

## Излучение вакуумной дуги на медных электродах

© Ю.А. Баринов,<sup>1</sup> К.К. Забелло,<sup>1</sup> А.А. Логачев,<sup>1</sup> И.Н. Полуянова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Конструкторское бюро коммутационной аппаратуры,  
299053 Севастополь, Россия  
e-mail: zabellok@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 24 февраля 2026 г.

В окончательной редакции 27 апреля 2026 г.

Принято к публикации 11 мая 2026 г.

Исследована мощность излучения сильноточной вакуумной дуги, горящей на электродах диаметром 30 mm из бескислородной меди (ОФС Cu). В качестве фотоприемника применялись широкодиапазонные фотодиоды ФДУК8-УВС. Дуга питалась импульсом тока до 25 kA и стабилизировалась внешним аксиальным магнитным полем с приведенной индукцией 10 mT/kA. Измерения проведены при двух длинах дуги — 4 и 8 mm. Излучение регистрировалось во всем диапазоне чувствительности фотодиодов ( $42 \leq \lambda \leq 1100$  nm). Весь исследуемый диапазон длин волн был разделен фильтрами на несколько оптических областей, в том числе исследовалась область  $\lambda \leq 100$  nm. Излучение дуги регистрировалось одновременно в нескольких таких областях. Полученные результаты позволяют оценить изменение мощности излучения дуги при увеличении ее длины в два раза. Анализ результатов измерений показал, что при развитии дуги максимальная мощность выделяется в коротковолновой области спектра, а с развитием анодной активности мощность излучения существенно перераспределяется, в том числе и в видимую часть спектра. Полученные результаты позволили оценить долю излучения в энергетическом балансе дуги.

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

DOI: 10.61011/JTF.2026.08.63362.36-26

### Введение

В последние годы активно развивается математическое моделирование вакуумных дуг (см. работу [1] и ссылки в ней). Большинство моделей рассматривают дуги с умеренными токами в несколько килоампер. При небольших токах ( $< 10$  kA) наблюдается незначительная яркость в дуговом разряде, и может показаться, что раз основным источником света выступают катодные пятна, то ролью излучения в энергетическом балансе разряда можно пренебречь. Одной из причин считать незначительным излучение плазмы в вакуумных дугах также является то, что плотность плазмы при небольших токах в диффузном режиме горения дуги относительно невелика ( $n_e \sim 10^{12} - 10^{14}$  cm<sup>-3</sup>), и поэтому излучением такой плазмы пренебрегают. Но, несмотря на приведенную выше причину, есть несколько работ, где сделаны приближенные оценки роли излучения в энергобалансе во время горения вакуумной дуги в диффузной моде [2–4].

Долгое время излучение плазмы вакуумной дуги исследовалось спектроскопическими экспериментальными методами [5]. Мы подошли к исследованию излучения сильноточной вакуумной дуги с другой стороны: использование в качестве фотоприемника широкополосных фотодиодов позволило нам регистрировать весь поток излучения, исходящий из всего объема плазмы, а использование фильтров позволило разделить этот поток по

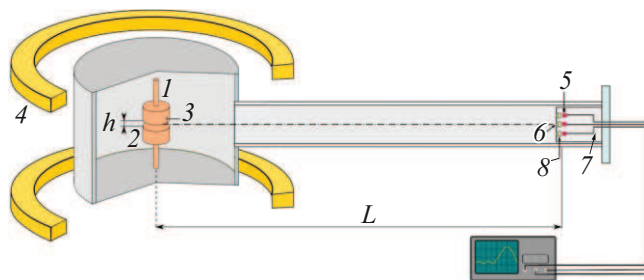
спектру на несколько областей. Практический интерес представляют вакуумные дуги, горящие на конкретных материалах, а именно на медь-хромовой композиции (CuCr30), используемой в производстве современных дугогасительных камерах для распределительных сетей переменного тока среднего класса напряжений. В связи с этим мы начали экспериментальные работы по измерению мощности излучения вакуумных дуг на таких материалах [6–8]. В этих работах отработывалась методика измерений. С целью сбережения регистрирующих фотодиодов все они были прикрыты фильтрами, и поэтому исследовавшийся диапазон излучения составлял  $100 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1100 \text{ nm}$ . В последствии экспериментальная установка была модернизирована, стал доступен для регистрации весь диапазон чувствительности фотодиодов, в том числе промежуток  $\lambda \leq 100$  nm. Также нужно специально отметить, что в наших экспериментах мы рассматриваем вакуумную дугу, горящую только в диффузной моде, когда около электродов (анода и катода) разряд не контрагирован и охватывает всю поверхность электродов, для чего стабилизируем ее магнитным полем.

Как уже говорилось, практический интерес представляют дуги, горящие на композиции CuCr30. Вакуумная дуга горит в парах материала электродов, в данном случае это будет медь и хром, а основным их источником в этом случае, при небольших токах в диффузной моде (плотность тока  $j < 1.6$  kA/cm<sup>2</sup>), в межэлектрод-

ном промежутке являются катодные пятна. При росте плотности тока до  $j \sim 2.3 \text{ kA/cm}^2$  в дуге, остающейся в диффузной моде, уже спустя 4–5 ms с момента поджига, анод сильно разогревается, его температура превышает 2000 К. В течение импульса тока на аноде в центре появляется расширяющаяся область расплава, начинающаяся от центра. Размер этой области тем больше, чем больше средняя плотность тока в дуге. С этой области начинается активное испарение материала. Испарившийся материал анода ионизируется, и межэлектродный промежуток начинает заполняться плазмой, начиная от анода и постепенно вытесняя плазму, образованную струями катодных пятен. После появления расплава на аноде, с некоторой задержкой, расплав появляется и на катоде. Все это сопровождается ярким свечением, развивающимся от анода к катоду. Мощность свечения такова, что на его фоне становятся неразличимы катодные пятна. Яркость свечения плазмы растет на порядок и более. Такое явление принято называть анодной активностью. В этих условиях сначала на аноде, а с дальнейшим ростом тока и на катоде материал электродов активно испаряется в промежуток, что становится дополнительным источником плазмообразующей среды в разряде. По нашим наблюдениям, при достижении средней плотности тока  $j \sim 3.5 \text{ kA/cm}^2$  поверхности катода и анода будут полностью расплавлены, и температура на них превысит 2000 К. Температура плавления меди (1356.55 К) заметно меньше наблюдаемой нами температуры на электродах, а температура плавления хрома (2130 К) — существенно выше. В межэлектродный промежуток вещество поступает как из катодных пятен, так и с электродов через испарение и путем вторичной эмиссии, поэтому нам представляется интересным исследовать излучение более простой вакуумной дуги на медных электродах вместо сложной многокомпонентной дуги. Спектр меди хорошо исследован [9], что позволяет нам провести анализ изменения мощности излучения во время горения дуги, при увеличении тока дуги, а также оценить изменение мощности излучения при изменении длины дуги. Проведенные нами измерения излучения, совместно с регистрируемыми величинами тока разряда дуги и его напряжения, могут быть использованы в определении основных параметров плазмы [10].

