

УДК 533.9.082, 537.52
 EDN: ZTNBKN

PACS: 52.70.Kz

Излучение короткой сильноточной вакуумной дуги с медными электродами

Ю. А. Баринов, К. К. Забелло, А. А. Логачев, И. Н. Полуянова, С. М. Школьник

В работе измерялась мощность излучения сильноточной вакуумной дуги, горящей на электродах из меди. Диапазон измерения излучения составил $100 \text{ нм} \leq \lambda \leq 1100 \text{ нм}$. Разработанная методика измерения позволила проанализировать изменение мощности излучения в зависимости от тока дуги в видимой и ультрафиолетовых частях спектра, а также, в области вакуумного ультрафиолета. Анализ полученных результатов показал, что в вакуумной дуге с сильной анодной активностью происходит перераспределение по спектру мощности излучения. Полученные результаты дали возможность оценить долю излучения в энергобалансе дуги.

Ключевые слова: вакуумная дуга; мощность излучения; низкотемпературная плазма; электромагнитное излучение; электрическая дуга.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-1-11-15

Введение

Исследования сильноточных вакуумных дуг в первую очередь связаны с разработкой вакуумной дугогасительной аппаратуры. При этом, электромагнитное излучение играет значительную роль в энергетическом балансе вакуумной дуги. С увеличением тока дуги и соответственно плотности плазмы роль излучения увеличивается [1]. Определить энерго-

баланс дуги с учётом излучения достаточно сложная задача. При математическом моделировании вакуумной дуги обычно не учитывают электромагнитное излучение. Однако, было сделано несколько приближённых расчётов, в которых излучение дуги учитывалось [2–4]. При исследовании излучения плазмы экспериментальным методом в основном используются спектроскопические методы [5]. В наших работах [6–8] мы измеряли поток излучения, создаваемый всем объёмом плазмы. В этих работах приведены результаты измерений излучения сильноточной вакуумной дуги с электродами из медь-хромовой композиции (CuCr30), используемой в современных дугогасительных камерах. В предыдущих работах авторы исследовали спектральную область $200 \text{ нм} \leq \lambda \leq 1100 \text{ нм}$. Оказалось, что большая часть излучения сосредоточена в диапазоне $\lambda < 400 \text{ нм}$ и доля мощности излучения в дуге с анодной активностью составляет почти 25 % от полной мощности дуги. Эти измерения, вместе с измерениями тока разряда и напряжения на дуге, могут быть использованы для определения основных параметров плазмы [9].

В развитой сильноточной вакуумной дуге при достижении некоторого уровня плотности тока проявляется анодная активность и

Баринов Юрий Алексеевич¹, с.н.с., к.ф.-м.н.
E-mail: yury@mail.ioffe.ru

Забелло Константин Константинович¹, н.с., к.ф.-м.н.
E-mail: zabellok@mail.ioffe.ru

Логачев Александр Александрович¹, н.с.
E-mail: logatchev@mail.ioffe.ru

Полуянова Ирина Николаевна², нач. отдела.
E-mail: pin@tavrida.com

Школьник Сергей Маркович¹, к.ф.-м.н.
E-mail: shkolknik@mail.ioffe.ru

¹ Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе.
Россия, 194021, С.-Петербург, Политехническая ул., 26.

² Конструкторское бюро коммутационной аппаратуры.
Россия, 299003, г. Севастополь, ул. Революции 1905 г., 12.

Статья поступила в редакцию 12.09.2024

После доработки 11.10.2024

Принята к публикации 1.02.2025

Шифр научной специальности: 1.3.9

© Баринов Ю. А., Забелло К. К., Логачев А. А.,
Полуянова И. Н., Школьник С. М., 2025

на обоих электродах имеется достаточно большие области расплава материала. Температура этого расплава достигает 2000 К [10]. При этом температура плавления меди составляет 1356,55 К, а хрома 2130 К. При таких температурах испарение с поверхности электродов меди будет существенно, а значит основной материал в межэлектродном промежутке это будут пары меди. В области вакуумного ультрафиолета (100–200 нм) находится достаточно много интенсивных линий атомов и ионов меди. Поэтому, можно предположить, что мощность, выделяемая излучением из дуги в этом диапазоне, будет существенной. Для оценки вклада каждого компонента электрода (Cu, Cr) в излучение, на этом этапе исследований мы измерили мощность излучения вакуумной дуги, горящей на медных электродах.

