

Исследование расширения ионного потока плазмы сильноточной вакуумной дуги

П.С. Михайлов*, И.Л. Музюкин, И.В. Уйманов, Д.Л. Шмелев, Ю.А. Земсков, С.А. Чайковский

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

**gmgm01@mail.ru*

Аннотация. В данной работе показана методика и результаты исследования потока ионов плазмы сильноточной вакуумной дуги. Для питания дуги использовался импульс амплитудой до 12 кВ (13 кА) и длительностью 13 мкс на полувысоте. Разряд создавался в плоском осесимметричном разряднике с медным цилиндрическим катодом диаметром 4 мм и молибденовым анодом. Использовались малогабаритные коллекторные датчики для получения диаграмм плотности ионного тока от угла и времени. Показано, что максимум ионного тока находится в узком телесном угле 20°.

Ключевые слова: вакуумная дуга, плазма, ионный поток.

1. Введение

Одно из основных свойств источника ионов на основе вакуумного дугового разряда это стабильные хорошо воспроизводимые параметры. В работе [1] показано, что параметры дуги стабилизируются через десятки микросекунд. Поэтому промышленные источники ионов используют длинные сильноточные импульсы для питания разряда [2]. Таким образом для создания надежного источника ионов с повторяющимися стабильными параметрами необходимо использовать импульс >100 мкс. Источники такого типа хорошо изучены, поскольку именно таким источникам посвящено большое количество работ.

Источники ионов на основе короткой вакуумной дуги также могут быть использованы в промышленности и в научных исследованиях. Эти источники будут иметь преимущество для кратковременных процессов. В таких процессах длинный вакуумный разряд не нужен или даже вреден. В частности, такие процессы используются для импульсных источников нейтронов [3]. Также коротко импульсный источник используется для создания плазменного цилиндра для получения процесса пинчевания [4–7]. В этом случае процесс развития пинча занимает несколько микросекунд от начала горения разряда в источнике ионов. В этом процессе плазма источника существенно нестационарна. Температура, концентрация и зарядовый состав плазмы может существенно меняться со временем в области, где происходит сжатие плазменного шнура. Этот факт может принести сложность для создания установки со стабильными параметрами. Однако если надежно установить временные зависимости концентрации, скорости, массового и зарядового состава плазмы в области пинча, то можно получить возможность для регулирования параметров установки в зависимости от времени задержки импульса пинча от начала функционирования разряда источника ионов.

В данной работе мы продолжаем исследовать различные конфигурации разрядной системы при одинаковом импульсе питания дуги. В работе [8] использовалась плазменная пушка с закрытым анод-катодным зазором и с диаметром катода и внутренним диаметром анода 2 мм. Катодная система в данной работе является модификацией системы [9, 10] с увеличенным диаметром катода до 4 мм и неизменным размером анода (прошлых работах диаметр катода 1.5 мм).

2. Экспериментальное оборудование и методика исследования

Эксперимент проводился в высоковакуумных условиях при давлении остаточных газов порядка 10^{-7} мм рт. ст. Общая схема экспериментальной установки показана на Рис. 1. Разряд по поверхности диэлектрика создавался в плоском осесимметричном разряднике. Схема

разрядника приведена на Рис. 2. В несущий, заземленный стальной диск вставлен кольцевой сменный анод, выполненный из молибдена. В центре отверстия анода расположен цилиндрический наконечник катода, выполненный из меди. Между электродами расположен полиэтиленовый изолятор в виде диска с цилиндрическим выступом. Размеры частей разрядника, находящихся непосредственно в зоне разряда, приведены в мм на Рис. 2. Узел разрядника был закреплен на штоке манипулятора, который позволял вращать разрядник относительно вертикальной оси на ± 110 град. с точностью 0.1 град.