## 1. Техника эксперимента

Дуговой разряд горел в вакуумной камере (рис. 1) с постоянной откачкой и поддерживаемым давлением  $p \sim 10^{-4}$  Па. Катод 1 и анод 2 из бескислородной меди (OFC Cu) диаметром 30 mm располагались вертикально. Для того чтобы установить зависимость излучения от длины вакуумной дуги, межэлектродный промежуток  $h$  устанавливался равным 4 и 8 mm. Поджиг дуги осуществлялся в небольшом отверстии в центре катода, в котором осуществлялся отрыв молибденовой иглы 3 с током  $\sim 100$  А. Горение дуги стабилизировалось

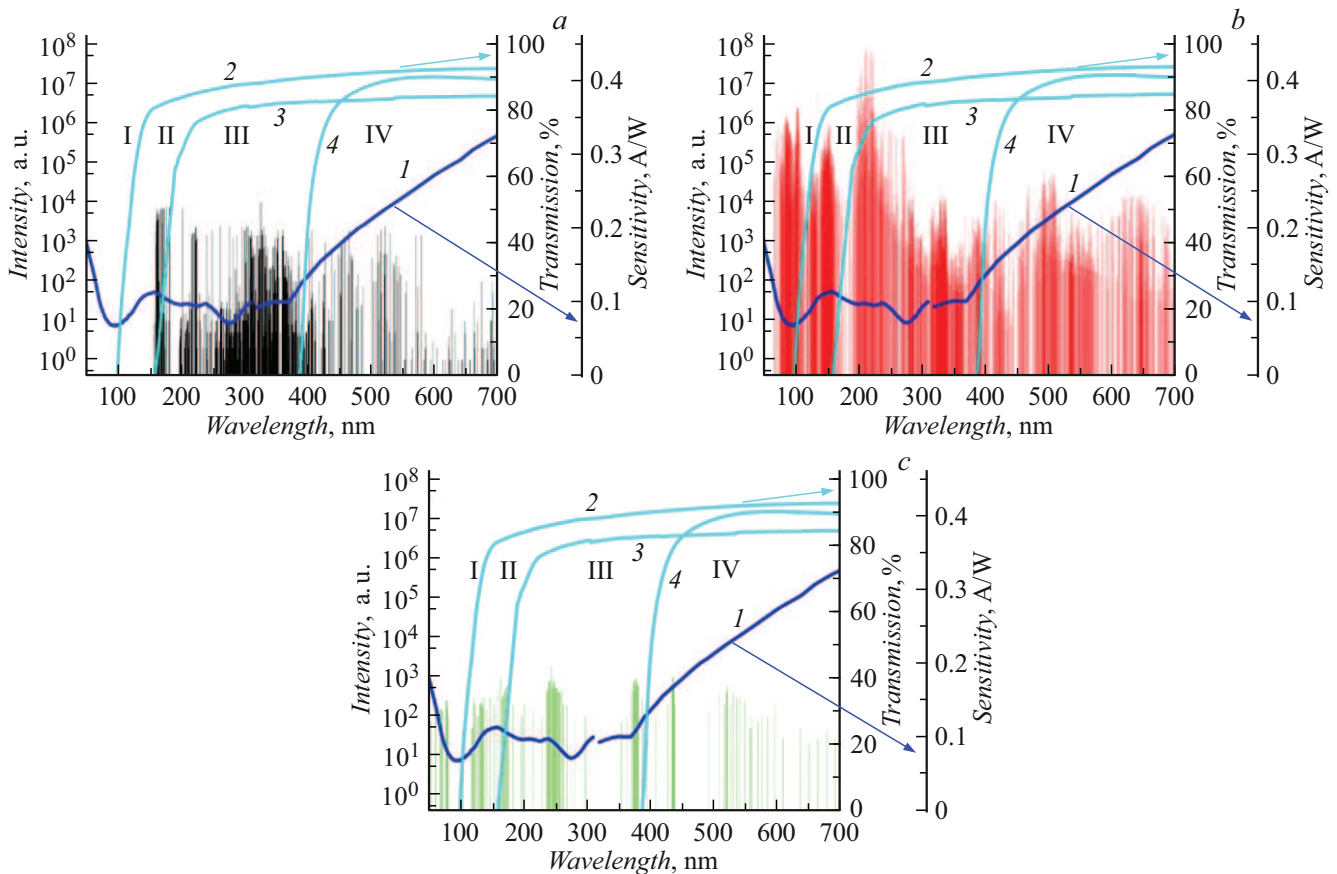


**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 — катод; 2 — анод; 3 — поджиговая игла; 4 — катушки Гельмгольца; 5 — фотодиоды ФДУК8-УВС; 6 — диафрагмы; 7 — экран; 8 — фильтры.

наложением однородного аксиального магнитного поля (АМП), создаваемого парой катушек Гельмгольца 4 снаружи вакуумной камеры. Ток в катушках был подобран так, чтобы обеспечить приведенную индукцию (отношение индукции АМП к амплитуде тока) величиной  $\sim 10 \text{ mT/kA}$  в межэлектродном промежутке во время всего горения дуги. Источник питания позволял сформировать прямоугольный импульс тока до 25 kA с длительностью не менее  $\sim 10$  ms. Длительность фронта составляла  $\sim 1$  ms.

