

Анодный факел сильноточной вакуумной дуги

© С.А. Попов,¹ А.В. Шнайдер,¹ А.В. Батраков,¹ G. Sandolache,² S.W. Rowe,²
А.Б. Марков,¹ Л.А. Зюлькова¹

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055 Томск, Россия

² Schneider Electric Centre de Recherche, 38 TEC,
38050 Grenoble Cedex 09, France
e-mail: schneider@lve.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 28 июня 2011 г.)

На аноде сильноточной вакуумной дуги длительностью 10 ms и амплитудным значением тока 15 kA зарегистрирован стабильный и яркий факел с отчетливо различимой яркой оболочкой. Факел примыкает к горячему пятну расплавленного металла на поверхности анода. Основной свет факела излучается нейтральными атомами. Оболочка факела окружена областью диффузного свечения, излучаемого ионами. Появление анодного факела является результатом взаимодействия катодной и анодной плазм, в результате чего размеры факела имеют обратную зависимость от тока дуги, поэтому факел достаточно велик для наблюдения только в конце импульса тока. Анодный факел с яркой оболочкой является хорошо воспроизводимым объектом при горении дуги на медно-хромовых электродах. В случае медных электродов появление таких объектов носит случайный характер и привязано к длинным выступам жидкого металла с затрудненным теплоотводом и к крупным каплям, летящим в промежутке. Данный факт свидетельствует о том, что интенсивность испарения материала анода носит ключевой характер в появлении данных факелов с яркой оболочкой.

Введение

Роль анода в горении вакуумной дуги становится заметной и затем значительной по мере роста плотности потока энергии на анод, приводящего к его нагреву и испарению. Переход разряда из режима катодной дуги в режим дуги с активным анодом, как и процесс последующего усиления роли анода в функционировании разряда, не является резко очерченным. Тем не менее, существуют характерные черты различных мод горения вакуумной дуги, что позволяет вводить их классификацию [1,2] как функцию тока и длины промежутка. Выделяют моду интенсивной дуги без анодного пятна, дуги с анодным пятном и промежуточную моду нестабильных анодных пятен. Для описания дуги в вакуумных сетевых выключателях, зажигаемой размыканием контактов с их последующим разведением и ростом тока в область единиц и десятков килоампер, используется более сложная классификация мод дуг [3]. В этой связи все вновь обнаруживаемые факты в физике сильноточной вакуумной дуги сталкиваются с вопросом модовой принадлежности. Это в полной степени относится к недавним наблюдениям анодного факела [4,5], возникающего в области анода сильноточной дуги в вакууме, горящей в течение 10 ms. Наблюдения были выполнены с использованием скоростных средств регистрации изображений. Подобные объекты наблюдались и ранее (например, [6,7]), но длительное время экспозиции при получении изображений всегда приводило к их размытию и невозможности идентификации яркой оболочки. Настоящая работа посвящена более детальному экспериментальному исследованию анодного факела и анализу его характеристик.

Методика эксперимента

В основе эксперимента лежит синтетическая схема Вайл–Добке, которая имитирует работу вакуумной дугогасительной камеры (ВДК) вакуумного сетевого выключателя в электрической цепи с симметричным током короткого замыкания (рис 1). Схема генерирует импульс тока 50 Hz амплитудой до 15 kA и длительностью 10 ms. За импульсом тока следует импульс переходного восстановления напряжения (ПВН) амплитудой до 41 kV и временем нарастания напряжения, регулируемым в пределах от 20 до 100 μ s. Форма фронта импуль-

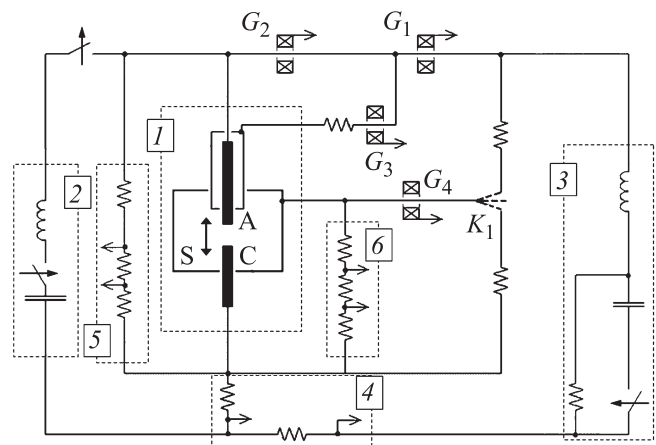


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — вакуумная камера, 2 — 50 Hz контур тока, 3 — 500 Hz контур ПВН, 4 — датчики тока, 5 — датчик напряжения на промежутке, 6 — датчик потенциала экрана, G_i — пояса Роговского, A — анод, C — катод, S — экран.