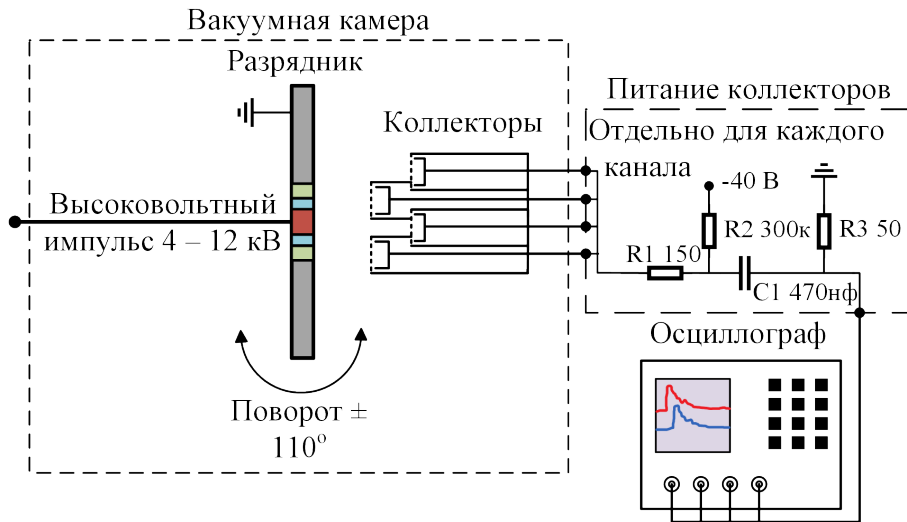


Рис.1. Схеа экспериментальной установки.

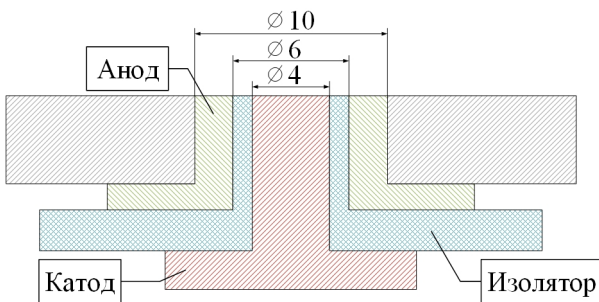


Рис. 2. Схема разрядника, размеры в мм. Анод изготовлен из молибдена, катод из меди, диэлектрик из полиэтилена.

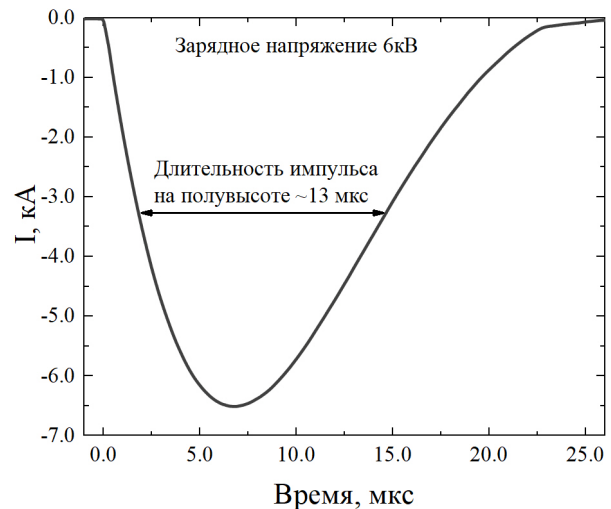


Рис. 3. Пример импульса тока разряда. Зарядное напряжение 6 кВ.

Источником импульсов высокого напряжения выступал емкостной накопитель энергии. Батарея конденсаторов заряжалась постоянным положительным напряжением относительно земли. Максимальное значение напряжения ограничивалось 13 кВ. При замыкании ключа положительная обкладка конденсатора оказывалась под потенциалом земли, в результате на катод приходил импульс отрицательной полярности, вызывающий пробой по поверхности в разряднике. Для измерения высоковольтного импульса был использован пояс Роговского, сигнал с которого затем интегрировался численно. Пример проинтегрированного сигнала с

индуктивного датчика приведен на Рис. 3. Данный импульс тока получен при зарядном напряжении источника 6 кВ.