Внутри вакуумной камеры для регистрации излучения дуги были размещены три фотодиода ФДУК8-УВС 5, изготовленными АО Техноэксан. Размещены фотодиоды были напротив середины межэлектродного промежутка и на удалении  $L = 990$  mm от оси горящего разряда. Диаметр  $d$  фоточувствительного элемента такого диода имеет размер 3.5 mm. Чтобы ограничить световой поток на фотодиоды, а, следовательно, и регистрируемый сигнал, использовались в зависимости от тока дуги диафрагмы 6 диаметрами 0.5 или 1 mm. Для исключения электрических помех на регистрируемых сигналах фотодиоды были помещены в медный экранирующий стакан 7. Для исключения регистрации паразитных отражений от стенок вакуумной камеры, труба, в которой помещались фотодиоды, была почернена внутри.

Из-за большого расстояния регистрирующих фотодиодов от источника излучения ( $L = 990$  mm), небольшого размера электродов  $D = 30$  mm и еще меньшего межэлектродного промежутка (4 и 8 mm), дуговой разряд мы принимали за точечный источник излучения. Таким образом, площадь фоточувствительного элемента, размещенного напротив середины межэлектродного промежутка, получает часть всего распространяющегося излучения, равную  $1.6 \cdot 10^{-8}$  или  $6.4 \cdot 10^{-8}$  в зависимости от используемой диафрагмы. Учет возможного отражения излучения от поверхности электродов и возможность связать мощность электромагнитного излучения плазмы дуги с величиной светового потока, попадающего на поверхность фотоприемника, был проверен и оценен на основе расчетной работы, сделанной в [11]. В условиях



**Рис. 2.** Спектральные линии меди, спектральная типовая чувствительность диода ФДУК8-УВС — 1 и пропускание фильтров: 2 — кристалл  $\text{MgF}_2$ , 3 — кварц КУ-1, 4 — цветное стекло ЖС-10. Спектральные линии меди: *a* — атом ( $\text{CuI}$ ), *b* — первый ион ( $\text{CuII}$ ), *c* — второй ион ( $\text{CuIII}$ ). На рисунке отмечены четыре области: I ( $50 \leq \lambda \leq 100 \text{ nm}$ ), II ( $100 \leq \lambda \leq 175 \text{ nm}$ ), III ( $175 \leq \lambda \leq 400 \text{ nm}$ ), IV ( $400 \leq \lambda \text{ nm}$ ).

нашего эксперимента отражением от поверхностей электродов можно пренебречь.

Типовая (паспортная) спектральная чувствительность фотодиода ФДУК8-УВС приведена на рис. 2. В УФ-области ( $\lambda < 400 \text{ nm}$ ) кривая чувствительности практически постоянна, со средней величиной  $0.1 \text{ A/W}$ . Эту величину мы и использовали в расчетах мощности излучения в этом диапазоне спектра. Согласно оценкам и наблюдениям, мощность излучения в видимой спектральной области ( $\lambda > 400 \text{ nm}$ ) существенно слабее (почти на порядок величины) УФ-области, что позволяет для оценки взять, невзирая на имеющуюся зависимость чувствительности от длины волны, среднюю величину, равную  $0.23 \text{ A/W}$ .

Учитывая вид спектральной чувствительности фотодиода и пропускание имеющихся у нас светофильтров, приведенных на рис. 2 в диапазоне  $50 \leq \lambda \leq 1100 \text{ nm}$ , их помещали перед фотодиодами (рис. 1, 8). Светофильтров было три: первый был изготовлен из кристалла  $\text{MgF}_2$ , второй из кварца КУ-1 и последний из цветного стекла ЖС-10 (ГОСТ 9411-91). Кристалл  $\text{MgF}_2$  имеет диапазон пропускания длин волн  $\lambda \geq 100 \text{ nm}$ , кварц КУ-1 пропускает излучение с длиной волны  $\lambda \geq 175 \text{ nm}$ ,

а стекло из ЖС-10 пропускает свет с длиной волны  $\lambda \geq 400 \text{ nm}$ . Получается, что мы можем вести регистрацию излучения следующими способами: 1) не устанавливая никаких фильтров, мы зарегистрируем все излучение вакуумной дуги; 2) установив кристалл  $\text{MgF}_2$ , мы зарегистрируем излучение в диапазоне  $\lambda \geq 100 \text{ nm}$ ; 3) установив кварц КУ-1, мы зарегистрируем излучение в диапазоне  $\lambda \geq 175 \text{ nm}$ ; 4) установив стекло из ЖС-10, мы зарегистрируем излучение в диапазоне  $\lambda \geq 400 \text{ nm}$ . Если проводить одновременную регистрацию излучения дугового разряда несколькими фотодиодами указанными выше четырьмя способами, то, вычитая зарегистрированные сигналы, мы можем весь спектр разделить на четыре участка: I ( $< 100 \text{ nm}$ ), II ( $\sim 100\text{--}175 \text{ nm}$ ), III ( $\sim 175\text{--}400 \text{ nm}$ ), IV ( $\lambda \geq 400 \text{ nm}$ ) (рис. 2). Измерения излучения для каждого тока делались одновременно с помощью трех фотодиодов. Поскольку фотодиодов было три, а регистрируемый спектр был разделен на четыре части, регистрация излучения проводилась двумя комбинациями фильтров:

1) использовалось три перечисленных фильтра на трех фотодиодах;

2) один регистрирующий канал был открыт, а на двух других фотодиодах устанавливались кристалл  $\text{MgF}_2$  и кварц КУ-1.

