

УДК 537.525.5
EDN: WHELVV

PACS: 52.80.Mg, 52.80.-s

Исследование масс-зарядового состава плазмы в момент зажигания и погасания вакуумной дуги с медно-хромовыми электродами

© А. Г. Николаев*, В. Д. Гридилев, В. И. Гушенец, В. П. Фролова, Г. Ю. Юшков

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, 634055 Россия*** E-mail: anik-68@mail.ru**Статья поступила в редакцию 10.06.2026; после доработки 23.06.2026; принята к публикации 22.10.2026**Шифр научной специальности: 1.3.9.*

В вакуумных выключателях, устройствах для аварийного отключения тока промышленной частоты амплитудой до десятков килоампер при размыкании контактов неизбежно возникает вакуумная дуга. В данной работе исследовался масс-зарядовый состав плазмы, образующейся при формировании, функционировании и погасании вакуумной дуги с плотностью тока, типичной для вакуумных выключателей. Исследовались два набора медно-хромовых электродов, применяемых в вакуумных выключателях с процентным соотношением меди и хрома – 70 %/30 % и 50 %/50 %, соответственно, при наложении на межэлектродный промежуток аксиального магнитного поля с величиной магнитной индукции около 1 Тл и в случае отсутствия магнитного поля.

Ключевые слова: вакуумная дуга, масс-зарядовый состав, вакуумный выключатель, медно-хромовый электрод.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-5-69-75

Введение

Вакуумные дуги широко распространены в различных электрофизических устройствах. Например, они используются в дуговых напылительных системах для получения функциональных покрытий [1] или в ионных источниках [2, 3] для имплантации материалов [4, 5]. Вакуумная дуга, возникающая при размыкании контактов в сильноточных вакуумных выключателях, приводит к интенсивной эрозии и плавлению этих контактов [6], что требует применения специальных мер, приводящих к эффективному дугогашению в момент окончания полуволны тока [7, 8]. Одним из параметров, влияющих на эффективность дугогашения, является время, необходимое для распада плазмы дуги после прохождения тока дуги через нулевое значение, которое зависит от масс-зарядового состава ионов в такой плазме [9]. Таким обра-

зом, исследование состава ионов плазмы вакуумной дуги с плотностью тока на электродах, характерных для вакуумных выключателей, является актуальной прикладной задачей.

Электроды разрядной системы сильноточных вакуумных выключателей, как правило, изготавливаются из медно-хромовых композитов. Такие композиты характеризуются высокой электропроводностью и теплопроводностью, стойкостью контактов к свариванию и высокой эрозионной стойкостью при воздействии дугового разряда [7]. Для увеличения срока службы выключателей может быть использовано наложение аксиального или поперечного магнитного поля, управляющего движением катодных пятен и контролирующего распределение плотности тока на аноде [10, 11]. В данной работе с помощью времяпролетного спектрометра исследовался массово-зарядовый состав дуговой плазмы, образующейся при формировании, функцио-

нировании и погасании вакуумной дуги с плотностью тока, типичной для вакуумных выключателей, с двумя наборами медно-хромовых электродов с различным процентным соотношением меди и хрома в них в отсутствии и в присутствии аксиального магнитного поля.

Экспериментальное оборудование

Схема экспериментальной разрядной системы, моделирующей электроды в вакуумном выключателе, представлена на рис. 1. Вакуумная дуга зажигалась между торцевыми поверхностями двух электродов диаметром 6,3 мм – катода 1 и анодного электрода 2. Расстояние между ними составляло 4 мм. В экспериментах использовались две пары электродов 1 и 2, выполненных из композитов на основе меди и хрома с относительным содержанием этих элементов в материале 50/50 % и 70/30 % (далее CuCr50/50 и CuCr70/30). Катод 1 размещался внутри керамической трубки, на внешней стенке которой располагался кольцевой поджигающий электрод 3. В анодном электроде 2 имелось семь отверстий диаметром 1,5 мм, через которые плазма вакуумной дуги проникала в полый анод 4 и заполняла его. На торце полого анода 4 располагалась трехэлектродная многоапертурная ионно-оптическая система 5 диаметром 10 см, подробно рассмотренная в ра-

боте [3], с помощью которой происходило извлечение ионного пучка 6, состав которого анализировался времяпролетным спектрометром. Импульсное магнитное поле в разрядном промежутке создавалось соленоидом 7 с внутренним диаметром 44 мм. Каркас соленоида 7 находился под плавающим потенциалом относительно других электродов и имитировал защитный экран, которым, как правило, окружены электроды в вакуумном выключателе. Кроме того, внутренняя стенка каркаса и внешняя поверхность анодного электрода были закрыты керамическими изоляторами 8 для предотвращения зажигания дуги на других поверхностях, кроме торцов электродов 1 и 2.