са ПВН также регулируется. Схема содержит датчики для измерения тока дуги, напряжения на промежутке, ПВН и плавающего потенциала экрана, окружающего контакты.

Дуговой промежуток образовывался двумя идентичными электродами диаметром 2 см, изготовленными из одинакового материала. Промежуток был окружен медным экраном внутренним диаметром 9.2 см, имитирующим экран промышленных ВДК. В качестве материала электродов использовалась либо чистая медь, либо медно-хромовый композиционный материал CuCr25, содержащий 25% хрома.

Дуговой разряд зажигался размыканием контактов, которые разводились с постоянной скоростью 1 м/с. Внешние магнитные поля не создавались. Эксперименты проводились в условиях высокого вакуума с давлением остаточных газов не выше 10^{-5} Па, поддерживаемого магниторазрядным насосом.

Для регистрации серии последовательных изображений в течение акта горения дуги использовалась высокоскоростная 4-х канальная 12-ти разрядная камера HSFC Pro с объективом PC Micro-NIKKOR. Для регистрации изображений в узкой спектральной области использовался набор интерференционных светофильтров спектральной шириной пропускания порядка 10 нм на диапазон длин волн от 350 до 1100 нм с шагом 25 нм. Наблюдения велись через кварцевые окна вакуумной камеры.

Результаты экспериментов

Характеристики дуги в значительной степени зависят от материала электродов, и наши эксперименты не являются исключением. Горение дуги на медных электродах показано на рис. 2. Протекание тока начинается в момент времени T_S , за которым следует момент времени T_O , соответствующий размыканию контакта и зажиганию дуги. С момента зажигания дуги на промежутке устанавливается напряжение, соответствующее катодному падению потенциала, что свидетельствует о горении дуги в диффузной моде, несмотря на малую длину промежутка. В свою очередь, катодное падение потенциала определяет плавающий потенциал экрана. В определенный момент времени режим горения дуги трансформируется в моду с анодным пятном, что отражается на осциллограмме напряжения появлением шума большой амплитуды. Кроме того, падение на промежутке становится заметно выше катодного вплоть до момента нуля тока T_{CZ} , что является следствием интенсивного испарения материала электрода.

Цифровые изображения на рис. 2, b, соответствующие осциллограммам на рис. 2, a, переэкспонированы настолько, что большая часть светлых областей превышает максимальный уровень градации оттенков серого цвета камеры. При меньшем времени экспозиции на изображениях становятся различимыми отдельные светлые об-

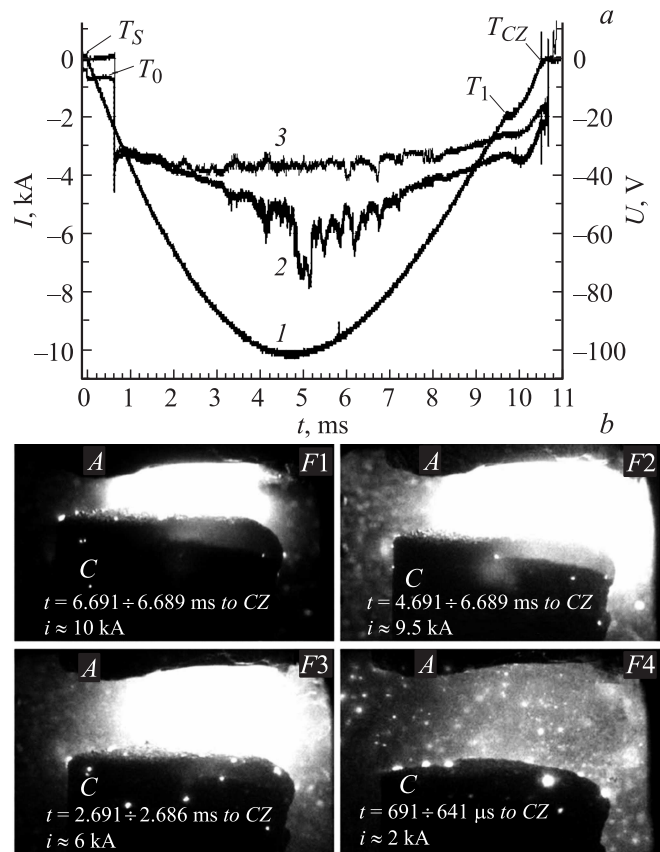


Рис. 2. Пример осциллограмм при горении дуги на медных электродах (a) и соответствующие изображения (b). 1 — ток дуги, 2 — напряжение на промежутке, 3 — плавающий потенциал, T_S — начало импульса тока, T_O — начало горения дуги, T_1 — момент инъекции 500 Hz контура ПВН, T_{CZ} — момент нуля тока.

