Зависимость мощности излучения от длины сильноточной вакуумной дуги в области вакуумного ультрафиолета

© Ю.А. Баринов[1], К.К. Забелло[1], А.А. Логачев[1], И.Н. Полуянова[2], С.М. Школьник[1]

[1] ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
[2] Конструкторское бюро коммутационной аппаратуры, Севастополь, Россия
E-mail: zabellok@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 30 апреля 2025 г.
В окончательной редакции 11 июля 2025 г.
Принято к публикации 22 июля 2025 г.

Проведено измерение мощности излучения сильноточной вакуумной дуги длиной 8 mm в области вакуумного ультрафиолета, а также сопоставление результатов с измерениями в короткой дуге (4 mm). С увеличением длины дуги рост мощности излучения в области вакуумного ультрафиолета ($100 \leqslant \lambda \leqslant 175$ nm) менее выражен, чем в диапазоне 175–400 nm. Это подтверждает точку зрения, что основной рост мощности излучения в дуге с развитой анодной активностью происходит за счет излучения атомных линий. Доля всей энергии, переносимой излучением, растет при удлинении дуги и в максимуме достигает 30 %.

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

DOI: 10.61011/PJTF.2025.23.61677.7947

В вакуумных дуговых разрядах роль излучения в энергетическом балансе разряда изучена мало. Это объясняется тем, что плотность плазмы в вакуумных дугах при умеренных токах не столь велика, и потому роль излучения было принято считать незначительной. В работах по энергобалансу излучением пренебрегают еще и потому, что расчет излучения является очень сложной задачей. Лишь в нескольких работах сделаны приближенные расчеты, позволяющие оценить роль излучения в энергобалансе вакуумной дуги [1–3]. Экспериментальных работ по измерению мощности излучения вакуумных дуг в области вакуумного ультрафиолета (ВУФ) до начала настоящих исследований не проводилось.

Ранее нами были проведены измерения мощности излучения короткой (4 mm) сильноточной вакуумной дуги в области ВУФ [4–6]. Исследовалась дуга, стабилизированная однородным аксиальным магнитным полем (АМП), горящая между торцевыми электродами из медь-хромовой композиции (CuCr30) диаметром 30 mm. Было обнаружено, что при больших плотностях тока при появлении анодной активности (интенсивного испарения анода) мощность излучения в области ВУФ начинает быстро расти. И при токе $I > 20$ kA (средняя плотность тока $j \geqslant 2.9$ kA/cm^2) значение мощности излучения достигает величины ~ 50 kW. При увеличении тока до 25 kA (плотность тока $j \geqslant 3.6$ kA/cm^2) и, как следствие, значительном увеличении анодной активности мощность излучения в области ВУФ растет незначительно. В работе [4] прослежена зависимость максимальной мощности излучения в области ВУФ от тока дуги вплоть до тока $I = 25$ kA ($j \sim 3.5$ kA/cm^2), при котором анодная активность сильно выражена. В течение импульса тока 25 kA максимальная мощность излучения ~ 55 kW достигается уже через 4.5 ms и далее перестает расти. Также было высказано предположение, что перераспределение мощности излучения между областями ВУФ 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 nm. Полученная в работе [4] оценка мощности излучения в диапазоне 100–400 nm при токе $I = 25$ kA в конце импульса достигает ~ 300 kW. При этом мгновенная электрическая мощность, выделяющаяся в разряде, составляет ~ 900 kW. Это значит, что в разрядах с высокой плотностью тока, в которых сильно развита анодная активность, мощность излучения (включая область ВУФ) может составлять почти 30 % от полной выделяющейся в разряде мощности.

Интерес представляют измерение излучения более длинной дуги (8 mm) и сопоставление результатов. Такие измерения были проведены в настоящей работе. Стояла задача определить, как будет меняться мощность излучения при увеличении межэлектродного промежутка — удлинении дуги. С одной стороны, при удлинении столба дуги в 2 раза можно рассчитывать на значительное увеличение мощности излучения (в области ВУФ). С другой стороны, если наше предположение верно, и основная доля мощности излучения связана с парами металла, то общая мощность излучения увеличится незначительно. С этой целью были выполнены измерения мощности излучения в условиях, аналогичных описанным выше, но с удвоенным межэлектродным промежутком. В настоящей работе рассмотрим только мощность излучения в области вакуумного ультрафиолета.

