

**INVESTIGATION OF TRANSIENT PROCESSES IN A VACUUM ARC
WITH A SHARP VOLTAGE INCREASE**

*Ilya Lvovich Muzyukin ^a, Pavel Sergeevich Mikhailov,
Dmitry Leonidovich Shmelev, Igor Vladimirovich Uimanov*

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

^a plasmon@mail.ru

ABSTRACT

The work is devoted to the study of transient processes in a vacuum arc discharge with a sharp change in power supply parameters. For this purpose, an experimental setup was developed and assembled that allows the arc discharge to be powered using pulses shaped like a stage. The pulse contained areas with constant voltage and areas with a sharp transition to a new voltage level. The duration of such transitions was less than 10 ns. Transient processes at the front of the arc current and plasma glow were investigated. As a result of the experiments, it was revealed that the arc current practically does not differ from the short-circuit current under the same conditions. At the same time, the plasma glow after a sharp increase in current and voltage contains a series of pulses of increasing intensity with durations from 30 to 50 ns. This behavior of the arc discharge can be explained by the synchronization of the life cycles of the cathode spot cells (“ecton” processes).

KEYWORDS

Cathode spot; vacuum arc; explosive electron emission.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ВАКУУМНОЙ ДУГЕ
ПРИ РЕЗКОМ СКАЧКЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ**

*Илья Львович Музюкин ^a, Павел Сергеевич Михайлов,
Дмитрий Леонидович Шмелев, Игорь Владимирович Уйманов*

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

^a plasmon@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена исследованию переходных процессов в вакуумном дуговом разряде при резком изменении параметров питания. Для этого была разработана и собрана установка, позволяющая производить питание дугового разряда с помощью импульсов, имеющих форму ступени. Импульс содержал участки с постоянным напряжением и участки с резким пере-

ходом на новый уровень напряжения. Длительность таких переходов составляла менее 10 нс. Исследовались переходные процессы на фронте тока дуги и свечения плазмы. В результате проведенных экспериментов было выявлено, что ток дуги практически не отличается от тока короткого замыкания при тех же условиях. При этом свечение плазмы после резкого роста тока и напряжения содержит серию возрастающих по интенсивности импульсов длительностью от 30 до 50 нс. Подобное поведение дугового разряда может быть объяснено синхронизацией жизненных циклов ячеек катодного пятна (эктонных процессов).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Катодное пятно; вакуумная дуга; взрывная электронная эмиссия.

Введение

Дуговой разряд имеет важное значение для различных технологических процессов [1–3], применяется в исследованиях плазмы [4, 5] и как источник ионов в первых каскадах ускорителей частиц [6, 7]. Практически во всех этих процессах используется импульсная дуга, имеющая длительность от единиц микросекунд до сотен миллисекунд. В случае импульсных дуг становятся существенными нестационарные процессы, которые сопровождают инициирование дуги, нестабильность разряда дуги и ее внезапное погасание. Нестационарные процессы в дуге имеют важное значение из-за самой нестационарной природы дугового разряда. Нестационарная природа разряда обусловлена нестационарностью ключевого компонента дугового разряда – катодного пятна. Нестационарность катодного пятна была выявлена исследовательской группой Месяца [8]. Основными свидетельствами в пользу нестационарности катодного пятна являются наличие отдельных эрозионных кратеров на поверхности катода [9], нестационарный характер тока и напряжения дуги [10, 11], а также нестационарный характер потока ионов из области катодного пятна [12, 13]. На основании этих экспериментальных данных была разработана взрывная «эктонная» модель катодного пятна [14, 15]. В этой модели в отличие от стационарных

эрозионно-эмиссионных моделей [16, 17] испарение и ионизация материала катода осуществляется не на поверхности катода, а в результате нагрева и взрыва микрообъема участка катода. Такой характер генерации плазмы обуславливает нестационарность и неустойчивость всего дугового разряда. Эктонная модель может легко объяснить неустойчивость параметров дуги и ее внезапное погасание [18], что является неразрешимой задачей для стационарных моделей.