ласти, появление и форма которых носят нерегулярный характер.

Горение дуги на медно-хромовых электродах показано на рис. 3. В отличие от дуги на медных электродах, в данном случае напряжение на дуговом промежутке

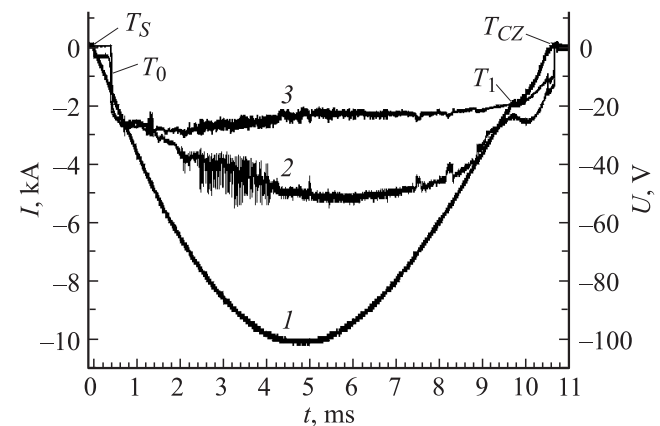


Рис. 3. Пример осциллограмм при горении дуги на медно-хромовых электродах.

имеет меньшую амплитуду и большую частоту шума. Это свидетельствует о большем числе катодных пятен и более частой смене их позиций в случае медно-хромового катода. Часто амплитуда шума спадала по мере роста тока, что отчетливо видно на примере (рис. 3). Такое изменение в характере падения напряжения на промежутке может свидетельствовать о существовании промежуточной моды нестабильных анодных пятен перед зажиганием стабильного анодного пятна [1].

Часто на изображениях дуги на медно-хромовых электродах наблюдался анодный факел (иногда два факела), имеющий отчетливую и яркую оболочку [4,5]. Была замечена тенденция увеличения размеров факела с уменьшением тока дуги (рис. 4). Именно поэтому с целью достижения лучшего пространственного разрешения наблюдения за поведением факела были осуществлены преимущественно в конце импульса. Такая зависимость размеров факела от тока дуги свидетельствует о том, что появление яркой оболочки факела является результатом баланса между потоком катодной плазмы, становящимся менее плотным при меньшем токе, и потоком испаряющегося вещества анода, интенсивность которого не

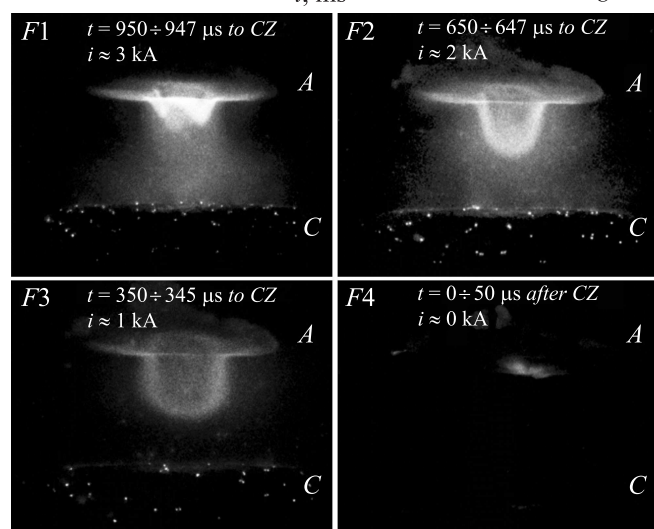
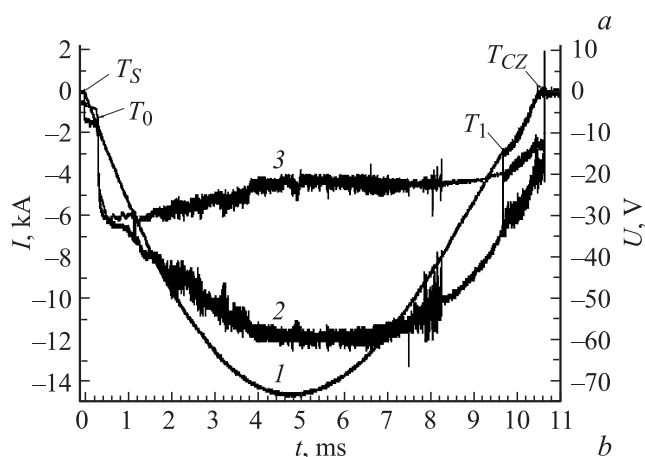