Техника эксперимента

Измерение излучения сильноточной вакуумной дуги проводилось в диапазоне $100 \text{ нм} \leq \lambda \leq 1100 \text{ нм}$, в эту область попадает и диапазон вакуумного ультрафиолета (ВУФ). Поджиг дуги осуществлялся в центре катода вспомогательным разрядом, между электродом и отрываемой от него иглой с током. Питание дуги осуществлялось импульсом тока прямоугольной формы длительностью 9 мс. Межэлектродный промежуток составлял 4 мм. Ток менялся в диапазоне 10–25 кА, что даёт изменение средней плотности тока в полностью развившейся дуге $1,5 \text{ кА/см}^2 \leq j \leq 3,5 \text{ кА/см}^2$. Диаметр торцевых электродов был 30 мм. Материал электродов – бескислородная медь (OFC Cu).

Схема экспериментальной установки была описана ранее в [6]. Оценки мощности излучения сильноточной вакуумной дуги исходя из интенсивности потока излучения, зарегистрированного фотоприёмником, основывалась на [11]. Здесь отметим основные параметры установки и важные дополнительные изменения. Электроды располагались в вакуумной камере под непрерывной откачкой ($\sim 10^{-4}$ Па). Для стабилизации разряда к нему прилагалось однородное аксиальное магнитное поле (АМП), величина индукции АМП составляла ~ 10 мТ/кА. Таким образом обес-

печивалось горение дуги в диффузной моде. Для регистрации излучения применялись три фотодиода ФДУК8-УВС с размером активной области 3,5 мм. Типовая чувствительность $S(\lambda)$ фотодиода в диапазоне $100 \text{ нм} \leq \lambda \leq 1100 \text{ нм}$ изображена на рисунке 1.

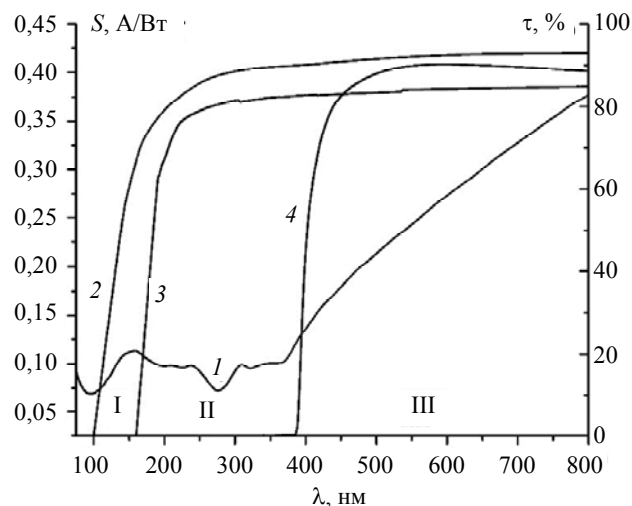


Рис. 1. Зависимость спектральной чувствительности фотодиода – 1 и коэффициенты пропускания фильтров: 2 – MgF₂; 3 – КУ-1; 4 – ЖС-10

Все три фотодиода располагались внутри вакуумной камеры, что позволяло нам регистрировать излучение в вакуумном ультрафиолете. Для разделения регистрируемого фотодиодами диапазона на области (на рис. 1 они отмечены как I, II и III) использовались светофильтры. Стекло из MgF₂, пропускает излучение с $\lambda \geq 100$ нм, кварцевое стекло КУ1 пропускает свет с $\lambda \geq 175$ нм и цветное стекло ЖС-10 (ГОСТ 9411-91) пропускает с $\lambda \geq 400$ нм. На рисунке 1 вместе с чувствительностью фотодиода изображены коэффициенты пропускания $\tau(\lambda)$ светофильтров. В диапазоне 100–400 нм, у фотодиода характеристика спектральной чувствительности меняется незначительно, поэтому мощность излучения в этой области можно оценить достаточно просто в узких спектральных областях 100–175 нм, (область I) 175–400 нм (область II). Характеристика чувствительности в области $\lambda > 400$ нм (область III) у фотодиода растёт с увеличением длины волны, однако излучение дуги в длинноволновой области имеет низкую интенсивность. Поэтому авторы считали чувствительность в области III средней по диапазону, что не даст высокой

погрешности в оценке мощности излучения. Для ограничения максимальных регистрируемых фотодиодами сигналов, применялись диафрагмы разных диаметров (до 1 мм для фильтра ЖС-10 и 0,5 мм для остальных).

Результаты эксперимента и обсуждение

При относительно небольшом токе $I_a \approx 10$ кА, когда дуга горит в диффузной моде

без анодной активности, форма регистрируемых сигналов с фотодиодов примерно повторяют форму тока разряда. Сигнал регистрируется слабый, особенно через фильтр ЖС-10. Примеры результатов электрических измерений при двух больших токах приведены на рисунках 2 и 3. Видно, что с увеличением амплитуды импульса тока величина и форма импульса от фотодиода (а, следовательно, и мощность излучения плазмы) сильно меняются.