Для нестационарной модели катодного пятна характерны период разогрева материала катода и период взрыва и генерации плазмы. Следствием такого механизма функционирования является время задержки пробоя при подаче высокого напряжения на разрядный промежуток [19]. Это время задержки необходимо для разогрева микроучастков катода, после чего начинается генерация плазмы и резкий рост тока. Кроме того, для процессов пробоя характерна неустойчивая фаза роста тока, когда на общую тенденцию роста накладываются возрастающие колебания [20]. Эти колебания могут быть следствием периодических синхронных повторений жизненных циклов катодных пятен.

Основной целью данной работы являлось выявление возможной взрывной структуры генерации плазмы для осуществления вакуумного дугового разряда. Для этого предполагалось резко увеличивать напряжение питания во время стационарного горения

разряда. Реакцию параметров разряда на скачок напряжения планировалось исследовать с помощью записи осциллограмм тока и свечения разряда.

1. Экспериментальная аппаратура и методика

Экспериментальная установка была собрана на основе вакуумного поста Varian VT-109, который обеспечивал безмасляный вакуум на уровне 10^{-8} мм рт.ст. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Все электрические вводы в вакуумную камеру имели коаксиальное исполнение вплоть до места вакуумного разряда. Катод и инициирующий электрод подвергались механической очистке и химическому травлению. Катод перед проведением экспериментов дополнительно очищался вакуумными разрядами длительностью 20 мкс и амплитудой тока 10 А с помощью вспомогательного анода (рис. 2). Диаметр катода составлял 200 мкм, анод подводился к катоду сбоку

с верхней части цилиндрической поверхности. Анод, на который подавался ступенчатый высоковольтный импульс напряжения, был острым. Непосредственно перед острием в вакууме был расположен керамический резистор с сопротивлением 3,9 кОм.

Питание разряда осуществлялось с помощью кабельного многоканального высоковольтного генератора (рис. 1). В данном исследовании использовались два кабеля длительностью 1,3 мкс и 500 нс. Эти кабели соединялись с помощью коаксиального высоковольтного тройника. Этот тройник обеспечивал безотражательное смешение двух высоковольтных импульсов в один. Он располагался непосредственно на входе в вакуумную камеру.

Импульс длиной 1,3 мкс и амплитудой 15 кВ подавался в тройник без задержки. В самом тройнике на входе первого импульса могло ставиться сопротивление 75 Ом для изменения соотношения амплитуд низкой и высокой части ступенчатого импульса.

