

Излучение короткой сильноточной вакуумной дуги в области вакуумного ультрафиолета

© Ю.А. Баринов¹, К.К. Забелло¹, А.А. Логачев¹, И.Н. Полуянова², Е.В. Шерстнев¹,
С.М. Школьник¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Конструкторское бюро коммутационной аппаратуры, Севастополь, Россия

E-mail: zabello@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 26 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 5 августа 2024 г.

Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Мощность излучения сильноточной вакуумной дуги измерялась в спектральной области $100 \leq \lambda \leq 1100$ nm. Полученные результаты позволили проанализировать зависимость мощности излучения от тока дуги в разных диапазонах длин волн, в том числе в области вакуумного ультрафиолета. Анализ показал, что в развитой вакуумной дуге с анодной активностью наблюдается перераспределение мощности излучения в исследуемых областях спектра. Результаты измерений позволили рассчитать, какую часть мощности, выделяющейся в дуге, переносит излучение.

Ключевые слова: вакуумная дуга, мощность излучения.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.24.59436.6419k

В энергетическом балансе дуги излучение играет тем более значительную роль, чем больше плотность плазмы. Однако учет излучения при описании энергобаланса дуги представляет собой сложную задачу. Для ее решения приходится использовать приближенные методы. Исследования ведутся уже не один десяток лет. В отличие от газовых дуг перенос энергии излучением в вакуумных дугах практически не исследован. При математическом моделировании вакуумных дуг обычно излучением пренебрегают. Есть лишь несколько приближенных расчетов, в которых при рассмотрении энергобаланса дуги учитывалось излучение [1–3]. Однако в этих работах и методика расчета, и его результаты описаны очень кратко. Экспериментальных измерений мощности излучения сильноточной вакуумной дуги до начала нашей работы не проводилось. В первых наших публикациях на эту тему [4–6] приведены результаты, полученные в вакуумной дуге при плотности тока до $j \sim 3.5$ kA/cm². На первом этапе работы мы ограничивались задачей исследования спектральной области от „обычного“ ультрафиолета до ближней инфракрасной области ($200 \leq \lambda \leq 1100$ nm). В [5,6] исследовалось излучение дуги в зазорах 4 и 8 mm в диапазоне $200 \leq \lambda \leq 1100$ nm, где доля мощности излучения доходила до 25% от полной мощности, выделяющейся в дуге. Было установлено, что основной вклад в излучение дуги вносит диапазон $\lambda < 400$ nm. Эти результаты были использованы в [7], где по мощности излучения делалась оценка давления и температуры излучающей дуги. На рис. 1 представлены линии атомов и ионов меди (красные) и хрома (черные) в диапазоне 100–400 nm. Мы предположили, что, поскольку довольно много линий ионов Си и Сг сосредоточено в области 100–200 nm, значительная мощность излучения может добавиться

за счет излучения в вакуумном ультрафиолете (ВУФ). Измерения в ВУФ были проведены в настоящей работе.

В работе исследуется излучение вакуумной дуги в диапазоне $100 \leq \lambda \leq 1100$ nm, в этот диапазон попадает и излучение ВУФ. Дуга поджигалась в центре катода инициирующим разрядом путем отключения тока во вспомогательной цепи и питалась прямоугольным импульсом тока длительностью 9 ms. Дуга горит в зазоре 4 mm с током в диапазоне от 10 до 25 kA, что соответствует средней плотности тока в развитом разряде $1.5 \leq j \leq 3.5$ kA/cm². Использовались торцевые электроды диаметром 30 mm. Материал электродов — медь-хромовая композиция CuCr30.

Методика измерений и схема экспериментальной установки подробно описаны ранее [4]. Методика оценки мощности излучения дуги по интенсивности потока излучения, падающего на фотоприемник, основывалась на данных [8]. Приведем только основные моменты и отличия. Эксперименты выполнены в вакуумной камере при непрерывной откачке ($\sim 10^{-4}$ Pa). Дуга поджигалась в центре катода и стабилизировалась однородным аксиальным магнитным полем с индукцией ~ 10 mT/kA. Разряд питался импульсом тока длительностью 10 ms. В экспериментах использовалось три фотодиода типа ФДУК8-УВС. Диаметр активной области фотодиода ФДУК8-УВС составляет 3.5 mm. Их типовая чувствительность в диапазоне длин волн $100 \leq \lambda \leq 800$ nm представлена на рис. 2, а. Для регистрации ВУФ фотодиоды помещались в вакуумную камеру. Перед фотодиодами располагались светофильтры. В качестве светофильтров использовались пластины из MgF₂, кварцевого стекла КУ-1 и цветного стекла ЖС-10 (ГОСТ 9411–91). Стекло из MgF₂ отсекает излучение с $\lambda \leq 100$ nm, стекло КУ-1 — излучение с $\lambda \leq 175$ nm,