Экспериментальная разрядная система размещалась на торце вакуумной камеры, откачиваемой до давления 5×10^{-7} Торр. На другом торце вакуумной камеры располагался времяпролетный масс-спектрометр с длиной базы 1 м для анализа масс-зарядового состава плазмы дуги по составу извлеченного ионного пучка. Затвор спектрометра типа Бредбери–Нильсона содержал пять пар концентрических колец, к которым прикладывался отклоняющий ионы высоковольтный импульс напряжения [12]. Для измерения тока, извлеченного из плазмы дуги, использовался перемещаемый магнитоизолированный цилиндр Фарадея с площадью коллимирующего отверстия 10 см^2 , расположенный на расстоянии 80 см от ионно-оптической системы.

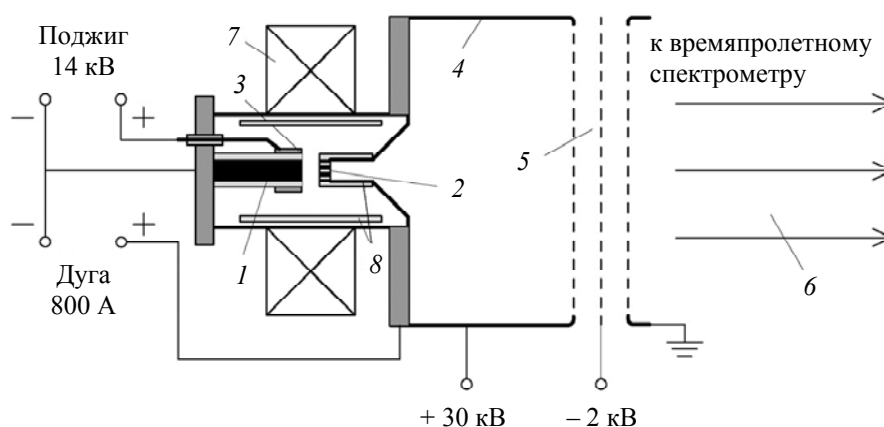


Рис. 1. Схема экспериментальной разрядной системы: 1 – катод, 2 – анодный электрод, 3 – поджигающий электрод, 4 – полый анод, 5 – ионно-оптическая система, 6 – ионный пучок, 7 – соленоид, 8 – керамические изоляторы

Инициирование дуги осуществлялось поджигающим разрядом по торцевой поверхности керамики при приложении высоковольтного импульса (до 14 кВ, 10 мкс) между катодом 1 и поджигающим электродом 2. Этот разряд инициировал импульс тока вакуумной дуги за счет разряда формирующей LC-линии с волновым сопротивлением 1 Ом. Измерения проводились при амплитуде тока дуги $I_{\text{дуги}}$ около 800 А и при длительности импульса дуги по основанию $\tau_{\text{имп}} = 270$ мкс. Импульс тока дуги для катода CuCr50/50 приведен на рис. 2 (осциллограмма 1). Импульс имел форму, близкую к прямоугольной, а его передний и задний фронты нарастания и спада тока имели длительности около 50 мкс. Средняя по рабочей поверхности электродов 1 и 2 плотность тока дуги $j_{\text{дуги}}$ в середине импульса составляла около 2,5 кА/см², что является типичным значением для вакуумных выключателей [8, 9]. Извлечение ионного пучка для анализа состава плазмы времяпролетным спектрометром происходило при подаче на анод, а, следовательно, на электрически соединённый с ним эмиссионный электрод ионно-оптической системы постоянного ускоряющего напряжения 30 кВ. На средний отсекающий электрод подавалось постоянное отрицательное напряжение величиной 2 кВ для отражения вторичных электронов, образующихся под воздействием пучка в результате ионно-электронной эмиссии. В экспериментах использовалось импульсное магнитное поле амплитудой около 1 Тл и длительностью импульса 780 мкс. Дуговой разряд зажигался с задержкой 200 мкс относительно момента начала импульса магнитного поля, при этом изменение величины магнитного поля в течение импульса дуги не превышало 10 %. В случае магнитного поля амплитуда импульса ионного тока на цилиндр Фарадея была почти в 3 раза выше, чем без поля (рис. 2, осциллограммы 2 и 3, соответственно), что свидетельствует о сжатии потока плазмы дуги магнитным полем.