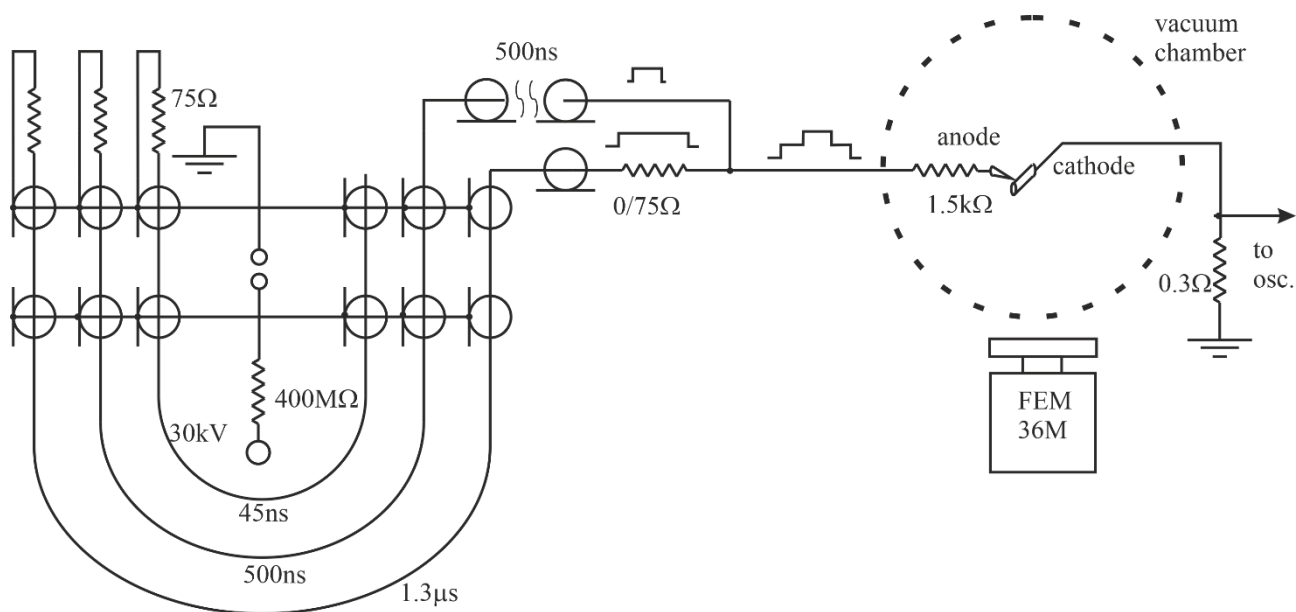


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Fig. 1. The experimental setup

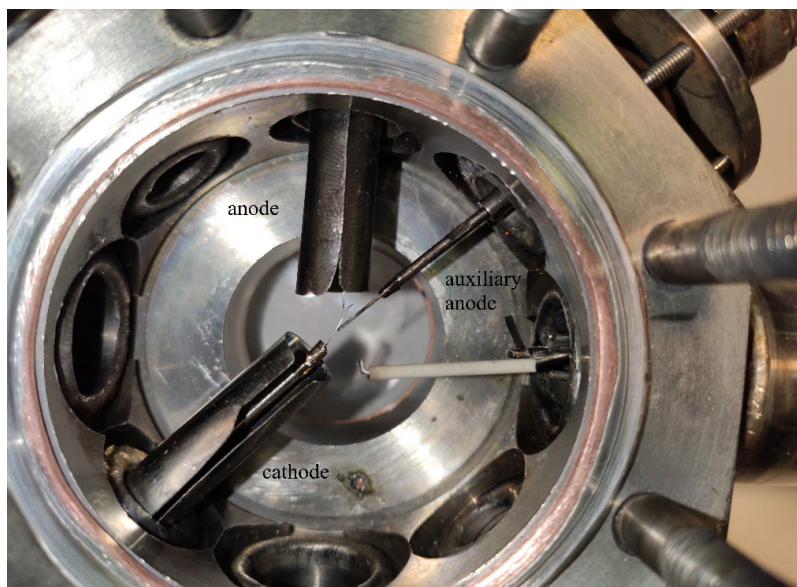


Рис. 2. Фотография разрядной камеры

Fig. 2. The photo of discharge chamber

Второй импульс длительностью 500 нс и амплитудой 15 кВ подавался через кабельную линию задержки, длиной 500 нс. В тройнике каждый импульс разделялся на две части: одна часть направлялась в вакуумную камеру, а вторая часть возвращалась в генератор по другому каналу. Если в тройнике присутствовал резистор 75 Ом, то импульсы делились неравномерно. Таким образом появлялась возможность исследовать два варианта ступенчатого импульса: 7,5/15 кВ и 5/15 кВ.

Ток разряда регистрировался в цепи катода с помощью резистивного шунта 0,3 Ом.

Свечение плазмы регистрировалось с помощью фотоэлектронного умножителя ФЭУ-36. Этот умножитель позволял получить временное разрешение на уровне 8 нс.

2. Результаты экспериментов

Типичные осциллограммы тока и свечения плазмы представлены на рис. 3, 4.