Для получения сигнала ионов использовались малогабаритные коллекторные датчики. Схема подключения датчиков и расположения приведена на Рис. 1. В данной работе использовано 4 одинаковых коллектора детектора, расположенных парами напротив разрядника на расстоянии 16.5 см и 21.4 см от разрядника. Расстояние между датчиками составляло 5 мм. Корпус датчика выполнен из латунной трубки диаметром 4 мм, на входе располагалась заземленная медная сетка с 9 отверстиями диаметром 200 мкм. Коллектор ионов располагался на расстоянии 4 мм от сетки и был выполнен в виде чаши Фарадея с диаметром 2 мм. На него подавалось напряжение -40 В для того, чтобы отсеять основную часть электронов. Сигнал с датчиков записывался на многоканальный осциллограф.

3. Результаты

На Рис. 4 и Рис. 5. показаны диаграммы плотности ионного тока в зависимости от угла и времени, при зарядном напряжении 6 кВ и 12 кВ. Измерения производились каждые 5 градусов от 0° до 90° по 10 импульсов на угол. На диаграммах представлены усредненные данные с ближних детекторов (расстояние между детектором и разрядным промежутком 16.5 см). Усреднение происходило по 10 импульсам на одном детекторе и после этого между двумя детекторами, находившимися на одном расстоянии.

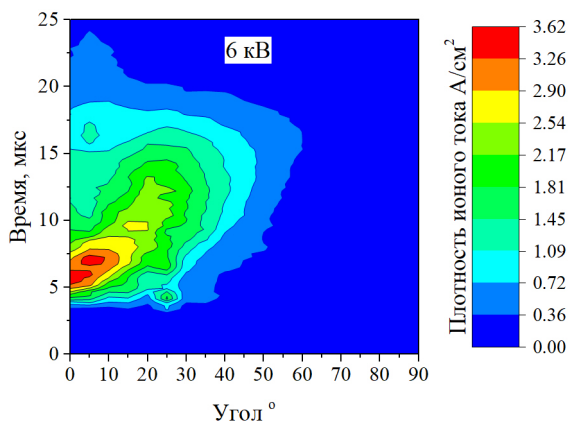


Рис. 4. Диаграмма плотности ионного тока в зависимости от угла и времени. Зарядное напряжение 6 кВ.

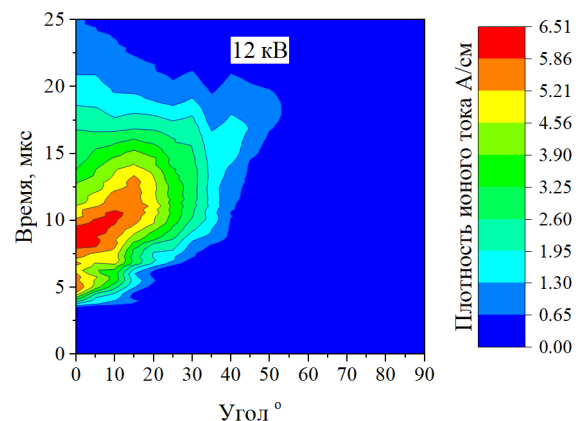


Рис. 5. Диаграмма плотности ионного тока в зависимости от угла и времени. Зарядное напряжение 12 кВ.

По диаграммам видно, что ионный ток распространяется в широком угле до 50° . Максимум плотности ионного тока достигается при телесном угле 10° для 6 кВ и 15° для 12 кВ. Максимальная плотность ионного тока для 6 кВ – 3.62 A/cm^2 , а для 12 кВ – 6.51 A/cm^2 .

На Рис. 6 изображены диаграммы плотности ионного тока в разные промежутки времени: от 4 мкс до 18 мкс. Плазма достигает детектора в 4 мкс, после этого поток ионов распространяется в узком телесном угле с максимумом на 0° . После 7 мкс угол распространения ионов расширяется, и к 12 мкс максимум ионного тока находится в угле от 20° до 10° . Из диаграммы можно сделать вывод, что поток ионов при зарядном напряжении 12 кВ более стабильный чем при 6 кВ. В случае 12 кВ, при достижении около максимальных значений плотности тока ($\sim 90\%$) на 5 мкс в следующие 7 мкс минимум 70% ионного тока сохраняются на угле 0° и только после 13 мкс ионный ток начинает значительно падать. При 6 кВ максимум ионного тока сохраняется при угле 0° с 5 мкс по 8 мкс, после этого к 10 мкс на 0° остается $\sim 50\%$ от максимума.