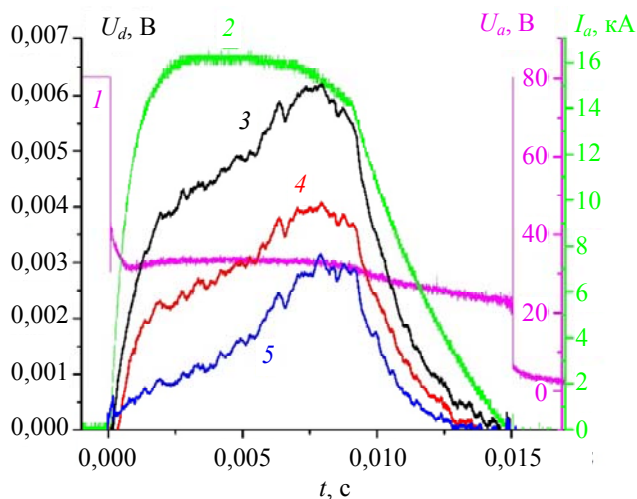


Рис. 2. Результаты измерений. $I_a \approx 16$ кА. 1 – Напряжение на дуге; 2 – ток дуги; Сигналы с фотодиодов с фильтрами: 3 – MgF_2 ; 4 – $KV1$; 5 – ЖС-10

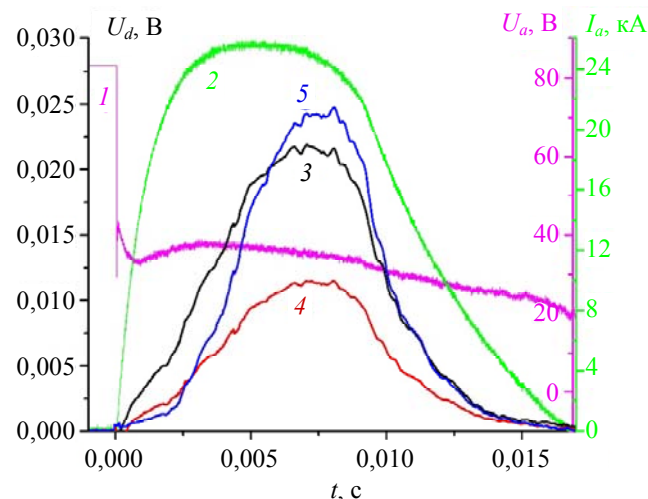


Рис. 3. Результаты измерений. $I_a \approx 25$ кА. 1 – Напряжение на дуге; 2 – ток дуги; Сигналы с фотодиодов с фильтрами: 3 – MgF_2 ; 4 – $KV1$; 5 – ЖС-10

Когда ток достигает $I_a \approx 16$ кА (рис. 2), и на электродах появляются первые признаки анодной активности, сигналы от диодов также увеличиваются. Несмотря на то, что импульс тока имеет продолжительное плато, сигналы от диодов линейно возрастают и к концу импульса увеличиваются минимум вдвое, а для фильтра ЖС-10 увеличение наблюдается до трёх раз. Дальнейшее увеличение тока приводит к значительному изменению формы сигналов от диодов. В конце импульса сигналы начинают быстро нарастать и при токах $I_a \approx 18$ кА (при таких токах на обоих электродах наблюдаются значительные оплавы поверхностей) к концу импульса они увеличивается минимум в четыре раза. Причём сигнал, полученный через фильтр MgF_2 начинает расти раньше других, но рост сигнала на фотодиоде, полученный через фильтр ЖС-10 существенно больше чем увеличение сигналов

на других фотодиодах. Дальнейшее увеличение тока до $I_a \approx 25$ кА (рис. 3) не приводит к изменению формы сигнала от диодов, но вызывает их значительное увеличение. При максимальном токе поверхности обоих электродом полностью оплавлены.

Значительное изменение формы сигнала от диода при токах, превышающих 15 кА, коррелирует с появлением анодной активности. Анодная активность приводит к увеличению плотности плазмы и, как следствие, к увеличению роли излучения.

Благодаря одновременной фиксации излучения тремя фотодиодами через разные фильтры мы можем видеть, как зависит мощность излучения P от тока разряда в спектральной области I ($\sim 100-175$ нм), области II ($\sim 175-400$ нм) и области III ($\lambda \geq 400$ нм) в различное время после поджига дуги. Такие зависимости приведены на рисунке 4.