Эксперимент проводился на установке, подробно описанной ранее в [4]. Далее приведены основные характеристики установки. Эксперименты выполнены в вакуумной камере при непрерывной откачке ($\sim 10^{-4}$ Pa). Дуга

поджигалась искусственно в центре катода и стабилизировалась однородным АМП с индукцией $\sim 10\,\mathrm{mT/kA}$. АМП создавалось внешними катушками (пара Гельмгольца), и его индукция была подобрана так, чтобы обеспечить практически однородное распределение тока на торцевой поверхности электродов. Использовались электроды на основе композиции CuCr30 диаметром 30 mm, расположенные вертикально на расстоянии $h = 8\,\mathrm{mm}$ один от другого. Дуга питалась импульсом тока с длительностью $\sim 10\,\mathrm{ms}$. Излучение дуги регистрировалось тремя фотодиодами ФДУК8-УВС (АО „Техноэксан"). Фоточувствительный элемент диодов имел диаметр $d = 3.5\,\mathrm{mm}$. Диоды были установлены внутри вакуумной камеры на расстоянии $L = 990\,\mathrm{mm}$ от ее оси напротив середины межэлектродного промежутка. С учетом вида спектральной чувствительности диодов в диапазоне $100 \leqslant \lambda \leqslant 1100\,\mathrm{nm}$ перед фотодиодами помещались светофильтры. Светофильтры были изготовлены из кристалла MgF_2, из кварца КУ1 и из цветного стекла ЖС-10 (ГОСТ 9411–91). Кристалл MgF_2 пропускает излучение с длиной волны $\lambda \geqslant 100\,\mathrm{nm}$, кварц КУ-1 пропускает излучение с $\lambda \geqslant 175\,\mathrm{nm}$, стекло из ЖС-10 пропускает излучение с $\lambda \geqslant 400\,\mathrm{nm}$. Измерения излучения в каждом режиме делались одновременно. Пропускание фильтров и спектральная чувствительность диодов представлены в [4]. Методика оценки мощности излучения дуги по интенсивности потока излучения, падающего на фотоприемник, приведена в [7], а основывалась она на данных работы [8].

Результаты экспериментов при длине дуги $h = 8\,\mathrm{mm}$ качественно схожи с результатами, полученными при исследовании короткой дуги ($h = 4\,\mathrm{mm}$). На рис. 1 приведены примеры результатов измерений фотодиодами через фильтры MgF_2 и КУ1 при различных токах с развитой анодной активностью в сравнении с измерениями, сделанными при длине дуги 4 mm. Выбраны характерные значения тока, при которых в разряде начинаются описанные ниже качественные изменения, вызванные анодной активностью. При относительно небольших токах $I_a \sim$ 10 kA анодная активность не наблюдается. Напряжение горения дуги U_a после завершения развития дуги практически не меняется. Форма осциллограмм напряжения на фотодиодах U_d совпадает с формой осциллограммы тока. При увеличении амплитуды тока до 14–15 kA на электродах появляются следы проявления анодной активности. При токах больше 18 kA форма осциллограмм на фотодиодах существенно меняется (рис. 1, *a*): спустя 3–4 ms сигнал начинает заметно расти и достигает максимума через 7–7.5 ms, а далее падает из-за уменьшения тока. При дальнейшем увеличении амплитуды тока анодная активность становится все более выраженной. Расплав появляется также и на катоде. Максимальное значение сигнала на фотодиодах растет очень быстро и достигается раньше. При токе, превосходящем 22 kA, скорость роста сигнала на фотодиодах такова, что максимальный сигнал на