Рис. 4. Пример осциллограмм при горении дуги на медно-хромовых электродах (а) и соответствующие изображения (б).

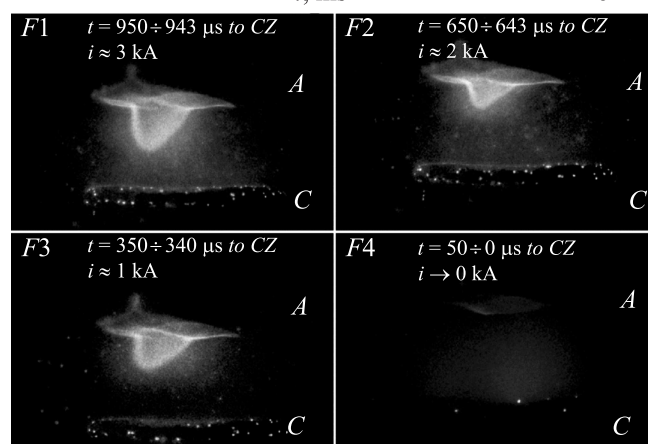
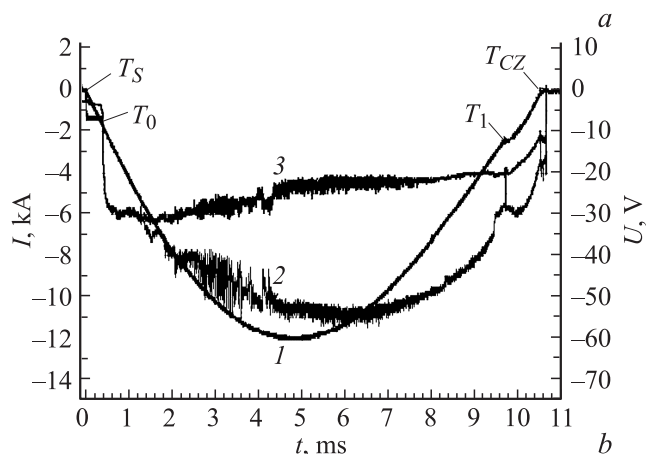


Рис. 5. Пример осциллограмм при горении дуги на медно-хромовых электродах (а) и соответствующие изображения (б).

испытывает столь сильного затухания даже к концу импульса тока вследствие теплоемкости анода [8].

Размеры анодного факела также зависят от напряжения на промежутке. Синтетическая схема, используемая в экспериментах, производит небольшое отклонение в поведении тока в момент времени T_1 , когда происходит инъекция импульса тока 500 Hz контура, производящего импульс ПВН после перехода тока дуги через ноль. В ответ на отклонение тока напряжение на промежутке также испытывает некоторый подъем, в то время как увеличение катодного падения потенциала практически не наблюдается, что свидетельствует о том, что отклик на подъем тока испытывает падение напряжения на столбе плазмы. Увеличение напряжения на промежутке приводит к сокращению размеров факела (рис. 5), чего не наблюдается при отсутствии скачка напряжения на промежутке (рис. 4). Этот факт не противоречит концепции того, что размеры и форма оболочки анодного факела контролируются балансом между катодными и анодными потоками.