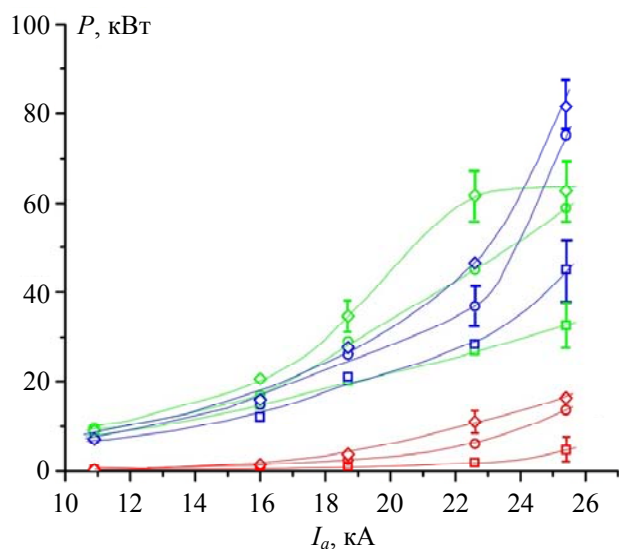


Рис. 4. Зависимость мощности излучения от тока в разных областях спектра: Синий - область I; Зелёный - область II; Красный - область III. Моменты времени: квадрат - 3,5 мс; круг - 5,5 мс; ромб - 7,5 мс

Из приведённых зависимостей видно, что мощность излучения во всех наблюдаемых участках спектра достигает максимума к концу импульса (7,5 мс). Однако изменение мощности излучения с увеличением тока при достижении предельных токов, когда активность на аноде уже достаточно сильна ($I_a > 20$ кА), не одинаково для разных участков спектра.

В области III в дуге с развитой анодной активностью мощность излучения возрастает на порядок по сравнению с дугой в диффузной моде без анодной активности. Также с ростом тока существенно растёт мощность излучения в области вакуумного ультрафиолета (область I). Причём на предельных токах рост ускоряется и достижение максимума излучения наблюдается быстрее.

В средней области спектра (область II) немного другая картина. До появления анодной активности мощность излучения растёт синхронно с областью вакуумного ультрафиолета, но при токе $\sim 22,5$ кА мощность резко увеличивается и хоть и в конце импульса тока (7,5 мс), но достигает величины большей, чем мощность в области вакуумного ультрафиолета. А при большем токе (~ 25 кА) величина мощности излучения в области II в отличие от излучения в области I практически не увеличивается. Причём уже в середине импульса тока излучение в область II достигает своего насыщения.

В области I излучение в основном определяется ионными линиями меди, в том числе резонансными. В области II существенную часть излучения будут определять уже атомные линии (там же находятся две резонансные линии атома меди). При токах $I_a > 20$ кА авторы наблюдают полностью оплавленные оба электрода, а значит, происходит интенсивное испарение меди с поверхности. При дальнейшем росте тока испаряющиеся с поверхности атомы будут активно ионизоваться и, следовательно, будет возрастать излучение.

Заключение

В развитой вакуумной дуге с анодной активностью излучение играет существенную роль. При токе дуги 25 кА в разряде будет выделяться примерно 900 кВт мощности. По нашей оценке, с излучением в диапазоне ~ 100 – 1100 нм из дуги уйдёт примерно 150 кВт, то есть при больших плотностях тока до конца горения дуги с излучением выделится до 15 % от всей мощности в разряде. Поэтому при расчёте энергобаланса в высокоточных вакуумных дугах необходимо учитывать излучение. При этом с ростом тока, мощность излучения растёт быстрее в области вакуумного ультрафиолета. При токе 25 кА (плотность тока $j \leq 3,5$ кА/см²) излучение в вакуумном ультрафиолете к концу импульса достигает 80 кВт. В спектральной области 175–400 нм максимум достигается при меньшем токе ($I_a = 22$ кА) и составляет 60 кВт. Анализ показывает, что в развитой вакуумной дуге с анодной активностью с ростом тока есть перераспределение мощности излучения в сторону вакуумного ультрафиолета. Это говорит о том, что необходимо провести измерения и в более коротковолновой области ($\lambda \leq 100$ нм).

ЛИТЕРАТУРА

1. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2009.
2. Schade E., Shmelev D. L. / IEEE Trans. Plas. Sci. 2003. Vol. 31. № 5. P. 890–901.
3. Wang L., Jia S., Liu Y., Chen B., Yang D., Shi Z. / J. Appl. Phys. 2010. Vol. 107. № 11. Art. № 113306.
4. Wenzel N., Kosse S., Lawall A., Renz R., Hartmann W. / Proc. 25th Int. Symp. Discharges Electr. Insul. Vac. (ISDEIV). 2012. P. 321–324.
5. Ochkin V. N. Spectroscopy of Low Temperature Plasma. – Weinheim, John Wiley & Sons, 2009.