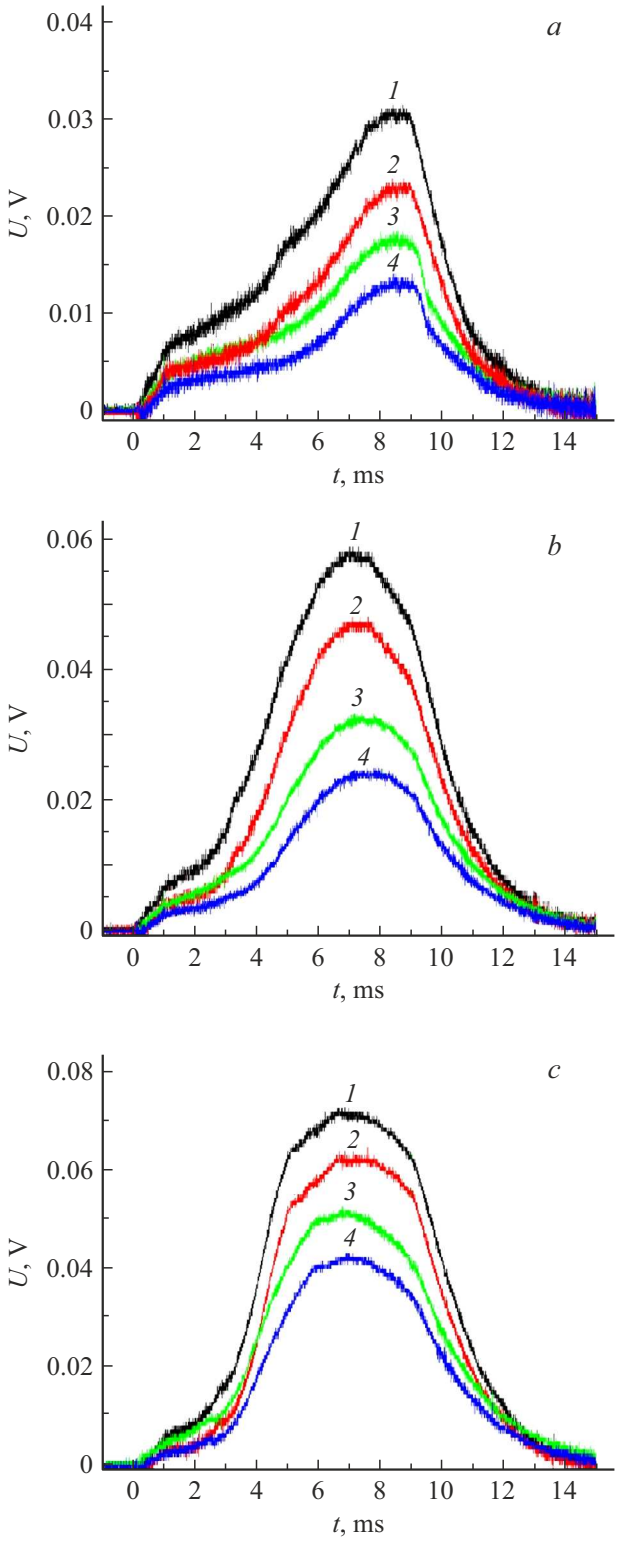

Рис. 1. Сигналы с фотодиодов с разными фильтрами. *1* — $h = 8\,\mathrm{mm}$, фильтр MgF_2; *2* — $h = 8\,\mathrm{mm}$, фильтр КУ-1; *3* — $h = 4\,\mathrm{mm}$, фильтр MgF_2; *4* — $h = 4\,\mathrm{mm}$, фильтр КУ-1. $I = 18.5$ (*a*), 22.5 (*b*), 25 kA (*c*).

фотодиодах наблюдается уже при 3.5–4 ms от начала импульса тока.

Полученные на основе приведенных осциллограмм величины мощности излучения в области ВУФ в зависимости от времени при различных токах в дугах разной длины приведены на рис. 2. Видно, что при предельных токах (22–25 kA) максимум излучения в области ВУФ достигается максимально быстро и уже не зависит от тока. При 25 kA мощность излучения в области ВУФ, достигнув максимума, даже начинает спадать.

Сравнение полученных в настоящей работе зависимостей мощности излучения в области ВУФ от тока в различные моменты времени в дугах разной длины приведено на рис. 3. Из рисунка видно, что максимальная мощность излучения, достигаемая в импульсе, по мере развития анодной активности как в короткой, так и в длинной дуге растет экспоненциально быстро с током. Видно, что максимальная мощность излучения в области ВУФ в длинной дуге (длина увеличилась в 2 раза) незначительно превосходит мощность, излучаемую короткой дугой. Это существенно отличается от роста мощности излучения в области „обычного“ ультрафиолета [6]. Тогда был сделан вывод, что максимальная мощность излучения в длинной дуге практически в 2 раза превосходит мощность, излучаемую короткой дугой, т. е. мощность, излучаемая единицей длины дуги, не меняется, а полная мощность растет пропорционально длине дуги. Мощность излучения в области ВУФ с ростом тока и по мере развития дуги в течение импульса ведет себя совсем другим образом. Такое различие, по-видимому, связано с тем, что оба электрода при токах более 22 kA полностью расплавлены и излучение в промежутке определяется в основном излучением атомных линий испарившегося материала электродов. Следует отметить, что резонансные линии атомов меди 324.7 и 327.4 nm, а также хрома 357.9 nm лежат как раз в области „обычного“ ультрафиолета, а в области ВУФ преобладают ионные линии меди.