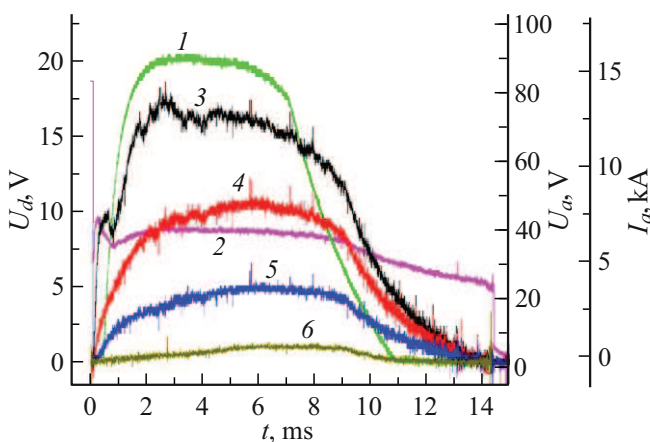
При каждой комбинации фильтров, межэлектродном промежутке и токе дуги делалось несколько измерений (3–7), что позволило получить достаточную статистику.

Кроме чувствительности фотодиода и пропускания фильтров, на рис. 2 показаны относительные интенсивности линий атомов и ионов меди, взятые из [9]:  $\text{CuI}$  — на рис. 2, а,  $\text{CuII}$  — на рис. 2, б и  $\text{CuIII}$  — на рис. 2, с. Из рисунков можно визуально оценить плотность линий меди в зависимости от длины волны. Видно, что много линий  $\text{CuII}$  сосредоточено в областях I и II. Линии  $\text{CuI}$  находятся большей частью в области III и IV. Интенсивность линий  $\text{CuIII}$  существенно ниже, распределены они относительно равномерно по спектру. При этом линии  $\text{CuIII}$  имеются в самой коротковолновой части области I.

## 2. Экспериментальные результаты и обсуждение

Скоростная видеосъемка вакуумной дуги показывает, что разряд, инициированный в центре катода, охватывает всю поверхность за время  $< 1$  мс. Стадию развития дуги хорошо видно по сигналу, регистрируемому фотодиодом без фильтра (рис. 3). В самом начале импульса наблюдается характерный резкий всплеск сигнала на осциллограмме, и где-то после 0.8–1 мс — небольшой провал. Это время, за которое катодные пятна достигают края электрода, и разряд соответственно охватывает всю поверхность. Далее продолжение роста сигнала связано с ростом тока дуги. Будем анализировать излучение дуги после первой миллисекунды импульса тока.

Примеры осциллограмм тока дуги, напряжения горения дуги и сигналов с фотодиодов для дуги с межэлектродным промежутком 8 мм показаны на рис. 3. Для того чтобы в дальнейшем сделать оценку энергии,



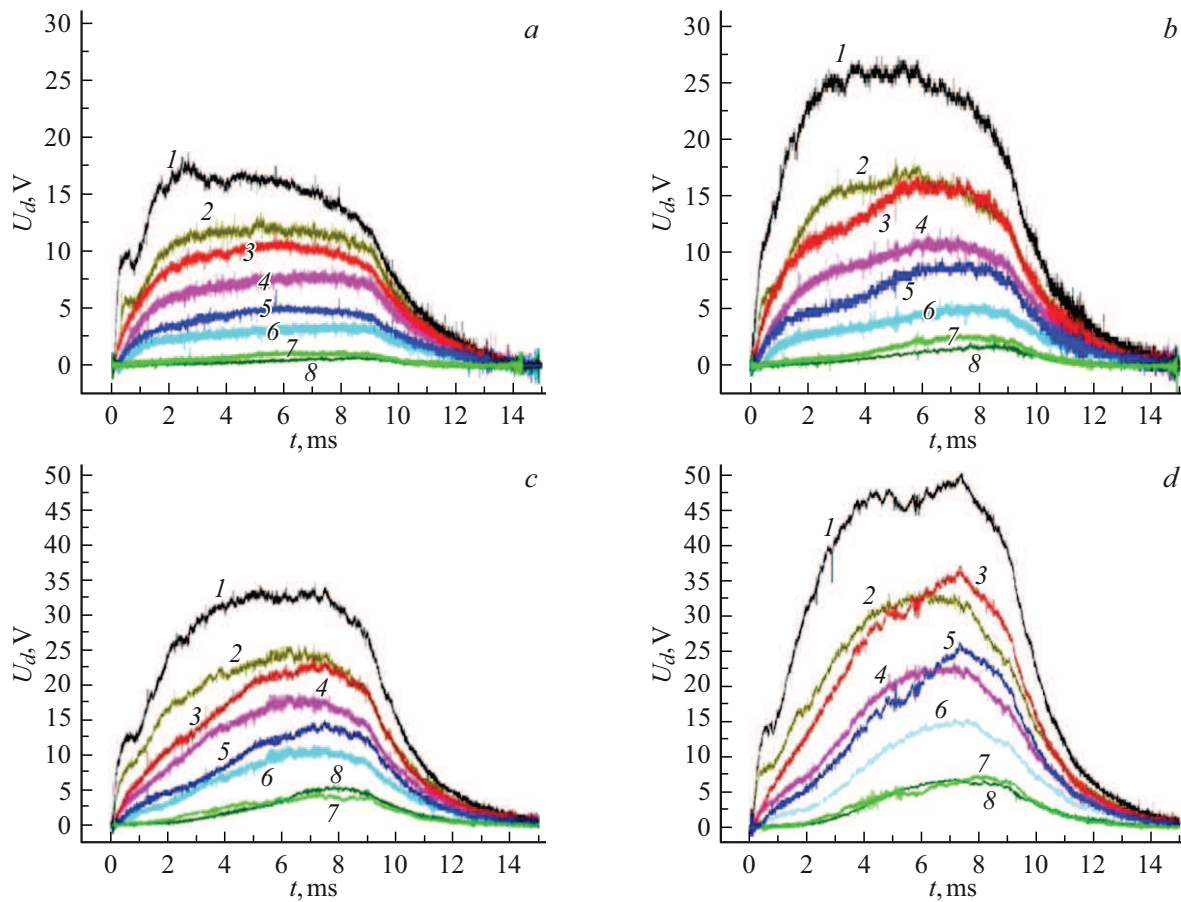
**Рис. 3.** Примеры результатов измерений.  $h$  — 8 мм,  $I_a \approx 16$  кА,  $I$  — ток дуги, 2 — напряжение на дуге. Сигналы с фотодиодов: 3 — без фильтра, 4 — кристалл  $\text{MgF}_2$ , 5 — кварц КУ-1, 6 — стекло ЖС-10.