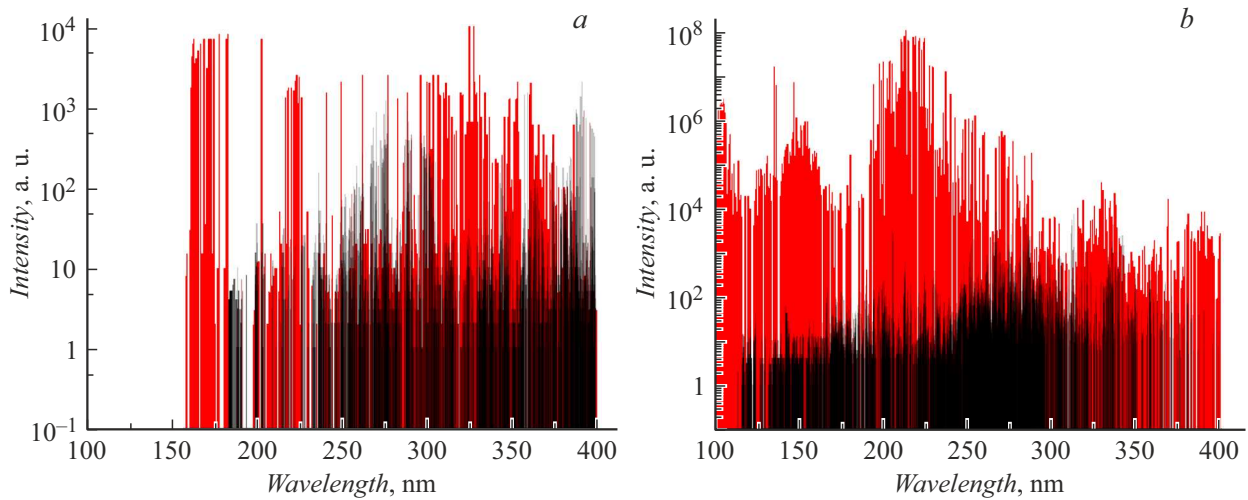


Рис. 1. Линии атомов (*a*) и ионов (*b*) меди (красные) и хрома (черные) в диапазоне 100–400 нм. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

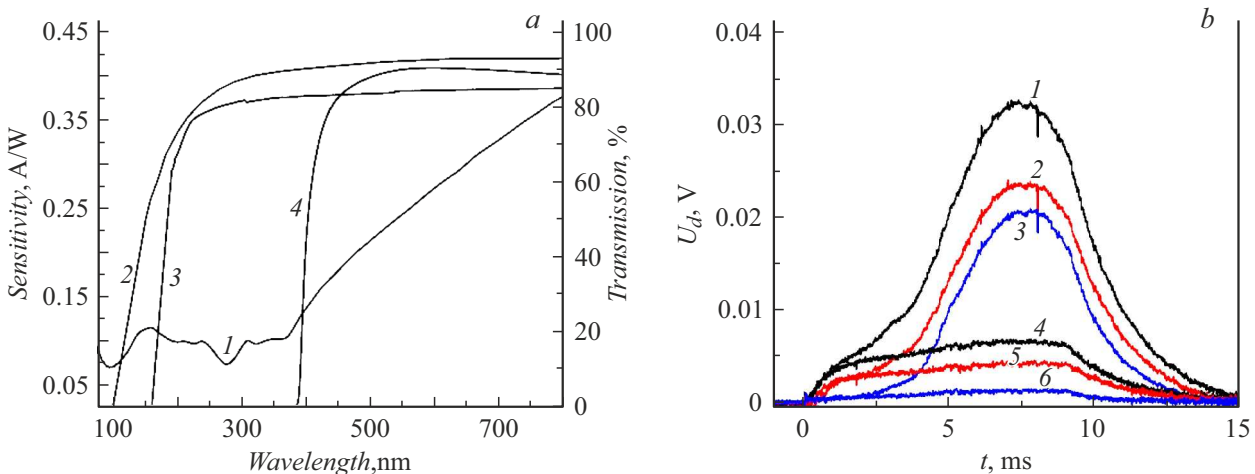


Рис. 2. *a* — спектральная чувствительность диода (*1*) и пропускание MgF_2 (*2*), КУ-1 (*3*), ЖС-10 (*4*). *b* — сигнал с фотодиода при использовании различных фильтров: *1* — фильтр MgF_2 , ток 22 кА; *2* — фильтр КУ-1, ток 22 кА; *3* — фильтр ЖС-10, ток 22 кА; *4* — фильтр MgF_2 , ток 16 кА; *5* — фильтр КУ-1, ток 16 кА; *6* — фильтр ЖС-10, ток 16 кА.

