлена на Рис. 2. На поверхности видны следы эрозии от разрядов. Так как W-FUZZ быстро испарялась разрядами приходилось постоянно перемещать анод вдоль поверхности катода. В каждом месте производилось не более 30 зажиганий дуги. Опытным путем было установлено, что после 100 разрядов на одном месте характер дугового разряда существенно изменяется.

Также для сравнения такие же измерения были проведены для чистого вольфрамового катода. Этот катод был очищен электрохимическим образом, прогрет проходящим током до температуры 1500 °К, и очищен многочисленными разрядами.

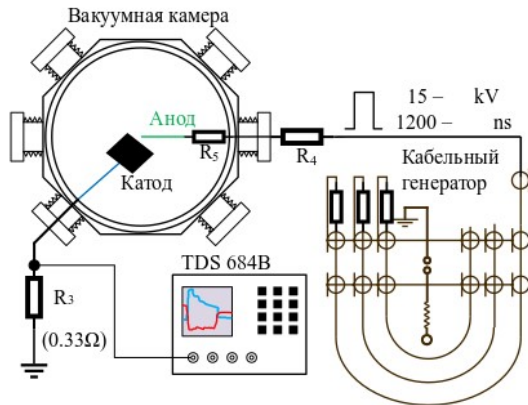


Рис. 1. Схема экспериментальной установки, системы питания разряда и регистрации разрядного тока.



Рис. 2. Фотография поверхности катода, покрытого FUZZ со следами эрозии.

2.2. Обработка результатов измерений

Главная идея методики определения порогового тока и характерного времени жизни дуги с использованием кабельного генератора состоит в том, что разряд горит при постоянном токе, так как кабельный генератор является стабилизатором тока. Типичная осциллограмма тока дуги представлена на Рис. 3. Для осуществления обработки ток стабилизации кабельного генератора определялся автоматически путем постройкой диаграммы токов для каждого импульса напряжения. Эта диаграмма представлена на Рис. 4 слева осциллограммы синим цветом.

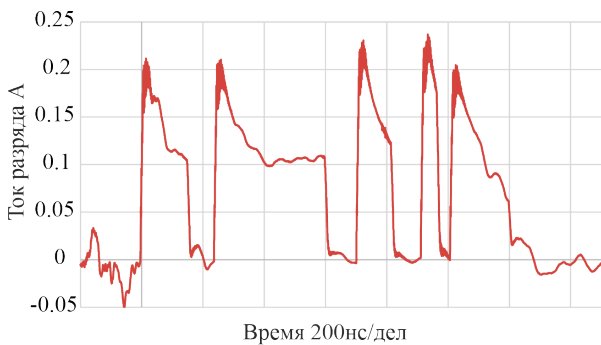


Рис. 3. Типичная осциллограмма дугового разряда на поверхности W-FUZZ.

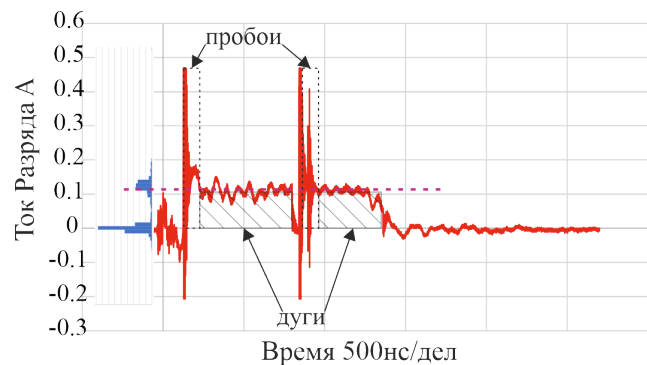


Рис. 4. Иллюстрация алгоритма обработки. Учитывались только разряды с током, близким к току стабилизации (заштрихованные участки).

Для определения тока стабилизации находился максимум в диаграмме токов, существенно превышающий нулевой уровень. Уровень тока стабилизации представлен на Рис. 4 фиолетовой прерывистой линией.

После определения уровня стабилизации находились все пробои на осциллограмме. Это делалось путем отслеживания скачков тока с нулевого уровня. Особенностью процесса первоначального пробоя и последующих вторичных пробоев после погасания дуги является резкий всплеск тока до уровня в несколько раз превышающий ток стабилизации с

последующей релаксацией к току стабилизации. Этот процесс обусловлен разрядом паразитных емкостей катода и анода.

Для анализа процесса подхвата после найденного пробоя отслеживался процесс возвращения тока к уровню стабилизации и после этого начинался отсчет времени горения дуги.

Главным вопросом на данном этапе является вопрос перехода к дуговой стадии разряда. Детальнее этот вопрос можно переформулировать следующим образом: сколько должен прогореть разряд при токе стабилизации, чтобы можно было считать его установившейся дугой. На это вопрос мы ответили исходя из эктонной модели катодного пятна. Известно, что длительность эктонного цикла составляет 20–30 нс [2]. Следовательно, для перехода к дуговому разряду необходимо последовательное выполнение нескольких эктонных циклов. Нами были для сравнения выбраны длительности 20 нс и 100 нс.

После того как все осциллограммы серии были обработаны следующим способом: формировался текстовый файл со следующими столбцами: 1 ток стабилизации 2 количество пробоев 3 количество дуг. В строках содержалась статистика по одному импульсу напряжения.

Этот файл в дальнейшем анализировался в программе Excel с помощью макроса. Получалась статистика для каждого интервала тока по соотношению количества дуг к количеству пробоев.

3. Результаты измерений и обработки.