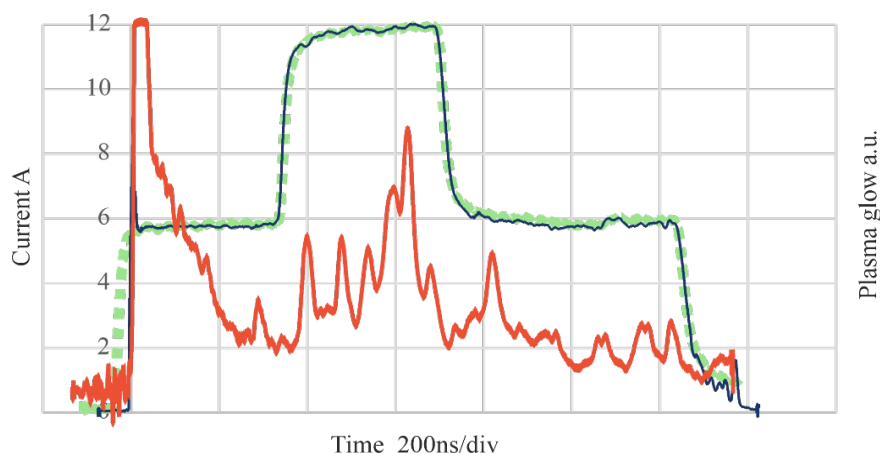


Рис. 3. Осциллограммы тока и свечения плазмы для импульса 7,5/15 кВ. Свечение плазмы – широкая красная линия. Прерывистая линия – осциллограмма тока для короткого замыкания

Fig. 3. The waveforms of current and plasma glow for a 7.5/15 kV pulse. Plasma glow is a wide red line. A dashed line is a waveform of the current for a short circuit

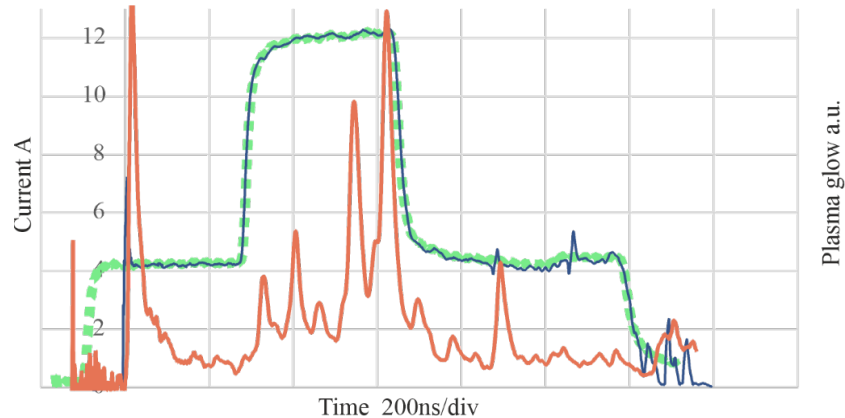


Рис. 4. Осциллограммы тока и свечения плазмы для импульса 5/15 кВ. Свечение плазмы – широкая красная линия. Прерывистая линия – осциллограмма тока для короткого замыкания

Fig. 4. The waveforms of current and plasma glow for a 5/15 kV pulse. Plasma glow is a wide red line. A dashed line is a waveform of the current for a short circuit

На осциллограммах (рис. 3, 4) представлены сигналы тока (тонкая синяя линия) тока короткого замыкания (прерывистая зеленая линия) и свечения плазмы (широкая красная линия).

Первый факт, который вытекает из измерений, – это точное следование тока дуги току короткого замыкания. В данном исследовании не было случая, чтобы ток дуги заметно отличался от тока КЗ. Единственным несущественным отличием является наличие незначительных колебаний на дуговом токе, тогда как ток КЗ стабилен.

Основной неожиданностью явился характер свечения плазмы. Свечение плазмы в основной части измерений после прихо-

да второй части импульса имеет импульсный характер. На осциллограмме свечения присутствуют интенсивные всплески амплитудой примерно равной постоянной составляющей сигнала. Кроме того, амплитуда этих всплесков растет в течение 300–400 нс и чаще всего после этого начинает снижаться.

При этом на стабильной части токового импульса всплески свечения чаще всего встречаются при попытке дуги погаснуть и последующем восстановлении горения (рис. 4).