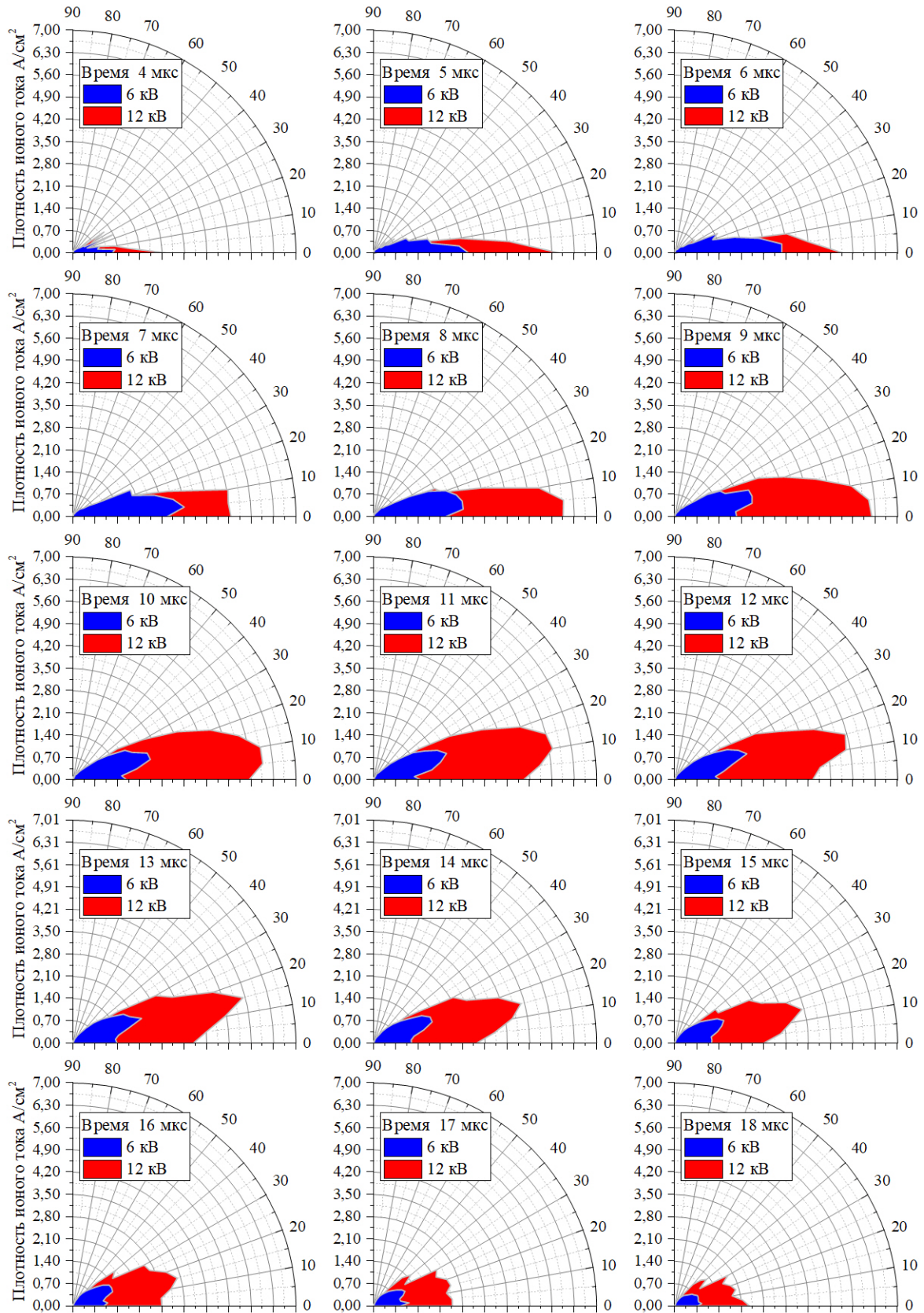


Рис. 6. Полярная диаграмма плотности ионного тока для временного промежутка 4–18 мкс. Зарядное напряжение 12 кВ красный цвет и 6 кВ синий цвет.