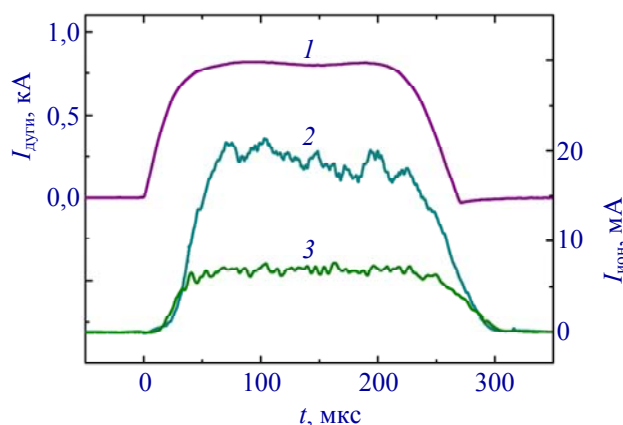


Рис. 2. Импульс тока дуги (1) и ионного тока на цилиндр Фарадея (2, 3) для материала электродов CuCr50/50. $B = 1$ Тл (2), 0 Тл (3). Ускоряющее напряжение – 30 кВ

Результаты экспериментов и их обсуждение

Масс-зарядовые спектры состава плазмы вакуумной дуги в случае катодов CuCr50/50 и CuCr70/30 в отсутствии магнитного поля и в случае $B = 1$ Тл при плотности тока 2,5 кА/см², измеренные через 200 мкс после инициирования импульса вакуумной дуги, представлены в качестве примера на рис. 3. При такой задержке параметры разряда находятся в квазистационарном состоянии и состав плазмы практически не изменяется. Из спектров (рис. 3) следует, что плазма разряда для двух исследуемых составов электродов без магнитного поля включает в себя ионы меди и хрома с зарядовыми состояниями от 1+ до 3+, а наиболее вероятное зарядовое состояние этих элементов – 2+. При $B = 1$ Тл в плазме присутствуют более высокие зарядовые состояния Cu^{4+} и Cr^{4+} , а наиболее вероятными состояниями для меди и хрома становятся ионы 3+. В случае магнитного поля в спектре появляется небольшое количество ионов газов из остаточной атмосферы вакуумной камеры – H^+ , N_2^+ , C^{2+} и O^{2+} .

На основании анализа спектров (рис. 3) можно оценить элементный состав плазмы дуги. Доля ионов каждого типа в плазме определялась по площади каждого пика при его

интегрировании по времени с учетом его зарядового состояния. Доли ионов меди и хрома в плазме вакуумной дуги с катодами из CuCr50/50 и CuCr70/30 совпадают с долями этих элементов в материале катода как в случае наличия, так и при отсутствии магнитного поля.

Зависимости изменения средних зарядовых состояний ионов меди и хрома в плазме в течение импульса вакуумной дуги с катодами из CuCr50/50 и CuCr70/30 в отсутствии и присутствии магнитного поля приведены на рис. 4. Максимальное значение средней зарядности $Q_{\text{ср}}$ наблюдается в начале импульса дуги и составляет для обоих материалов катода (при $B = 0$) около $2,9^+$ – для меди и $3,2^+$ – для хрома. На переднем фронте импульса в стадии формирования дуги в плазме присутствуют более высокозарядные ионы Cr^{4+} (Cr^{5+} при $B = 1$ Тл), а доля ионов Cu^{3+} и Cr^{3+} (Cu^{4+} и Cr^{4+} при $B = 1$ Тл) выше. Видимо, это связано с более высоким напряжением горения разряда в стадии формирования дуги, поскольку напряжение, приложенное к разрядному промежутку, снижается до устано-