В отдельных случаях наблюдалось относительно плавное увеличение свечения в течение 300–400 нс с последующим падением интенсивности (рис. 5).

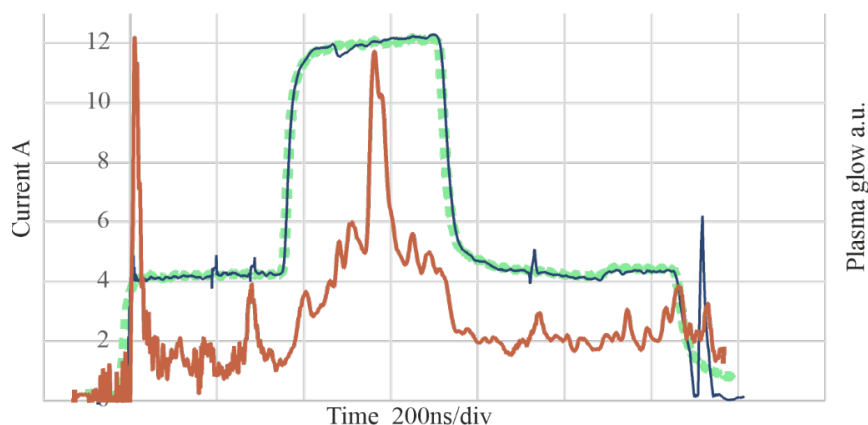


Рис. 5. Осциллограммы тока и свечения плазмы в случае плавного возрастания интенсивности. Импульс 5/15 кВ. Свечение плазмы – широкая красная линия. Прерывистая линия – осциллограмма тока для короткого замыкания

Fig. 5. The waveforms of current and plasma glow in the case of relatively smooth glow rising. Pulse parameters 5/15 kV. Plasma glow is a wide red line. A dashed line is a waveform of the current for a short circuit

Таким образом, можно констатировать, что ток разряда при резком скачке напряжения ведет себя как ток короткого замыкания. При этом свечение плазмы показывает существенные особенности относительно стационарного разряда. Свечение плазмы после прихода скачка напряжения содержит возрастающие по интенсивности всплески до времени около 300–400 нс. После этого интенсивность всплесков, как правило, снижается.

3. Обсуждение

Результаты экспериментов указывают на существенную нестационарность процессов в вакуумной дуге. При этом важно, что эта нестационарность не сказывается на токе дуги. Дуговой промежуток с электрической точки зрения ведет себя как обычный проводник. При этом свечение плазмы показывает особенности при скачке питающего напряжения. Если допустить стационарную природу катодного пятна, то свечение плазмы должно увеличиваться с увеличением процессов испарения и ионизации в стационарных пятнах. Этот процесс также должен протекать плавно хоть и с некоторой задержкой. В представленных экспериментах свечение плазмы, а значит и процессы генерации плазмы происходят импульсно. Такое поведение может быть описано с помощью взрывной модели катодного пятна. Ток дуги определяется наличием достаточного количества плазмы, так что при небольшом расстоянии между катодом и анодом плазмы может хватить для проведения удвоенного и утроенного тока. При этом на катоде появляются условия для возникновения новых катодных пятен. Так как эти катодные пятна начинают возникать одновременно в результате роста тока, то их жизненные циклы получают синхронизованы всплеском тока. Синхронизация взрывных процессов и приводит к явным интенсивным всплескам на сигнале свечения плазмы. В дальнейшем при отсут-

ствии изменений в токе взрывные процессы в катодных пятнах рассинхронизируются и интенсивность всплесков падает.