Результаты обработки осциллограмм для вольфрамового катода и катода, покрытого FUZZ представлены на Рис. 5 и Рис. 6. Вследствие того, что покрытие FUZZ быстро расходуется общее количество разрядов оказалось ограничено и составило 300 дуговых разрядов. Количество разрядов на чистом вольфраме было ограничено только временем, необходимым для набора статистики. Количество разрядов на чистом вольфраме достигло 5000.

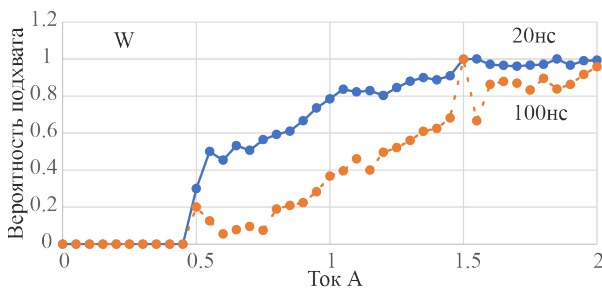


Рис. 5. Диаграмма вероятности установления дуги на вольфрамовом катоде.

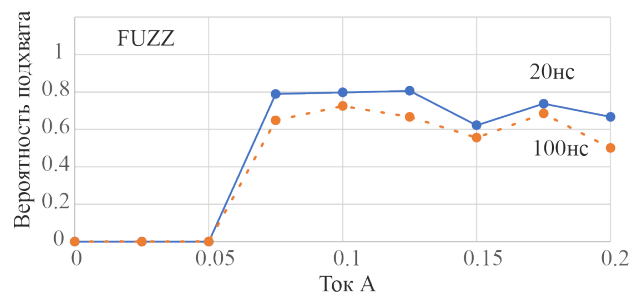


Рис. 6. Диаграмма вероятности установления дуги на покрытии W-FUZZ.

Из диаграмм следует, что можно определить два типа порогового тока: 1 – статистическое значение порогового тока, которое означает малую вероятность горения дугового разряда в течение нескольких циклов катодного пятна; 2 – физическое значение порогового тока, которое обозначает абсолютную невозможность функционирования катодного пятна.

Можно утверждать, что статистическое значение порогового тока для чистого вольфрама равно порядка 1.5 А. Физическое значение порогового тока равно 0.5 А. Статистическое значение порогового тока для W-FUZZ равно порядка 120 мА. Физическое значение порогового тока равно 50 мА. При этом при установлении тока в 50 мА прекращались не только дуговые разряды, но и пробой вакуумного промежутка.

Можно предположить, что методы, основанные на статистической обработке погасаний или стабилизации, позволяют оценить именно статистическое значение порогового тока. Физическое значение порогового тока возможно оценить при использовании методов с наносекундным разрешением. При этом физическое значение порогового тока может быть в разы меньше статистического значения.

4. Выводы

В результате проведенного анализа были получены значения порогового тока на поверхности W-FUZZ. Статистически определенным значением оказался ток 120 мА. При этом значение тока, при котором функционирование катодного пятна абсолютно невозможно составляет 50 мА

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда N. 20-19-00323-Р, <https://rscf.ru/project/23-19-45034/>

5. Литература

- [1] И.Г. Кесаев, *Катодные процессы электрической дуги*. Москва: Наука, 1968.
- [2] G.A. Mesyats, *Cathode Phenomena in a Vacuum Discharge: the Breakdown, the Spark and the Arc*. Moscow: Nauka, 2000.
- [3] R.L. Boxman, D. Haber, D. Sanders, and P.J. Martin, *Handbook of Vacuum Arc Science & Technology: Fundamentals and Applications*. Park Ridge: Noyes Publications, 2008.
- [4] 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 Materials*, vol. **582**, 154479, 2023, doi: 10.1016/j.jnucmat.2023.154479
- [5] E. Hantzsche, Theories of cathode spots, *R.L. Boxman, P.J. Martin, D.M. Sanders, Handbook of Vacuum Arc Science and Technology 1st Edition, Park Ridge: Noyes Publications*, 201, 1995.
- [6] S.A. Barenholts, G.A. Mesyats, M.M. Tsventoukh, The ecton mechanism of unipolar arcing in magnetic confinement thermonuclear devices, *Nucl. Fusion*, vol. **50**, 125004, 2010, doi: 10.1088/0029-5515/50/12/125004
- [7] I.V. Uimanov, A two-dimensional nonstationary model of the initiation of an explosive center beneath the plasma of a vacuum arc cathode spot, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. **31**, 822, 2003, doi: 10.1109/TPS.2003.818435
- [8] S.A. Barenholts, G.A. Mesyats, A.G. Chentsov, Spontaneous extinguishing of a vacuum arc in terms of the ecton model, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. **27**, 817, 1999, doi: 10.1109/27.782244
- [9] S.A. Barenholts, D. Hwangbo, S. Kajita, N. Ohno, V.P. Frolova, A.G. Nikolaev, E.M. Oks, D.L. Shmelev, M.M. Tsventoukh, G.Yu. Yushkov, Dynamics of the changes in the parameters of the arc plasma during the destruction of a helium-induced tungsten fuzz by arc pulses, *Nucl. Fusion*, vol. **60**, 044001, 2020, doi: 10.1088/1741-4326/ab73c3
- [10] V.O. Ogorodnikova, K.S. Klimov, A.G. Poskakalov, A.V. Kaziev, M.M. Kharkov, V.S. Efimov, Yu. M. Gasparyan, N.V. Volkov, V. Kh. Alimov, M. Tokitani, Deuterium and helium retention in W with and without He-induced W ‘fuzz’ exposed to pulsed high-temperature deuterium plasma, *J. Nucl. Mater.*, vol. **515**, 150, 2019, doi: 10.1016/j.jnucmat.2018.12.023