вившегося напряжения горения дуги в течение нескольких десятков микросекунд [13, 14]. Соответственно, более высокое напряжение горения определяет более высокую температуру плазмы, при которой ионизационные процессы протекают более интенсивно. Средняя зарядность ионов как меди, так и хрома снижается примерно в 1,7–1,8 раза в течение 100 мкс горения разряда. Затем параметры дуги устанавливаются на характерных для квазистационарного режима значениях – и зарядовый состав плазмы, и, соответственно, средняя зарядность ионов слабо изменяются до конца импульса. При этом $Q_{\text{ср}}$ находится в пределах $(1,65\text{--}1,7)^+$ – для меди и $(1,8\text{--}1,85)^+$ – для хрома. Разница между $Q_{\text{ср}}$ меди и хрома составляет примерно 1,1 раза, что совпадает с разницей значений $Q_{\text{ср}}$ для одноэлементных катодов из этих материалов [15]. На заднем фронте импульса дуги во время погасания разряда наблюдается дальнейшее снижение $Q_{\text{ср}}$ еще примерно в 1,3 раза, что также связано с уменьшением напряжения на разрядном промежутке дуги в этой фазе функционирования разряда.

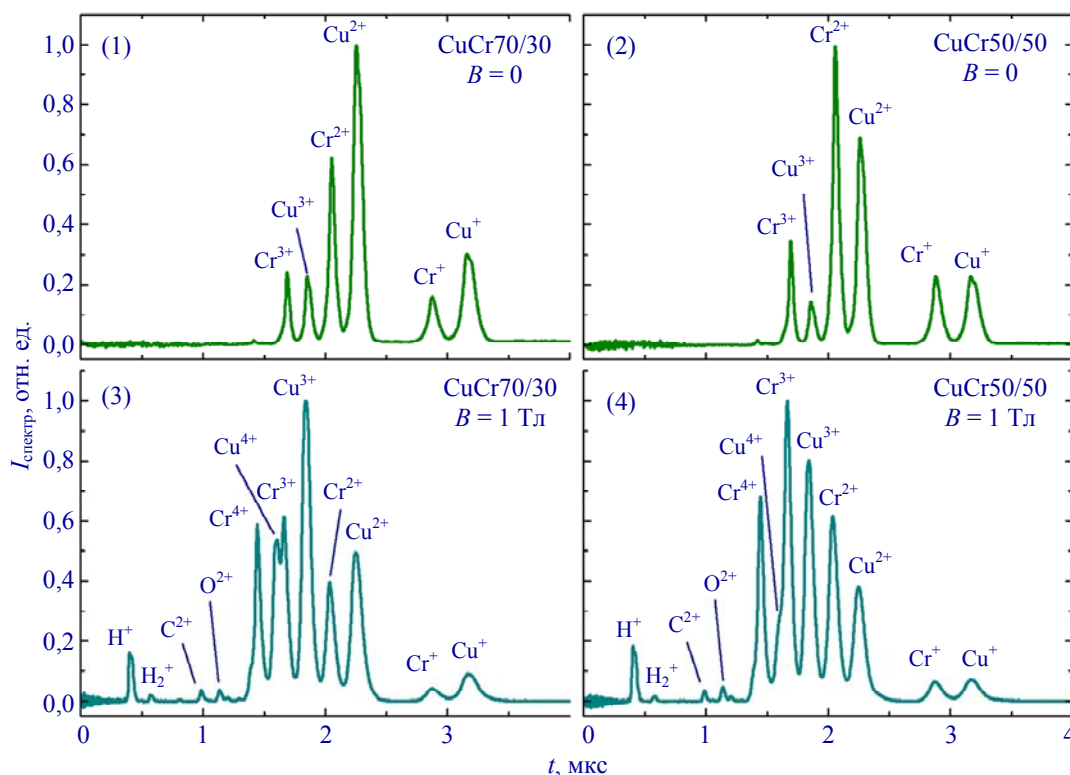


Рис. 3. Масс-зарядовый состав ионов плазмы вакуумной дуги с катодами из медно-хромовых композитов CuCr70/30 (1, 3) и CuCr50/50 (2, 4) без магнитного поля (1, 2) и в магнитном поле $B = 1$ Тл (3, 4). Плотность тока дуги – $2,5 \text{ кА/см}^2$. Момент измерения – через 200 мкс после начала импульса дуги. Ускоряющее напряжение – 30 кВ

Следует отметить, что $Q_{ср}$ ионов меди и хрома для катодов из CuCr50/50 и CuCr70/30 были близки между собой и различались для этих материалов электродов всего на (2–3) %. Это свидетельствует о том, что распределение ионов по зарядовым состояниям для катодов из двух металлов в основном определяется не соотношением этих металлов в катоде, а распределением потенциалов ионизации каждого из них.