4. Выводы

В результате исследования потока ионов плазмы сильноточной вакуумной дуги видно, что ионный ток распространяется в широком угле до 50° . Максимум тока находится в более узком телесном угле 20° . При увеличении тока дуги с 6 кА до 13 кА максимальная плотность ионного тока возрастает в 1.8 раз, а длительность пока ионов при угле 0° с 4 мкс до 8 мкс.

Результаты данной работы сильно отличаются от [8–10], при одинаковом импульсе питания дуги. В [8] используется конструкция разрядного промежутка в виде плазменной пушки с замкнутым катод анодным промежутком, где плазма вылетала из отверстия в аноде. Максимум плотности тока в той работе также лежит в узком телесном угле 20° , но длительность потока ионов там значительно меньше ~ 1.5 мкс.

В работах [9, 10] разрядный промежуток коаксиальный плоский как в данной статье, но с другим диаметром катода 1.5 мм. При меньшем диаметре катода максимум ионного тока был значительно растянут и наблюдался в угле от 0° до 45° . В целом ионный ток разряда был менее стабильным. Увеличение диаметра катода с 1.5 до 4 мм позволило стабилизировать ионный ток и заметно уменьшить угол распространения максимума тока.

Благодарности

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] K. Tanaka, L. Han, X. Zhou, and A. Anders, Adding high time resolution to charge-state-specific ion energy measurements for pulsed copper vacuum arc plasmas, *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. **24**, 045010, 2015, doi:10.1088/0963-0252/24/4/045010
- [2] I.G. Brown, *The Physics and Technology of Ion Sources. 2nd ed.*, Wiley, 2004.
- [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] A.G. Russkikh, A.V. Shishlov, A.S. Zhigalin, V.I. Oreshkin, S.A. Chaikovskii and R.B. Baksht, Small-sized vacuum-arc-discharge X-ray radiograph, *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. **20**, 035011, 2011, doi:10.1088/0963-0252/20/3/035011
- [5] A.G. Rousskikh, A.P. Artyomov, A.S. Zhigalin, A.V. Fedunin, V.I. Oreshkin and R.B. Baksht, Overview of the experimental data on the use of a vacuum arc discharge for Z-pinches, *2017 IEEE 21st International Conference on Pulsed Power (PPC)*, Bringston, United Kingdom, 2017, doi: 10.1109/PPC.2017.8291328
- [6] G.Yu. Yushkov, A.G. Nikolaev, V.P. Frolova, E.M. Oks, A.G. Rousskikh, and A.S. Zhigalin, Multiply charged metal ions in high current pulsed vacuum arcs, *Phys. Plasmas*, vol. **24**, 123501, 2017, doi: 10.1063/1.5003676
- [7] A.G. Rousskikh, A.S. Zhigalin, V.I. Oreshkin, S.A. Chaikovskiy, N.A. Labetskaya and R.B. Baksht, Use of vacuum arc plasma guns for a metal puff Z-pinch system, *Phys. Plasmas*, vol. **18**, 092707, 2011, doi:10.1063/1.3640535
- [8] P.A. Morozov, I.F. Punanov, R.V. Emlin, I.L. Muzyukin, S.A. Chaikovskiy, I.V. Uimanov, D.L. Shmelev, Yu.A. Zemskov and P.S. Mikhailov, Study of the ion plasma flow generated by a high-current vacuum arc, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. **1393**, 012015, 2019, doi:10.1088/1742-6596/1393/1/012015
- [9] I.L. Muzyukin, I.V. Uimanov, P.S. Mikhailov, D.L. Shmelev, S.A. Chaikovskiy, and Y.A. Zemskov, Ion Flow Parameters of a High-Current Pulsed Vacuum Arc, *7th International*

- Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE)*, Tomsk, Russia, 2020, 46-49, doi:10.1109/EFRE47760.2020.9242166
- [10] I.L. Muzyukin, I.V. Uimanov, P.S. Mikhailov, D.L. Shmelev, S.A. Chaikovsky, and Y.A. Zemskov, High-Current Pulsed Vacuum Arc in Coaxial Electrode System, *2020 29th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV)*, Padova, Italy, 2021, 257–259, doi:10.1109/ISDEIV46977.2021.9587059.