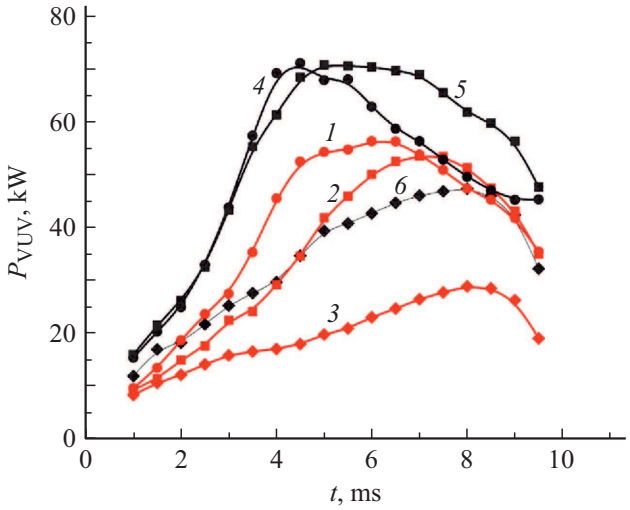

Рис. 2. Зависимость мощности излучения в области ВУФ от времени для разных токов и промежутков. $h = 4$ (*1–3*) и 8 mm (*4–6*). $I = 25$ (*1*, *4*), 22.5 (*2*, *5*) и 18.5 kA (*3*, *6*).

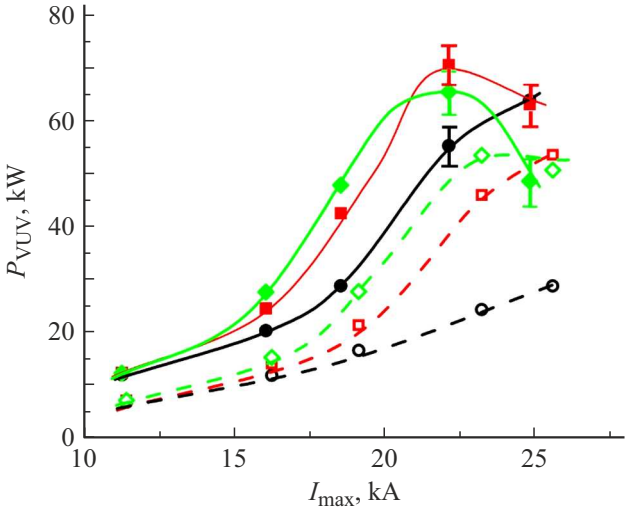

Рис. 3. Зависимость мощности излучения в области ВУФ от тока дуги в выбранные моменты времени. Светлые символы (штриховая кривая) — $h = 4$ mm, закрашенные символы (сплошная кривая) — $h = 8$ mm. $t = 3.5$ (кружки), 5.5 (квадраты) и 7.5 ms (ромбы). Вертикальные отрезки — разброс экспериментальных данных.

Доля мощности, переносимой излучением при удлинении дуги, возросла и достигла 400 kW при токе 25 kA, что составляет $\sim 30\,\%$ от полной мощности, выделяющейся в дуге (1200 kW).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] E.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), 113306 (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. Логачев, И.Н. Полуянова, Е.В. Шерстнев, С.М. Школьник, Письма в ЖТФ, **50** (24), 40 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.24.59436.6419k [Yu.A. Barinov, K.K. Zabello, A.A. Logachev, I.N. Poluyanova, E.V. Sherstnev, S.M. Shkol'nik, Tech. Phys. Lett., **50** (12), 118 (2024). DOI: 10.61011/TPL.2024.12.60370.6419k].

[5] Ю.А. Баринов, К.К. Забелло, А.А. Логачев, И.Н. Полуянова, С.М. Школьник, Прикладная физика, № 1, 11 (2025). DOI: 10.51368/1996-0948-2025-1-11-15

[6] Yu.A. Barinov, K.K. Zabello, A.A. Logachev, I.N. Poluyanova, 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] Ю.А. Баринов, К.К. Забелло, А.А. Логачев, 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. Poluyanova, E.V. Sherstnev, S.M. Shkol'nik, Tech. Phys. Lett., **47** (2), 118 (2021). DOI: 10.1134/S1063785021020024].
[8] В.Ф. Лапшин, Прикладная физика, № 5, 25 (2022). DOI: 10.51368/1996-0948-2022-5-25-31.