Наложение магнитного поля на разрядный промежуток не изменяет общей картины зависимости масс-зарядового состава плазмы дуги от времени после её зажигания. Как и в случае без магнитного поля напряжение горения разряда снижается до своего квазистационарного значения и $Q_{ср}$ выходит в насыщение приблизительно за те же характерные времена. Как и в случае без магнитного поля, разница в значениях $Q_{ср}$ для ионов меди и хрома обоих материалов катода составляет также около 1,1 раза. Главное отличие состоит в том, что наложение магнитного поля приводит к существенному увеличению доли высокозарядных ионов и средних зарядностей ионов меди и хрома в плазме вакуумной дуги (рис. 4). Кратность увеличения $Q_{ср}$ ионов хрома и меди при наложении магнитного поля, определенная по зависимостям (рис. 4), составила величину примерно 1,6 раза, что коррелируется с кратностями увеличения $Q_{ср}$ для одноэлементных катодов из меди и хрома при такой величине магнитного поля [15, 16].

Такие изменения зарядового состава плазмы композитных катодов и увеличение $Q_{ср}$ обусловлены, по-видимому, теми же факторами, как что и в случае одноэлементных катодов из тех же материалов. Магнитное поле оказывает двойное влияние на плазму дуги. С одной стороны, происходит сжатие потока плазмы в разрядном промежутке магнитным полем, приводящее к росту напряжения горения и увеличению температуры электронов, что приводит к дополнительной ионизации. Как показано в [17], уже при магнитном поле $B \approx 0,1$ Тл температура электронов в плазме дуги кратно увеличивается. С другой стороны, сжатие плазмы магнитным полем приводит к увеличению так называемой области «заморозки» – области плотной плазмы вблизи катодного пятна вакуумной дуги, в которой происходит основная ионизация [15, 18].

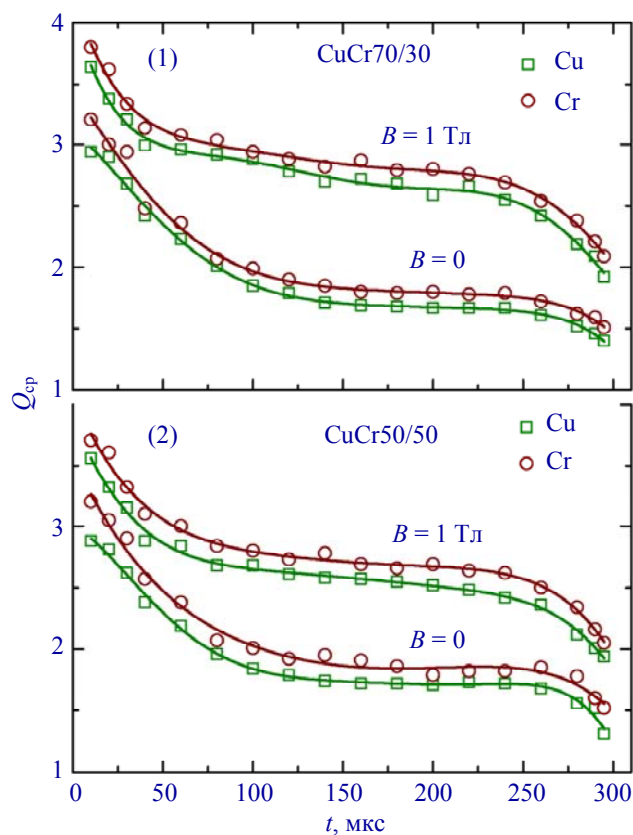


Рис. 4. Средняя зарядность ионов плазмы вакуумной дуги с катодами из медно-хромовых композитов CuCr70/30 (1) и CuCr50/50 (2) от времени, прошедшего после инициирования дуги, без магнитного поля и в магнитном поле $B = 1$ Тл. Плотность тока дуги – $2,5 \text{ кА/см}^2$, длительность импульса дуги – 270 мкс