вложенной в дугу, отметим, что при том же токе дуги напряжение на ней с ростом межэлектродного промежутка в два раза с 4 до 8 мм по форме в основном не меняется, но растет по величине примерно на 10–15 В в зависимости от величины тока. Когда дуга находится в диффузной моде без анодной активности ( $I_a < 16$  кА), фотодиоды при обеих длинах дуги регистрируют сигналы по форме примерно повторяющие форму тока разряда. Все фотодиоды, независимо от установленного фильтра, показывают слабый сигнал. Сигнал, регистрируемый через фильтр ЖС-10, имеет наименьшую амплитуду, что говорит о полном отсутствии расплава на поверхности электродов. Амплитуда сигналов, регистрируемых фотодиодами при длине дуги 8 мм, ожидаемо больше по величине, форма сигналов хоть и аналогична сигналам, полученных для дуги длиной 4 мм, но имеет больше колебаний и шумов.

Примеры полученных осциллограмм с фотодиодов при различных токах и межэлектродных промежутках приведены на рис. 4). На рисунке можно увидеть, как с увеличением амплитуды импульса тока значительно изменяются величины и формы сигналов, регистрируемых фотодиодами. Эти изменения прямо указывают на то, что с ростом тока мощность излучения плазмы растет по величине не только нелинейно, но и изменяется спектр этого излучения.

Первые признаки появления анодной активности в дугах длиной как 4, так и 8 мм в виде оплава небольшого размера в центре анода появляются при токе  $I_a \approx 16$  кА (средняя плотность тока  $j \sim 2.3$  кА/см<sup>2</sup>). Несмотря на это, формы регистрируемых сигналов с фотодиодов примерно повторяют форму тока разряда (рис. 4, а). Исключение можно видеть только в сигнале с фотодиода, установленного без фильтра. Данный сигнал в начале импульса (первая миллисекунда) нарастает заметно быстрее, достигая максимума до середины плато тока, далее начинается спад. Для межэлектродного промежутка 8 мм этот рост выражен сильнее. Отметим, что далее с ростом тока амплитуда сигнала, регистрируемого без фильтра, будет только расти, а характер сигнала будет мало меняться. Регистрируемые сигналы через кристалл  $\text{MgF}_2$  и кварц КУ-1 по форме повторяют друг друга. Сигнал от фотодиода со стеклом ЖС-10 постепенно растет к концу импульса, что, видимо, вызвано постепенным прогревом электродов.

При увеличении тока до  $I_a \approx 19$  кА (рис. 4, б) анодная активность развивается. Увеличивая ток от 16 до 19 кА, мы наблюдаем появление оплава сначала на аноде, а потом с увеличением тока на катоде. Размеры этих оплавов при одинаковом токе больше при большем (8 мм) межэлектродном промежутке, чем при меньшем (4 мм). При токе 19 кА (средняя плотность тока  $j \sim 2.7$  кА/см<sup>2</sup>) анод уже оплавлен полностью, на катоде оплав в центре, но он еще не достиг краев электрода. Это отражается на значительно большем увеличении, в процентном отношении, сигнала, регистрируемого через фильтр ЖС-10, по сравнению с сигналами на других фотодиодах с



**Рис. 4.** Примеры осциллограмм с фотодиодов при различных токах и межэлектродных промежутках,  $I_a$ :  $a$  —  $\approx 16$ ,  $b$  —  $\approx 19$ ,  $c$  —  $\approx 22$ ,  $d$  —  $\approx 25$  кА; без фильтра,  $h$ : 1 — 8, 2 — 4 мм; кристалл  $MgF_2$ ,  $h$ : 3 — 8, 4 — 4 мм; кварц КУ-1,  $h$ : 5 — 8, 6 — 4 мм; стекло ЖС-10,  $h$ : 7 — 8, 8 — 4 мм.

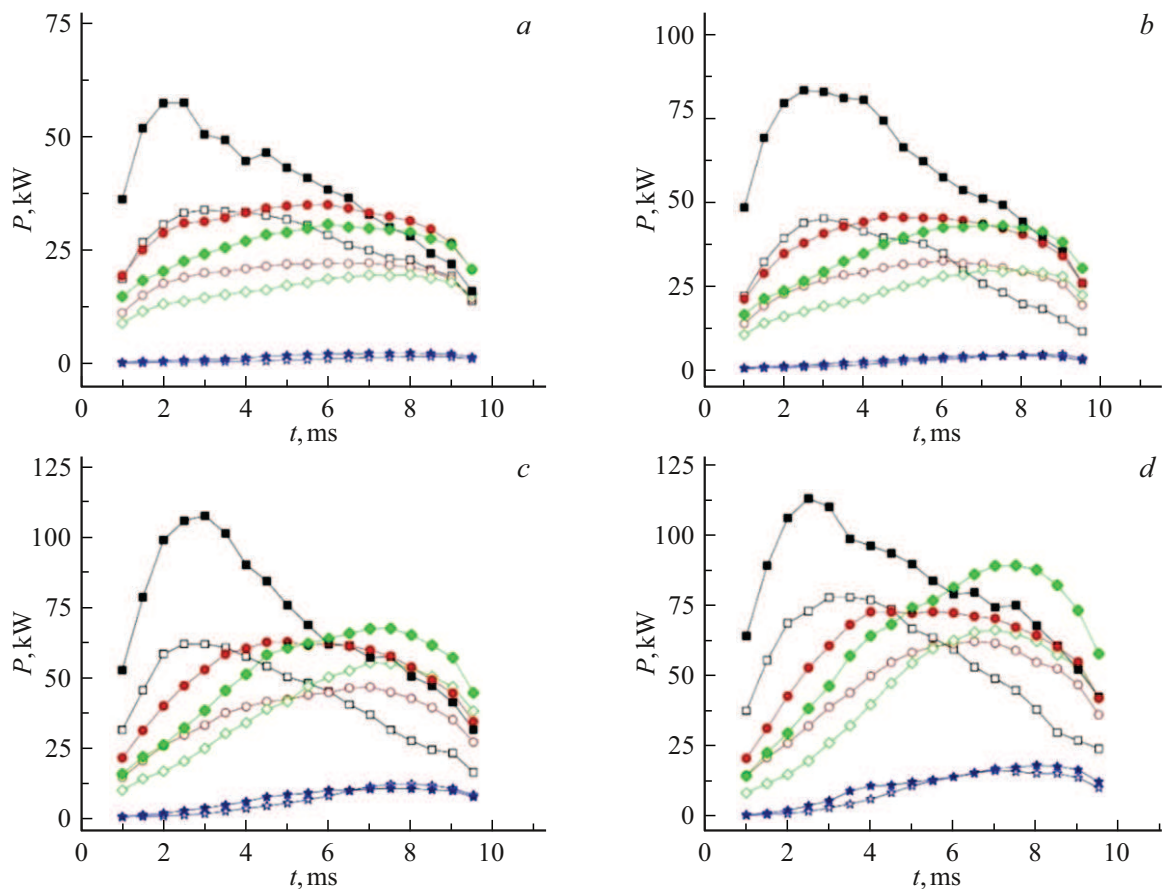
другими фильтрами. И рост этот для дуги длиной 8 мм наступает раньше по времени, чем для дуги длиной 4 мм. В других регистрируемых каналах увеличение тока также приводит к изменению как амплитуды, так и формы сигналов. На осциллограммах сигналов с фотодиодов с фильтрами  $MgF_2$  и КУ-1 начинают вырисовываться очевидные максимумы после 5 мс горения дуги. Рост сигнала на фотодиоде с кристаллом  $MgF_2$  наступает раньше и быстрее сигнала, полученного через кварц КУ-1. Сигнал, регистрируемый фотодиодом без фильтра, существенно вырос, но характер его не изменился.

