

04 Мощность излучения сильноточной вакуумной дуги, стабилизированной аксиальным магнитным полем, в видимой и ультрафиолетовой областях спектра

© Ю.А. Баринов¹, К.К. Забелло¹, А.А. Логачёв¹, 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: yury@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 13 июля 2020 г.

В окончательной редакции 19 октября 2020 г.

Принято к публикации 19 октября 2020 г.

С помощью кремниевого фотодиода проведены измерения мощности, излучаемой вакуумной дугой в ультрафиолетовой и видимой спектральной областях. Измерения проводились при стабилизации дуги аксиальным магнитным полем в режимах больших токов с развитой анодной активностью. Измерена мощность излучения, выходящего из дуги через боковую поверхность. Полученные результаты показывают, что при анализе баланса энергии сильноточной вакуумной дуги необходим учет излучения.

Ключевые слова: вакуумная дуга, аксиальное магнитное поле, мощность излучения.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.03.50569.18462

При токах, не превышающих ~ 10 кА, вакуумная дуга горит в диффузной моде. Мода называется диффузной, так как ни у катода, ни у анода разряд не контрагирован и охватывает всю рабочую поверхность электродов. При увеличении тока дуга становится неустойчивой и контрагирует у анода. Образуется пятно, из которого выбрасывается струя эрозионной анодной плазмы. Для решения прикладных задач (например, для создания вакуумных дугогасительных камер) нужно стабилизировать дугу, существенно увеличить ток, критический для развития неустойчивости и контрагирования. Наиболее часто используемый способ стабилизации — воздействие на дугу аксиальным магнитным полем (АМП) [1]. Под действием АМП дуга даже при больших токах остается в диффузной моде и не контрагирует, эрозионное пятно на аноде и плазменная струя не образуются.

Однако при большом токе спустя несколько миллисекунд анод даже в диффузной моде сильно разогревается. С поверхности анода начинается интенсивное испарение. Это называют анодной активностью [2]. Дуговой промежуток заполняется плазмой, которую логично назвать анодной. Она вытесняет плазму, принесенную струями из катодных пятен, которая заполняла промежуток, пока анод не был сильно разогрет. Скоростная видеосъемка дуги сбоку под небольшим углом к поверхности катода показывает, что при анодной активности вблизи анода появляется яркое свечение, которое за несколько сотен микросекунд заполняет промежуток. Когда свечение доходит до катода, катодные пятна в нем „тонут“, т.е. они перестают быть различимы на фоне анодной плазмы, хотя на фоне катодной плазмы хорошо различались, так как были намного ярче ее. Яркость свечения при анодной активности так велика, что необходимо использовать плотные нейтральные фильтры, чтобы не перегружать матрицу камеры [3]. Можно думать,

что в этих условиях в энергобалансе дуги излучение играет немалую роль. Это противоречит сложившимся представлениям. При математическом моделировании сильноточной вакуумной дуги обычно предполагается, что роль излучения мала, и оно не принимается во внимание [4].

С учетом отмеченного выше понятно, что измерение энергии излучения, испускаемого дугой с развившейся анодной активностью, весьма актуально. Одна из сложностей — измерение излучения, испускаемого в области вакуумного ультрафиолета. В настоящей работе мы ограничились задачей исследования спектральной области $1100 \geq \lambda \geq 200$ нм.

Эксперименты были выполнены в разборной вакуумной камере с окнами для наблюдения дуги при непрерывной откачке ($p \approx 10^{-4}$ Па). Контакты диаметром $D_c = 30$ мм из композиции CuCr30 были установлены вертикально на расстоянии $h = 4$ мм один против другого на оси симметрии камеры. Катод был расположен сверху. Дуга поджигалась в центре катода и питалась импульсами тока, по форме близкими к прямоугольным, длительностью до 10 мс. Предельный ток источника $I \leq 45$ кА. Однородное АМП (индукция $B_z \leq 0.42$ Т) генерировалось парой катушек Гельмгольца, закрепленных на вакуумной камере. Осциллограммы тока и напряжения фиксировались с помощью осциллографа Tektronix-TDS3014В. Видеосъемка дуги проводилась сбоку под углом примерно 8° относительно поверхности контакта с помощью камеры Phantom MIRO M310.