Заключение

Была исследована эволюция массово-зарядовых состояний плазмы при зажигании, функционировании и погасании вакуумной дуги с плотностью тока $2,5 \text{ кА/см}^2$, типичной для вакуумных выключателей с катодами, выполненными из меднохромовых композитов с процентными соотношениями Cu/Cr – 70 %/30 % и 50 %/50 % в отсутствии и при наложении на разрядный промежуток магнитного поля величиной до 1 Тл. Показано, что максимальная средняя зарядность регистрируется при зажигании дуги, затем в течение 100 мкс средняя зарядность снижается примерно в 1,7–1,8 раза и больше не изменяется до конца импульса. На заднем фронте импульса дуги во время погасания разряда наблюдается дальнейшее снижение $Q_{ср}$ еще примерно в 1,3 раза. Наложение магнитного поля на разрядный промежуток не изменяет вид зависимости масс-зарядового состава

плазмы дуги от времени после её зажигания, но увеличивает среднюю зарядность примерно в 1,6 раза. Кратность увеличения зарядности при создании магнитного поля близка к значениям, полученным для одноэлементных катодов из меди и хрома. Все изменения зарядового состава плазмы для разных материалов катодов CuCr50/50 и CuCr70/30 слабо различались между собой, что свидетельствует о том, что распределение ионов по зарядовым состояниям для катодов из двух металлов в основном определяется не соотношением доли этих металлов в катоде, а распределением потенциалов ионизации каждого из них.

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 26-19-00143
(<https://rscf.ru/project/26-19-00143/>)*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Boxman R. L., Zhitomirsky V. N. / Review of Scientific Instruments. 2006. Vol. 77. № 2. P. 021101.
2. Brown I. G. The Physics and Technology of Ion Sources. 2nd ed. – Wiley-VCH, 2004.
3. Николаев А. Г., Фролова В. П., Юшков Г. Ю. / Прикладная физика. 2022. № 3. С. 30–36.
4. Sokullu Urkac E., Oztarhan A., Kaya N., Tihminlioglu F., Ila D., Muntele C., Budak S., Oks E., Nikolaev A., Ezdesir A., Tek Z. / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2007. Vol. 261. № 1-2. P. 699–703.
5. Nikolaev A. G., Savkin K. P., Yushkov G. Y., Oks E. M. / Review of Scientific Instruments. 2014. Vol. 85. № 2. P. 02B501.
6. Slade P. G. / IEEE Transactions on Industry Applications. 1997. Vol. 33. № 6. P. 1501–1511.
7. Забелло К. К., Логачёв А. А., Полуянова И. Н., Школьник С. М. / Письма в Журнал Технической Физики. 2019. Т. 45. № 8. С. 24–27.
8. Баринков Ю. А., Забелло К. К., Логачев А. А., Полуянова И. Н., Школьник С. М. / Прикладная физика. 2025. № 1. С. 11–15.
9. Gebel R. / IEEE Transactions on Plasma Science. 1989. Vol. 17. № 5. P. 834–838.
10. Shkol'nik S. M. / IEEE Transactions on Plasma Science. 2022. Vol. 50. № 9. P. 2634–2641.
11. Lamara T., Hencken K., Gentsch D. / IEEE Transactions on Plasma Science. 2015. Vol. 43. № 5. P. 1798–1805.
12. Brown I. G., Galvin J. E., MacGill R. A., Wright R. T. / Review of Scientific Instruments. 1987. Vol. 58. № 9. P. 1589–1592.
13. Anders A. / IEEE Transactions on Plasma Science. 2001. Vol. 29. № 2. P. 393–398.
14. Yushkov G. Yu., Anders A. / Journal of Applied Physics. 2009. Vol. 105. № 4. P. 043303.
15. Oks E. M., Anders A., Brown I. G., Dickinson M. R., MacGill R. A. / IEEE Transactions on Plasma Science. 1996. Vol. 24. № 3. P. 1174–1183.
16. Николаев А. Г., Окс Е. М., Юшков Г. Ю. / Журнал Технической Физики. 1998. Т. 68. № 5. С. 39–43.
17. Galonska M., Hollinger R., Spaedtke P., Krinberg I. A. / IEEE Transactions on Plasma Science. 2005. Vol. 33. № 5. P. 1542–1547.
18. Anders A., Yushkov G. Yu., Oks E. M., Nikolaev A. G., Brown I. G. / Review of Scientific Instruments. 1998. Vol. 69. № 3. P. 1332–1335.