Анодный факел с отчетливой оболочкой наблюдался также при горении дуги на медных электродах. Но, в отличие от случая медно-хромовых электродов, появление анодных факелов на медных электродах носит нерегу-

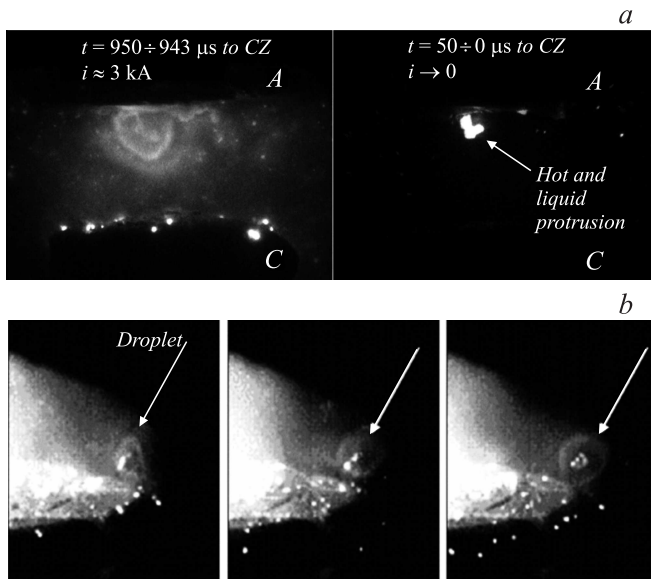


Рис. 6. Две различные серии последовательных изображений анодного факела над жидкометаллическим выступом (a) и светящаяся оболочка вокруг летящей в промежутке капли (b) в дуге на медных электродах.

лярный характер от импульса к импульсу. Кроме того, их форма также не отличается воспроизводимостью, поскольку анодные факелы в этом случае привязаны к жидкометаллическим выступам. Более того, данные объекты в дуге на медных электродах появляются только вокруг жидкометаллических выступов (рис. 6, a) или вокруг капель (рис. 6, b), летящих в промежутке. Этот факт говорит о том, что испарение материала анода играет ключевую роль в появлении ярких оболочек в области анода сильноточной вакуумной дуги.

При регистрации спектрально-дифференцированных изображений удалось получить интересную информацию о процессах, происходящих в дуговом промежутке. Для этого были выбраны три различных интерференционных светофильтра на длины волн линий Cr I (рис. 7, a), Cu II (рис. 7, b) и Cr I и Cu II одновременно (рис. 7, c). Данные линии были выбраны исключительно по причине ограниченности набора светофильтров, в то время как линии Cu I и Cr II также присутствуют в дуге на медно-хромовых электродах. Изображения на рис. 7 показывают, что большая часть света анодного факела излучается возбужденными нейтральными атомами. Оболочка анодного факела окружена диффузным гало, излучаемым ионами. Появление подобного гало также наблюдается на спектрально-интегрированных изображениях анодного факела (рис. 6, a).

Обсуждение результатов

Исходя из внешнего вида изучаемого объекта, можно предположить, что источник излучения анодного факела сильноточной вакуумной дуги сосредоточен в довольно

узкой оболочке, тогда как пространство внутри оболочки остается темным. Однако это утверждение требует проверки, заключающейся в обратном преобразовании Абеля [9] интенсивности изображения при условии симметричности объекта относительно его оси. Кроме того, для корректности такой обработки изучаемый объект должен быть оптически тонким. Для проверки соответствия данному требованию были выполнены наблюдения теневого изображения анодного факела с использованием подсветки излучением лазера на красителе с пере-