фильтр ЖС-10 — излучение с $\lambda \leq 400$ нм. Полосы пропускания стекол также приведены на рис. 2, *a*. В диапазоне 100–400 нм фотодиод имеет сравнительно ровную характеристику спектральной чувствительности, это позволяет простым вычитанием разделить узкие спектральные области 100–175 и 175–400 нм. Для ограничения максимального сигнала, регистрируемого на фотодиоде, использовались различные диафрагмы (диаметром 0.5 мм для стекла ЖС-10 и 0.3 мм для двух остальных стекол). Спектральная характеристика чувствительности фотодиода в области $\lambda > 400$ нм не имеет плоского участка (рис. 2, *a*). В то же время излучение в этой области имеет низкую интенсивность даже с учетом высокой чувствительности фотодиода в данном диапазоне. Поэтому чувствительность в этой области считалась по средней величине, и с учетом

указанного выше погрешность такого допущения будет невысокой.

Анализ зависимости формы сигналов с диодов для спектральных диапазонов $\lambda > 175$ нм (стекло КУ-1) и $\lambda > 400$ нм (стекло ЖС-10) подробно приведен в [5]. Также в [5] представлены наши оценки мощности излучения в видимой и ультрафиолетовой областях спектра. В настоящей работе добавлен диапазон ВУФ $\lambda > 100$ нм (стекло из MgF_2) и проведена оценка мощности излучения в этом диапазоне. При относительно небольших токах до достижения режимов с развитой анодной активностью, когда поверхность электродов еще полностью не оплавлена (до ~ 18 кА), формы сигналов со всех диодов выглядят примерно одинаково (рис. 2, *b*). Это указывает на то, что поток излучения из дуги растет равномерно с ростом тока по всему наблюдаемому спектру. Однако

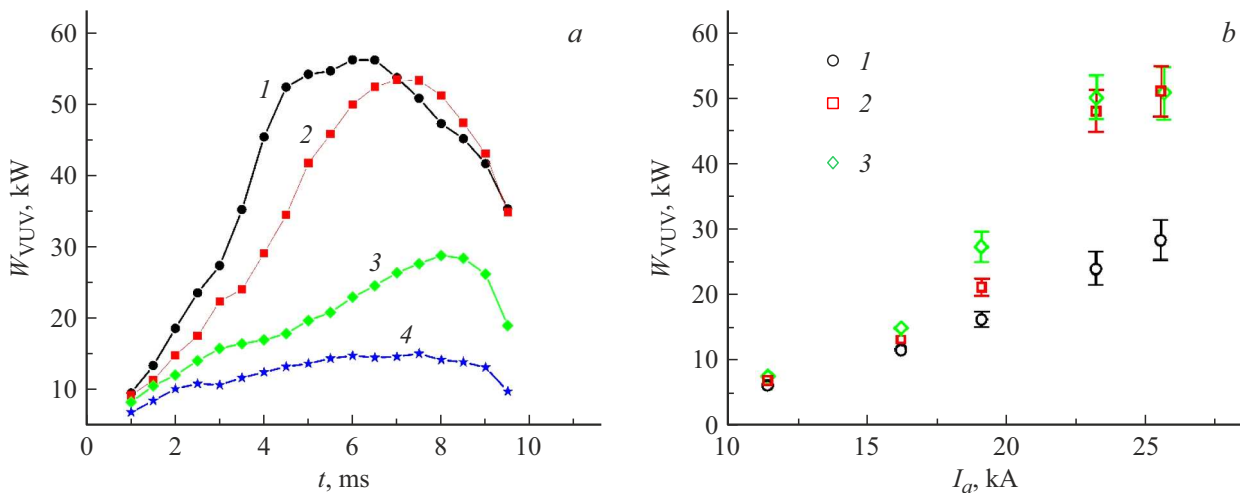


Рис. 3. *a* — зависимости мощности излучения в области вакуумного ультрафиолета от времени для значений тока $I_a = 25$ (1), 22 (2), 19 (3) и 16 кА (4). *b* — зависимости мощности излучения в области вакуумного ультрафиолета от тока дуги в выбранные моменты времени $t = 3.5$ (1), 5.5 (2) и 7.5 мс (3).

при достижении ($I_a > 18$ кА) формы сигналов с диодов изменяются (рис. 2, *b*). Меняется и мощность излучения в области ВУФ (~ 100 – 175 нм). В течение импульса тока 25 кА максимальная мощность излучения ~ 55 кВт достигается уже через 4.5 мс и далее перестает расти (рис. 3, *a*).