PACS: 52.80.Mg, 52.80.-s

Study of the mass-to-charge composition of plasma at the moment of ignition and extinction of a vacuum arc with copper-chromium electrodes

A. G. Nikolaev*, V. D. Gridilev, V. I. Gushenets, V. P. Frolova, and G. Yu. Yushkov

Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, 634055 Russia

*E-mail: anik-68@mail.ru

Received 10.06.2026; revised 23.06.2026; accepted 22.10.2026

In vacuum circuit breakers, devices for emergency interruption of industrial-frequency currents with amplitudes up to tens of kiloamperes, a vacuum arc inevitably occurs when contacts open. This study investigated the mass-charge composition of the plasma generated during the formation, operation, and extinction of a vacuum arc with a current density typical for vacuum circuit breakers. Two sets of copper-chromium electrodes used in vacuum circuit breakers were studied, with copper and chromium ratios of 70 %/30 % and 50 %/50 %, respectively, with

an axial magnetic field of approximately 1 T applied to the interelectrode gap and in the absence of a magnetic field.

Keywords: vacuum arc ion source, high charge state ions, heavy metal ions, ion beam.

REFERENCES

1. Boxman R. L. and Zhitomirsky V. N., Review of Scientific Instruments **77**, 021101 (2006).
2. Brown I. G. The Physics and Technology of Ion Sources. 2nd ed. Wiley-VCH, 2004.
3. Nikolaev A. G., Frolova V. P., and Yushkov G. Yu., Applied Physics, № 3, 30–36 (2022) [in Russian].
4. Sokullu Urkac E., Oztarhan A., Kaya N., Tihminlioglu F., Ila D., Muntele C., Budak S., Oks E., Nikolaev A., Ezdesir A., and Tek Z., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms **261**, 699–703 (2007).
5. Nikolaev A. G., Savkin K. P., Yushkov G. Y., and Oks E. M., Review of Scientific Instruments **85**, 02B501 (2014).
6. Slade P. G., IEEE Transactions on Industry Applications **33**, 1501–1511 (1997).
7. Zabello K. K., Logachev A. A., Shkol'nik S. M., and Poluyanov I. N., Technical Physics Letters **45** (4), 391–394 (2019).
8. Barinov Yu. A., Zabello K. K., Logachev A. A., Poluyanov I. N., and Shkol'nik S. M., Applied Physics, № 1, 11–15 (2022) [in Russian].
9. Gebel R., IEEE Transactions on Plasma Science **17**, 834–838 (1989).
10. Shkol'nik S. M., IEEE Transactions on Plasma Science **50**, 2634–2641 (2022).
11. Lamara T., Hencken K., and Gentsch D., IEEE Transactions on Plasma Science **43**, 1798–1805 (2015).
12. Brown I. G., Galvin J. E., MacGill R. A., and Wright R. T., Review of Scientific Instruments **58**, 1589–1592 (1987).
13. Anders A., IEEE Transactions on Plasma Science **29**, 393–398 (2001).
14. Yushkov G. Yu. and Anders A., Journal of Applied Physics **105**, 043303 (2009).
15. Oks E. M., Anders A., Brown I. G., Dickinson M. R., and MacGill R. A., IEEE Transactions on Plasma Science **24**, 1174–1183 (1996).
16. Nikolaev A. G., Oks E. M., and Yushkov G. Yu., Technical Physics **43** (5), 514–517 (1998).
17. Galonska M., Hollinger R., Spaedtke P., and Krinberg I. A., IEEE Transactions on Plasma Science **33**, 1542–1547 (2005).
18. Anders A., Yushkov G. Yu., Oks E. M., Nikolaev A. G., and Brown I. G., Review of Scientific Instruments **69**, 1332–1335 (1998).

Об авторах

Николаев Алексей Геннадьевич, к.т.н., старший научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН (634055, Томск, Россия). E-mail: anik-68@mail.ru SPIN-код: 5563-9049, AuthorID: 28753

Гридилев Вадим Дмитриевич, аспирант, Институт сильноточной электроники СО РАН (634055, Томск, Россия). E-mail: gridilow@mail.ru SPIN-код: 6421-7599, AuthorID: 1272301

Гушенец Василий Иванович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН (634055, Томск, Россия). E-mail: gvi@hcei.ru SPIN-код: 7057-4179, AuthorID: 36339

Фролова Валерия Петровна, к.т.н., научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН (634055, Томск, Россия). E-mail: vfrolova@hcei.ru SPIN-код: 4855-4686, AuthorID: 838120

Юшков Георгий Юрьевич, д.т.н., главный научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН (634055, Томск, Россия). E-mail: gyushkov@mail.ru SPIN-код: 3821-2562, AuthorID: 36337