Одно из окон камеры было изготовлено из кварца КУ-1. Через это окно излучение дуги регистрировалось фотодиодом ФДУК-1УСТ (АО „Техноэксан“). Диаметр фоточувствительного элемента диода $d = 1.2$ мм. Спектральная чувствительность диода показана на рис. 1, а.

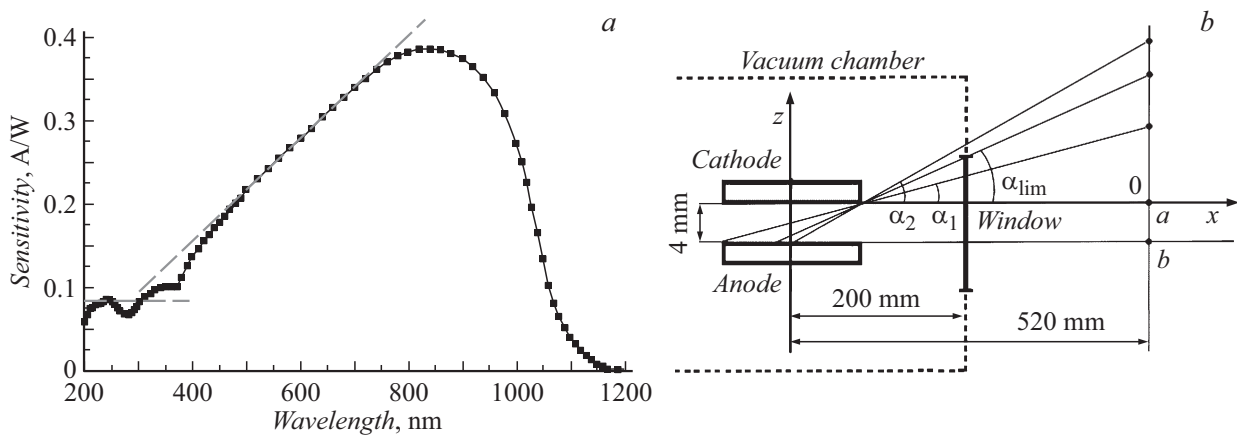


Рис. 1. *a* — спектральная чувствительность фотодиода; *b* — схема измерений (не в масштабе).

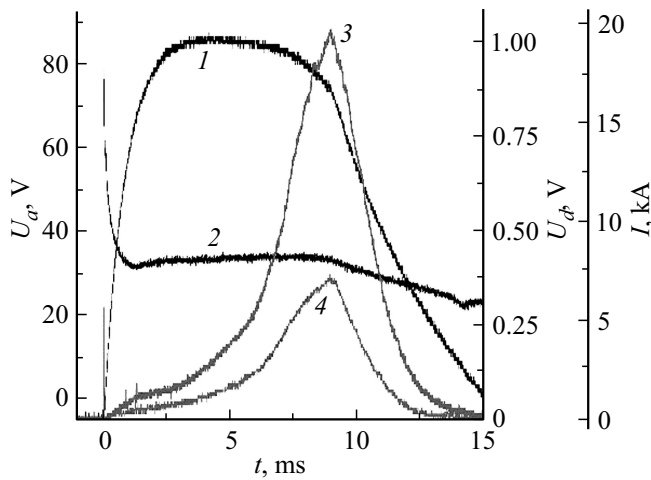


Рис. 2. Осциллограммы: 1 — ток, 2 — напряжение, 3, 4 — сигналы с фотодиода (3 — измерение без фильтра, 4 — измерение с фильтром).

Токовый сигнал с фотодиода снимался через трансимпедансный усилитель с коэффициентом преобразования 1360 V/A, полосой пропускания 0–300 MHz и фиксировался на осциллографе. Диод был расположен вне вакуумной камеры на оси *x*, лежащей в плоскости катода и пересекающейся с осью симметрии разряда *z* (рис. 1, *b*). Излучение дуги частично ограничивалось окном диаметром $D_a = 90$ mm. Расстояние от оси разряда до наружной плоскости окна $H_a = 200$ mm. Расстояние между осью разряда *z* и диодом $H_d = 520$ mm. Такое большое расстояние выбрано во избежание перегрузки диода. Диод можно было смещать в перпендикулярном направлении. С учетом вида спектральной чувствительности диода сделаны две серии измерений: без фильтра и через фильтр ЖС-10, отсекающий излучение с $\lambda \leq 400$ nm. Перед измерениями электроды очищались сериями импульсов с током в несколько килоампер.