Полученные в настоящей работе зависимости мощности излучения от тока в диапазоне ВУФ (~ 100 – 175 нм) в различные моменты времени приведены на рис. 3, *b*. Из этого рисунка видно, что максимальная мощность излучения, достигаемая в конце импульса, растет с ростом тока, и только при предельных токах, когда анодная активность становится сильной ($I_a > 20$ кА), рост мощности излучения прекращается. Более того, при токе ~ 22.5 кА мощность излучения хотя и достигает максимума в конце импульса тока (7.5 мс), но ее величина не превосходит мощности излучения при большем токе (~ 25 кА). Можно сравнить полученные в настоящей работе зависимости мощности излучения от тока в диапазоне ВУФ с зависимостями, полученными в [6] для области „обычного“ ультрафиолета (175–400 нм). В области „обычного“ ультрафиолета максимальная мощность излучения, достигаемая в конце импульса, по мере развития анодной активности растет экспоненциально быстро с током и только при предельном токе, когда анодная активность становится катастрофически сильной (анод начинает разрушаться, происходит интенсивное разбрасывание капель), скорость роста уменьшается, т. е. в области „обычного“ ультрафиолета рост мощности излучения продолжается с ростом тока во всем наблюдаемом диапазоне токов в отличие от области вакуумного ультрафиолета. Можно предположить, что такое перераспределение мощности излучения между областями вакуумного и „обычного“ ультрафиолета происходит потому, что с ростом концентрации паров металлов,

появившихся в промежутке в результате кипения на поверхности электродов, начинает преобладать излучение атомных линий в диапазоне 175–400 нм. В области же ~ 100 – 175 нм такой плотности линий ни для атома, ни для иона нет.

Полученная в настоящей работе оценка мощности излучения в диапазоне 100–400 нм W_{UV} показывает, что в конце импульса с током 25 кА мощность излучения составляет $W_{UV} \sim 300$ кВт, в то время как в разряде выделяется $W_a \sim 900$ кВт, т. е. при больших плотностях тока в конце импульса мощность излучения достигает $\sim 30\%$ от выделяющейся в разряде мощности. Анализ показал, что в развитой вакуумной дуге с анодной активностью при увеличении тока наблюдается перераспределение мощности излучения в исследуемых областях спектра. Мощность излучения W_{VUV} в диапазоне 100–175 нм при достижении режимов с развитой анодной активностью составляет ~ 55 кВт и далее перестает расти.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] E. Schade, D.L. Shmelev, IEEE Trans. Plasma Sci., **31** (5), 890 (2003). DOI: 10.1109/TPS.2003.818436
- [2] L. Wang, S. Jia, Y. Liu, B. Chen, D. Yang, Z. Shi, J. Appl. Phys., **107** (11), 13306 (2010). DOI: 10.1063/1.3386568
- [3] N. Wenzel, S. Kosse, A. Lawall, R. Renz, W. Hartmann, in *2012 25th Int. Symp. on discharges and electrical insulation in vacuum (ISDEIV)* (IEEE, 2012), p. 321–324. DOI: 10.1109/DEIV.2012.6412518
- [4] Ю.А. Баринов, К.К. Забелло, А.А. Логачёв, И.Н. Полуянова, Е.В. Шерстнев, С.М. Школьник, Письма в ЖТФ, **47** (3), 18 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.03.50569.18462

- [Yu.A. Barinov, K.K. Zabello, A.A. Logachev, I.N. Poluyanov, E.V. Sherstnev, S.M. Shkol'nik, *Tech. Phys. Lett.*, **47** (2), 118 (2021). DOI: 10.1134/S1063785021020024].
- [5] Yu.A. Barinov, K.K. Zabello, A.A. Logachev, I.N. Poluyanov, E.V. Sherstnev, A.A. Bogdanov, S.M. Shkol'nik, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **50** (9), 2729 (2022). DOI: 10.1109/TPS.2022.3175577
- [6] Yu.A. Barinov, K.K. Zabello, A.A. Logachev, I.N. Poluyanov, S.M. Shkol'nik, in *Proc. of the 30th Int. Symp. on discharges and electrical insulation in vacuum (ISDEIV)* (Okinawa, Japan, 2023), p. 235–237.
- [7] В.Ф. Лапшин, *Прикладная физика*, № 3, 10 (2023). DOI: 10.51368/1996-0948-2023-3-10-17
- [8] В.Ф. Лапшин, *Прикладная физика*, № 5, 25 (2022). DOI: 10.51368/1996-0948-2022-5-25-31