Если и дальше (рис. 4,  $c, d$ ) повышать ток до  $I_a \approx 25$  кА (плотность тока до  $j \sim 3.6$  кА/см<sup>2</sup>), то это не приводит к существенному изменению формы сигналов, регистрируемых фотодиодами. Амплитуды регистрируемых сигналов растут, но не одинаково во всех регистрируемых каналах. При достигнутых нами максимальных токах (22 и 25 кА) анодная активность достигает предельных величин. При токе 22 кА (средняя плотность тока  $j \sim 3.1$  кА/см<sup>2</sup>) поверхности и анода, и катода при обоих межэлектродных промежутках полностью расплавлены, материал электродов активно разбрызгивается в окружающее пространство, что, по-видимому,

выражается в больших колебаниях и шумах сигналов, регистрируемых фотодиодами. Наличие такого большого количества жидкого материала электродов в межэлектродном промежутке обеспечивает огромный поток пара, приводящий после его ионизации к увеличению плотности плазмы, что, в свою очередь, увеличивает роль излучения в энергобалансе вакуумной дуги.

Поскольку мы с помощью трех фотодиодов с тремя разными фильтрами (или один фотодиод без фильтра) могли фиксировать один и тот же дуговой разряд, вычитая сигналы, регистрируемые разными фотодиодами, мы можем получить зависимость мощности излучения  $P$  от времени в четырех спектральных областях: I, II, III и IV. На рис. 5 показаны усредненные зависимости мощности излучения  $P$  от времени.

На зависимостях, приведенных на рис. 5, видно, что мощность излучения в разных спектральных областях имеет максимум в разное время горения дуги. Качественно зависимости мощности  $P$  от времени для короткой дуги ( $h = 4$  мм) и для длинной ( $h = 8$  мм) схожи. Здесь мы видим закономерную картину, являющуюся следствием изменения с ростом тока формы осциллограмм с фотодиодов. При умеренных токах ( $I_a \leq 16$  кА),



**Рис. 5.** Усредненные зависимости мощности излучения в различных спектральных областях от времени,  $I_a$ :  $a$  —  $\approx 16$ ,  $b$  —  $\approx 19$ ,  $c$  —  $\approx 22$ ,  $d$  —  $\approx 25$  кА; пустые символы —  $h = 4$  мм; заполненные символы —  $h = 8$  мм; квадрат — область I ( $< 100$  нм); круг — область II ( $\sim 100$ – $175$  нм); ромб — область III ( $\sim 175$ – $400$  нм); звезда — область IV ( $\lambda \geq 400$  нм).

до выраженной анодной активности, изменения мощности излучения во всех спектральных областях незначительны. Но при предельных токах ( $I_a \geq 19$  кА), когда и анод, и катод находятся в расплавленном состоянии, мощность излучения меняется на разных участках спектра не одинаково.

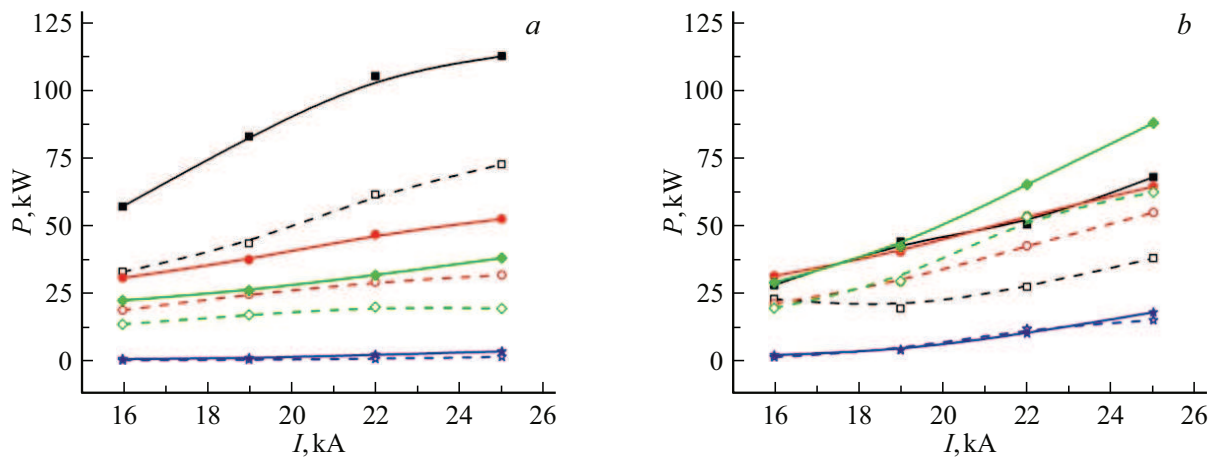
Проанализируем сначала данные, полученные для короткой дуги с длиной межэлектродного промежутка 4 мм. В области I с изменением тока от 16 до 25 кА рост мощности излучения составляет 2.5 раза. Рост мощности линеен с ростом тока. Максимум мощности наблюдается в диапазоне 2.5–3.5 мс.