На рис. 2 приведены результаты при токе $I = 19$ kA и индукции АМП $B_z = 0.4$ Т. Показаны осциллограммы

тока (*I*), напряжения (*2*) и сигналов с фотодиода без фильтра (*3*) и через фильтр ЖС-10 (*4*). Фотодиод в этих измерениях был расположен на оси *x*, смещения не было. Из рис. 2 видно, что после поджига разряда в центре катода напряжение (*2*) падает, несмотря на то что ток дуги (*1*) растет. Это происходит потому, что катодная привязка дуги расширяется и плотность тока в ней падает. Напряжение дуги U_a (*2*) достигает минимума, когда радиус катодной привязки становится равен радиусу катода. Далее напряжение медленно растет, так как ток продолжает расти. Медленный рост напряжения продолжается, даже когда ток начинает уменьшаться. Это, по-видимому, вызвано развитием анодной активности. Действительно, вначале сигнал с фотодиода U_d (*3*) растет по мере роста тока (*1*) и выходит на плато, когда на плато выходит ток (через 2–2.5 ms), но начиная с 3-й ms U_d вновь начинает быстро расти.

Для оценки энергии, излучаемой разрядом, сделаем упрощающие предположения. Поскольку $D_c = 30$ mm почти в 20 раз меньше H_d (рис. 1, *b*), будем считать разряд точечным источником, равномерно излучающим во все пространство. Тогда диод диаметром $d = 1.2$ mm, расположенный в точке *a* на расстоянии $H_d = 520$ mm, будет получать часть энергии, равную $3 \cdot 10^{-7}$ от полной излучаемой энергии. Сравнение сигналов с диода при измерениях с фильтром и без него (рис. 2, кривые 4 и 3) показывает, что большая часть излучения приходится на ультрафиолетовую часть спектра. Чувствительность приемника в УФ-области практически постоянна; таким образом, оценка мощности не зависит от формы спектра излучения. В видимой области спектра ($\lambda > 400$ nm) чувствительность существенно зависит от длины волны, однако мы для оценки использовали среднюю чувствительность 0.23 A/W. Расчет для момента, когда сигнал с диода достигает максимума (~ 9 ms), показал, что мощность излучения к концу импульса в ультрафиолетовой области достигает величины $W_{ultr} \approx 17$ kW, а в видимой области — $W_{vis} \approx 4$ kW. Мощность во всем диапазоне (200–1000 nm) составляет $W \approx 21$ kW.

Для оценки мощности, излучаемой через боковую поверхность, были сделаны расчеты и измерения, в

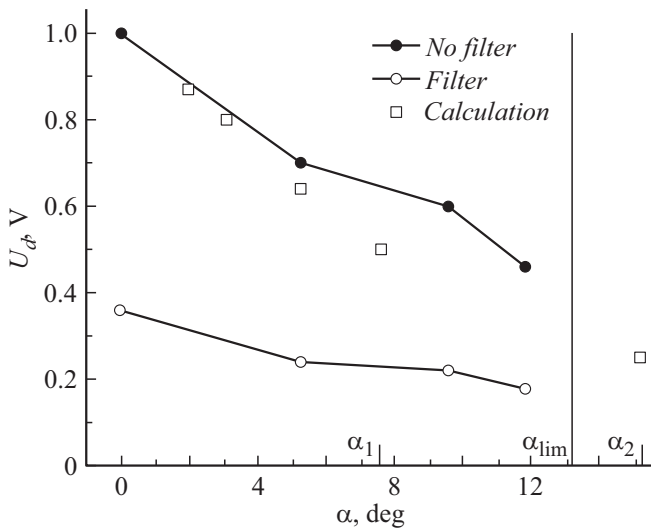


Рис. 3. Зависимость сигнала от углового положения диода. Вертикальной линией отмечен угол, ограниченный окном.

которых датчик смещался относительно оси x вверх. При анализе этих результатов источник излучения уже нельзя считать точечным. Выход излучения через боковую поверхность зависит от геометрии электродов. На рис. 3 приведены сигналы с диода (рассчитанные и измеренные) в зависимости от угла α между осью x и прямой, проходящей через правый край катода и точку, в которой расположен диод (рис. 1, б).