6. Barinov Yu. A., Zabello K. K., Logachev A. A., Poluyanov I. N., Sherstnev E. V., Shkol'nik S. M. / Tech. Phys. Lett. 2021. Vol. 47. № 2. P. 118–121.

7. Barinov Y. A., Zabello K. K., Logachev A. A., Poluyanov I. N., Sherstnev E. V., Bogdanov A. A., Shkol'nik S. M. / IEEE Trans. Plasma Sci. 2022. Vol. 50. № 9. P. 2729–2735.

8. Barinov Yu. A., Zabello K. K., Logachev A. A., Poluyanov I. N., Shkol'nik S. M. / Proc. 30th Int. Symp.

on Discharges and Electr. Insul. in Vac.(ISDEIV). 2023. P. 235–237.

9. Лапшин В. Ф. / Прикладная физика. 2023. № 3. С. 10–17.

10. Zabello K. K., Poluyanov I. N., Logachev A. A., Begal D. I., Shkol'nik S. M. / IEEE Trans. Plas. Sci. 2019. Vol. 47. № 8. P. 3563–3571.

11. Лапшин В. Ф. / Прикладная физика. 2022. № 5. С. 25–31.

PACS: 52.70.Kz

Radiation of a short high-current vacuum arc with copper electrodes

Yu. A. Barinov¹, K. K. Zabello¹, A. A. Logachev¹, I. N. Poluyanov² and S. M. Shkol'nik¹

¹ Ioffe Institute

26 Polytekhnicheskaya st., St. Petersburg, 194021, Russia

² Switchgear design bureau LTD

12 Revolution st. 1905, Sevastopol, 299003, Russia

Received 12.09.2024; revised 11.10.2024; accepted 1.02.2025

The work measured the radiation power of a high-current vacuum arc burning on copper electrodes. The radiation measurement range was $100\text{ nm} \leq \lambda \leq 1100\text{ nm}$. The developed measurement technique allowed us to analyze the change in radiation power depending on the arc current in the visible and ultraviolet parts of the spectrum, as well as in the vacuum ultraviolet region. From the analysis of the obtained results it is evident that in a vacuum arc with strong anodic activity there is a redistribution of the radiation power spectrum. The obtained results made it possible to estimate the share of radiation in the arc energy balance.

Keywords: vacuum arc; radiation power; low-temperature plasma; electromagnetic radiation; electric arc.

REFERENCES

1. Raizer Yu. P., Gas Discharge Physics, Berlin Heidelberg, Springer, 1991.
2. Schade E. and Shmelev D. L., IEEE Trans. Plas. Sci. **31** (5), 890–901 (2003).
3. Wang L., Jia S., Liu Y., Chen B., Yang D. and Shi Z., J. Appl. Phys. **107** (11), 113306 (2010).
4. Wenzel N., Kosse S., Lawall A., Renz R. and Hartmann W., Proc. 25th Int. Symp. Discharges Electr. Insul. Vac.(ISDEIV), 2012, pp. 321–324.
5. Ochkin V. N., Spectroscopy of Low Temperature Plasma, Weinheim, John Wiley & Sons, 2009.
6. Barinov Yu. A., Zabello K. K., Logachev A. A., Poluyanov I. N., Sherstnev E. V. and Shkol'nik S. M., Tech. Phys. Lett. **47** (2), 118–121 (2021).
7. Barinov Y. A., Zabello K. K., Logachev A. A., Poluyanov I. N., Sherstnev E. V., Bogdanov A. A. and Shkol'nik S. M., IEEE Trans. Plasma Sci. **50** (9), 2729–2735 (2022).
8. Barinov Yu. A., Zabello K. K., Logachev A. A., Poluyanov I. N. and Shkol'nik S. M., Proc. 30th Int. Symp. on Discharges and Electr. Insul. in Vac. (ISDEIV), 2023, pp. 235–237.
9. Lapshin V. F., Applied Physics, № 3, 10–17 (2023) [in Russian].
10. Zabello K. K., Poluyanov I. N., Logachev A. A., Begal D. I. and Shkol'nik S. M., IEEE Trans. Plas. Sci. **47** (8), 3563–3571 (2019).
11. Lapshin V. F., Applied Physics, № 5, 25–31 (2022) [in Russian].