В областях спектра II, III, и IV формы зависимости мощности от времени при различных токах схожи, но с небольшими отличиями. Мощность излучения в них достигает максимума во второй половине импульса тока. Причем это время сокращается с увеличением тока дуги с 7–8 мс при 16 кА до 6–7 мс при 25 кА.

Наибольшее изменение мощности излучения наблюдается в области IV. По сравнению с дугой в диффузной моде без анодной активности  $I_a \leq 16$  кА ( $j \leq 2.3$  кА/см<sup>2</sup>), в дуге с током  $I_a \geq 22$  кА ( $j \geq 3.1$  кА/см<sup>2</sup>) и развитой анодной активностью мощ-

ность излучения  $P$  увеличивается на порядок. Максимум мощности наблюдается ближе к концу (8 мс) горения разряда при токе 22 кА. С увеличением тока разряда до  $\sim 25$  кА мощность выходит на максимум примерно на миллисекунду раньше, и такой уровень излучения наблюдается дольше по времени.

Далее посмотрим на области II и III в дуге длиной 4 мм. В дуге в диффузной моде без достаточно сильно развитой анодной активности  $I_a \leq 19$  кА ( $j \leq 2.7$  кА/см<sup>2</sup>) мощность излучения в обоих этих спектральных областях растет примерно одинаково. При токе  $\sim 22$  кА максимум мощности в области III резко возрастает по сравнению с областью II, и к концу импульса тока (7.5 мс) имеет максимум. При дальнейшем увеличении тока до  $\sim 25$  кА увеличение мощности излучения в области III незначительно по сравнению с увеличением в области II при том же увеличении тока разряда. Максимумы величин мощности в этих областях II и III сравнимы по величине, и достигаются они почти одновременно. В дуге длиной 8 мм все немного по-другому. Рост мощности излучения с ростом тока в области III не останавливается до достижения предельных токов. В области II мощность излучения



**Рис. 6.** Усредненные зависимости мощности излучения в различных спектральных областях в различные моменты времени импульса от тока дуги,  $t$ :  $a$  — 2.5,  $b$  — 8 ms; пустые символы (прерывистая линия) —  $h = 4$  mm; заполненные символы (сплошная линия) —  $h = 8$  mm; квадрат — область I ( $< 100$  nm); круг — область II ( $\sim 100$ –175 nm); ромб — область III ( $\sim 175$ –400 nm); звезда — область IV ( $\lambda \geq 400$  nm).

не имеет выраженного максимума по времени и растет более или менее равномерно с ростом тока.

Если обратиться к рис. 2, то мы увидим, что в области II достаточно плотно расположены ионные линии меди, в том числе резонансные, а атомных линий там, можно сказать, и нет. В области III и IV, наоборот, атомные линии уже будут существенно определять излучение (там же в области III находятся две резонансные линии атома меди 324.7 и 327.4 nm). Если у нас оплавлены анод с катодом в короткой дуге (4 mm) при токах  $I_a > 20$  kA, то это значит, что будет происходить интенсивное испарение атомов меди с поверхности электродов. И далее эти атомы будут ионизоваться тем больше, чем больше будет ток в дуге (25 kA) и, следовательно, излучение ионов в области II также будет увеличиваться.

Исходя из рис. 5, можно оценить изменения в мощности излучения с увеличением длины дуги в два раза. На рис. 6 представлены значения мощности излучения в различных спектральных областях в моменты времени импульса тока 2.5 ms (рис. 6,  $a$ ) и 8 ms (рис. 6,  $b$ ) в зависимости от тока дуги. Видно существенное увеличение, практически в полтора-два раза, мощности излучения в спектральной области I во всех исследуемых токах. Однако при небольшом токе (16 kA) это увеличение наблюдается только в начале импульса (2–2.5 ms), далее идет спад (рис. 6,  $a$ ), и к восьмой миллисекунде рост мощности едва достигает 20% (рис. 6,  $b$ ). В спектральной области II мощность излучения независимо от роста тока с увеличением длины дуги растет равномерно в 1.3–1.5 раза. В более длинноволновой области III изменение мощности с ростом длины дуги опять различается с ростом тока. При максимальном токе 25 kA в области III в начале дугового разряда ( $\sim 2$  ms) мощность излучения растет в два раза при

удвоении длины дуги, а к концу дугового разряда отношение мощности излучения длинной дуги к короткой становится  $\sim 1.4$ , и это соотношение приблизительно такое же, как и при меньших токах. В спектральной области IV зависимость мощности излучения от длины дуги можно считать незначительной. Это связано с тем, что, хотя она и существенно растет с ростом тока, но только при небольшом токе ( $I_a \leq 19$  kA) регистрируемый сигнал достаточно мал, чтобы говорить о каком бы то ни было влиянии этой мощности на энергобаланс дуги. При больших токах мощность излучения в этой области IV уже можно заметить. Но все равно разность между мощностями при разных длинах дуг невелика и составляет  $\sim 1.0$ –1.2 раз. Видимо, это объясняется тем, что и при длине дуги 4 mm и при длине дуги 8 mm оба электрода одинаково расплавлены, и нет никакой существенной разницы в потоке атомов с их поверхности. Увеличение же излучения в области III в более длинной дуге, видимо, связано с тем, что оплавы электродов сначала на аноде, а потом и на катоде появляются при меньших токах по сравнению с дугой длиной 4 mm. Это, в свою очередь, является следствием того, что в длинной дуге выделяется больше энергии, и эта большая энергия поглощается электродами, вызывая более быстрое плавление в течении импульса тока при меньших значениях тока. Примечательно, что в короткой дуге почти при всех токах мощность излучения в спектральной области I в конце импульса меньше излучения из областей II и III. Этот факт также указывает на то, что в коротком дуговом столбе (4 mm) значительная часть излучения в конце импульса тока определяется вторичной плазмой с электродов. В длинной же дуге (8 mm) значительную роль уже играет первичная плазма, поступающая в промежутки из катодных пятен.