Выводы

Поведение параметров дугового разряда при скачкообразном изменении напряжения питания позволяет выявить взрывной характер генерации плазмы в катодных пятнах. Это становится возможным в результате синхронизации эктонных циклов при резком росте тока разряда.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kuang-Oscar Yu. Modeling for Casting & Solidification Processing. (Materials Engineering). CRC Press, 2001. P. 720.
2. Anders A. Cathodic Arcs: From Fractal Spots to Energetic Condensation. New York: Springer, 2008.
3. Eichmeier J. A., Thumm M. K. (eds). Vacuum Electronics: Components and Devices. Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2008. P. 408. DOI: 10.1007/978-3-540-71929-8.
4. Schuelke T., Becker M., Grotjohn T. A., Asmussen J. The vacuum arc plasma source and its applications // The 31st IEEE International Conference on Plasma Science. ICOPS 2004. IEEE Conference Record – Abstracts. (Baltimore, MD, USA), 2004. P. 309–312. DOI: 10.1109/PLASMA.2004.1339993.
5. Miernik K. Vacuum Arc Plasma Sources // High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes. 2001. V. 5, Iss. 3. P. 365–380. DOI: 10.1615/HighTempMatProc.v5.i3.10 10.1109/27.249640 0.
6. Brown I. G. Vacuum arc ion sources for particle accelerators and ion implantation // IEEE Transactions on Plasma Science. 1993. V. 21, No. 5. P. 537–546. DOI: 10.1109/27.249640.

7. Brown I. G. Vacuum arc ion sources // *Rev Sci Instrum.* 1994. V. 65, Iss. 10. P. 3061–3081. DOI: 10.1063/1.1144756.
8. Mesyats G. A., Proskurovsky D. I. *Pulsed Electrical Discharge in Vacuum.* Heidelberg: Springer Berlin, 2012. P. 293.
9. Juttner B. Erosion craters and arc cathode spots in vacuum. // *Plasma Phys.* 1979. V. 19, No. 1. P. 25–48. DOI: 10.1002/ctpp.19790190104.
10. 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.
11. Bochkarev M. B. Noise measurements of vacuum arc cathode spot lifetime // *Proceedings of 17th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, (Berkeley, CA, USA), 1996.* V. 1. P. 151–154. DOI: 10.1109/DEIV.1996.545339.
12. Muzyukin I. L. Measurement of time dependence of energy and mass-charge composition of ion flux in short vacuum arc with nanosecond resolution // *Phys. D: Appl. Phys. J.* 2018. V. 51. Article number 315202. DOI: 10.1088/1361-6463/aacfbf.
13. Muzyukin I. The “Ecton” Nature of Ion Flow of the Low Current Vacuum Arc // *Conference: 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE), 2020.* DOI: 10.1109/EFRE47760.2020.9241946.
14. Mesyats G. A. Ecton mechanism of the vacuum arc cathode spot // *IEEE Transactions on Plasma Science.* 1995. V. 23, No. 6. P. 879–883. DOI: 10.1109/27.476469.
15. Shmelev D. L., Litvinov E. A. The computer simulation of the vacuum arc emission center // *IEEE Transactions on Plasma Science.* 1997. V. 25, No. 4. P. 533–537. DOI: 10.1109/27.640661.
16. Beilis I. I. The vacuum arc cathode spot and plasma jet: Physical model and mathematical description // *CPP.* 2003. V. 43, Iss. 3–4. P. 224–236. DOI: 10.1002/ctpp.200310018.
17. Lafferty J. M. *Vacuum Arcs. Theory and Application.* John Wiley & Sons Inc, 1980. P. 372.
18. Barendolts S. A. Structure and time behavior of vacuum arc cathode spots // *IEEE Transactions on Plasma Science.* 2003. V. 31, Iss. 5. P. 809–816. DOI: 10.1109/TPS.2003.818449.
19. Dyke W. P., Trolan J. K., Martin E. E., Barbour J. P. The Field Emission Initiated Vacuum Arc // *I. Experiments on Arc Initiation. Phys. Rev.* 1953. V. 91. Article number 1043.
20. Карцев Г. К., Месяц Г. А., Проскуровский Д. И., Ротштейн В. П., Фурсей Г. Н. Исследование временных характеристик перехода автоэлектронной эмиссии в вакуумную дугу // *Докл. АН СССР.* 1970. Т. 192, № 2. С. 309–312.