Сначала рассмотрим результаты расчетов. Они сделаны в предположении, что источник однороден, а мощность, регистрируемая диодом, пропорциональна объему источника, видимому из точки, где расположен диод. Здесь размером диода (1.2 mm) пренебрегали и считали его точечным. Сигнал с диода максимален (весь объем источника „виден“ диоду), когда диод расположен на отрезке ab перпендикуляра к оси x . Будем считать, что максимальный сигнал с диода равен 1 V, как в эксперименте (рис. 2). Определим сигнал с диода для двух значений угла α (рис. 1, б). При $\alpha = \alpha_1 = 4/30 \approx 0.13 \approx 7.6^\circ$ сигнал с диода составляет 0.5 V. При $\alpha = \alpha_2 = 4/15 \approx 0.27 \approx 15.2^\circ$ сигнал с диода составляет 0.25 V. Однако это значение нельзя сопоставить с измерениями, так как при еще меньших углах $\alpha = \alpha_{lim} \approx 13.2^\circ$ поток излучения ограничивает окно. Это значит, что при $\alpha \geq \alpha_{lim}$ сигнал с диода уже нельзя считать пропорциональным объему, видимому из точки, где расположен диод.

Результаты измерений без фильтра и расчета хорошо согласуются при $\alpha \leq 6^\circ$ (рис. 3). Однако при $\alpha \geq 6^\circ$ измерения превосходят расчеты, и по мере роста угла это расхождение увеличивается. Можно думать, что расхождение связано с тем, что при $\alpha \geq 6^\circ$ на диод приходит излучение, отраженное от поверхности электрода. Измеренный без фильтра сигнал (рис. 3) пересчитаем в мощность в соответствии с параметрами усилителя и проинтегрируем по α вплоть до $\alpha = \alpha_{lim}$. Излучением,

выходящим при $\alpha \geq \alpha_{lim}$, пренебрежем, так как при увеличении угла мощность излучения достаточно быстро падает и составляет лишь доли того, что регистрируется при $\alpha = 0$. Кроме того, мы пренебрегли также излучением, которое принимает диод, если он расположен на отрезке ab , хотя мощность излучения, падающего на диод, при этом максимальна. Это можно сделать потому, что диапазон, в котором меняется угол при перемещении приемника по отрезку ab , очень мал, т. е. вклад в полный интеграл, когда диод будет расположен на отрезке ab , будет мал, поскольку интегрирование будет выполняться в очень узких пределах. Связанная с этими приближениями ошибка составит не более 20–25%. Из соображений симметрии удвоим результат. В итоге получим оценку мощности излучения в видимой и ультрафиолетовой области, выходящего через боковую поверхность: $W_{side} \approx 3.4 \text{ kW}$.

Окно камеры в процессе работы запылялось, и требовалась очистка. Полностью исключить запыление было невозможно, так как рабочий сильноточный импульс всегда следовал за серией импульсов для очистки электродов. По нашим оценкам пропускание окна примерно равно 0.7. Соответственно мощность той части излучения, которая уходит через боковую поверхность, составляет $W_{side} \approx 5 \text{ kW}$, а полная мощность излучения, генерируемого разрядом с анодной активностью в ультрафиолетовой и видимой части спектра при токе $I = 19 \text{ kA}$, составляет $W \approx 30 \text{ kW}$.

Как видим, заметная часть энергии, вносимой в дугу, трансформируется в энергию излучения. Действительно, „вольтов эквивалент“ катода вакуумной дуги W_c/I (W_c — мощность, выделяющаяся в катоде) по данным [5] составляет 6 V. Это сравнимо со значением, характеризующим мощность излучения $W/I \approx 1.5 \text{ V}$, полученным в данной работе. Дуга генерирует излучение также в вакуумной области спектра и мягком рентгеновском диапазоне. Нашей дальнейшей задачей является оценка мощности излучения в этой области спектра.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.M. Chaly, IEEE Trans. Plasma Sci., **33** (5), 1497 (2005).
- [2] A.A. Logachev, I.N. Poluyanov, S.V. Klochko, IEEE Trans. Plasma Sci., **47** (8), 3572 (2019).
- [3] A.A. Logachev, I.N. Poluyanov, K.K. Zabello, Yu.A. Barinov, S.M. Shkol'nik, IEEE Trans. Plasma Sci., **47** (8), 3516 (2019).
- [4] L.J. Wang, X. Zhang, X.L. Huang, S.L. Jia, Phys. Plasmas, **24** (11), 113511 (2017).
- [5] J.E. Daalder, J. Phys. D: Appl. Phys., **10** (16), 2225 (1977).