## Выводы

В развитой вакуумной дуге с развитой анодной активностью значительная часть энергии вакуумной дуги переходит в излучение. В дугах с плотностью тока  $j \sim 3.5 \text{ kA/cm}^2$  ( $25 \text{ kA}$  в нашем случае) в разряде максимален (на  $4\text{--}5 \text{ ms}$ ) будет выделяться мощность величиной примерно  $950 \text{ kW}$  в дуге длиной  $4 \text{ mm}$  и  $1250 \text{ kW}$  в дуге длиной  $8 \text{ mm}$ . Эта мощность распределяется по спектральным областям следующим образом: в области I ( $< 100 \text{ nm}$ )  $\sim 75 \text{ kW}$  в дуге длиной  $4 \text{ mm}$  и  $\sim 95 \text{ kW}$  в дуге длиной  $8 \text{ mm}$ ; в области II — ( $\sim 100\text{--}175 \text{ nm}$ )  $\sim 55 \text{ kW}$  и  $\sim 70 \text{ kW}$ ; в области III — ( $\sim 100\text{--}175 \text{ nm}$ )  $\sim 50 \text{ kW}$  и  $\sim 70 \text{ kW}$ ; и в области IV — ( $\lambda \geq 400 \text{ nm}$ )  $\sim 9$  и  $\sim 11 \text{ kW}$  соответственно. Суммарно это дает  $\sim 190$  и  $\sim 375 \text{ kW}$  мощности, что составляет  $\sim 20\%$  внесенной в дугу длиной  $4 \text{ mm}$  мощности и  $\sim 30\%$  — в дугу длиной  $8 \text{ mm}$ . Поэтому при расчете энергобаланса в сильноточных вакуумных дугах необходимо учитывать излучение. Мощность излучения растет неравномерно с ростом тока в разных областях спектра. При увеличении тока с  $16 \text{ kA}$  ( $j \sim 2.3 \text{ kA/cm}^2$ ) до  $25 \text{ kA}$  ( $j \sim 3.5 \text{ kA/cm}^2$ ) излучение в области IV ( $\lambda \geq 400 \text{ nm}$ ) возрастает до десяти раз независимо от длины промежутка. А в спектральной области I ( $\lambda < 100 \text{ nm}$ ) рост составляет всего  $2\text{--}2.5$  раза. В середине же исследуемого диапазона ( $\sim 100\text{--}175 \text{ nm}$  и  $\sim 175\text{--}400 \text{ nm}$ ) рост мощности составляет  $2.5\text{--}3$  раза для обоих диапазонов. Но анализ показывает, что в развитой вакуумной дуге с анодной активностью при возрастании тока до  $22 \text{ kA}$  быстрее растет интенсивность излучения в области обычного ультрафиолета. Далее при росте тока до  $25 \text{ kA}$  мощность перераспределяется в сторону вакуумного ультрафиолета. В коротких дугах ( $4 \text{ mm}$ ), по-видимому, больший вклад в излучение привносит излучение вторичной плазмы, образованной из ионизованных паров электродов. С удлинением дуги роль первичной плазмы в излучении из катодных пятен восстанавливается.

## Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания, номер темы FFUG-2024-0005.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] L. Wang, J. Chen, Zh. Zhang, R. Zhang, H. Gao, Sh. Jia. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **52** (9), 4402 (2024). DOI: 10.1109/TPS.2024.3485966
- [2] E.E. Schade, D.L. Shmelev. *IEEE Trans. Plas. Sci.*, **31** (5), 890 (2003). DOI: 10.1109/TPS.2003.818436
- [3] L. Wang, S. Jia, Y. Liu, B. Chen, D. Yang, Z. Shi. *J. Appl. Phys.*, **107** (11), Art. N 113306 (2010). DOI: 10.1063/1.3386568
- [4] N. Wenzel, S. Kosse, A. Lawall, R. Renz, W. Hartmann. in *Proc. 25th ISDEIV*, Sep., 2012, p. 321–324. DOI: 10.1109/DEIV.2012.6412518
- [5] V.N. Ochkin. *Spectroscopy of Low Temperature Plasma* (John Wiley & Sons, Weinheim, 2009)
- [6] 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). [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]
- [7] 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). [Yu.A. Barinov, K.K. Zabello, A.A. Logachev, I.N. Poluyanov, E.V. Sherstnev, S.M. Shkol'nik. *Tech. Phys. Lett.*, **50** (12), 118 (2024). DOI: 10.61011/TPL.2024.12.60370.6419k]
- [8] Ю.А. Баринов, К.К. Забелло, А.А. Логачев, И.Н. Полуянова, С.М. Школьник. *Письма в ЖТФ*, **51** (23), 38 (2025). DOI: 10.61011/PJTF.2025.23.61677.7947
- [9] A. Kramida, Yu. Ralchenko, J. Reader. NIST ASD Team (2024). NIST Atomic Spectra Database (version 5.12), [Online]. Available: <https://physics.nist.gov/asd> [Mon Mar 24, 2025]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. DOI: 10.18434/T4W30F
- [10] В.Ф. Лапшин. *Прикладная физика*, **3**, 10 (2023). DOI: 10.51368/1996-0948-2023-3-10-17
- [11] В.Ф. Лапшин. *Прикладная физика*, **5**, 25 (2022). DOI: 10.51368/1996-0948-2022-5-25-31