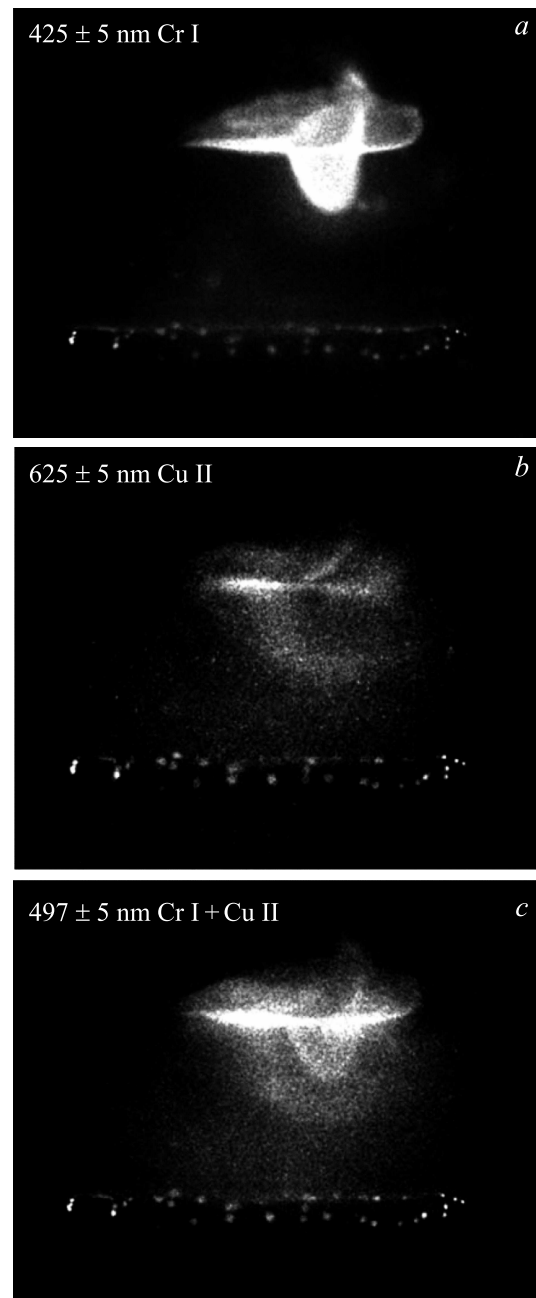


Рис. 7. Одновременно зарегистрированные спектрально-дифференцированные изображения промежутка при горении дуги на медно-хромовых электродах, полученные за 500 μs до момента нуля тока, что соответствует току разряда 1.5 kA.

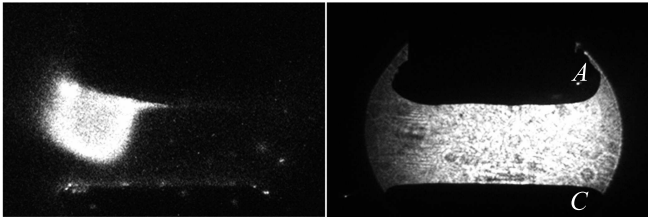


Рис. 8. Зарегистрированные с интервалом 20 ns изображение собственного свечения плазменного факела (a) и теневое изображение на резонансной линии поглощения атомов меди (b) 425 nm при подсветке промежутка импульсным лазером длительностью 10 ns и длиной волны генерации, совпадающей с линией поглощения.

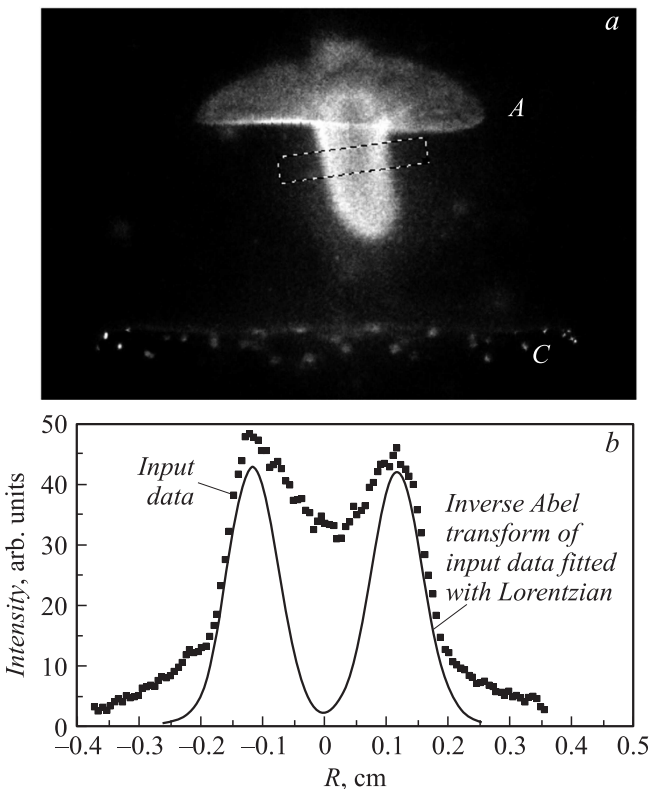


Рис. 9. Исходное изображение анодного факела (a) и вычисленное на его основе распределение интенсивности свечения вещества по радиусу (b).

страиваемой длиной волны генерации. Лазер настраивался на резонансную длину волны поглощения света атомами паров материала электродов подобно тому, как это успешно использовалось при диагностике плазмы катодного пятна [10]. Использование многоканальной камеры позволяло одновременно наблюдать собственное свечение анодного факела. Заметного поглощения лазерного излучения замечено не было (рис. 8), что доказывает малую оптическую толщину исследуемого объекта даже на резонансных линиях поглощения.

Пример обратного преобразования Абеля исходного изображения на рис. 9, a представлен на рис. 9, b. Ре-

шение задачи проводилось для цилиндрической области, выделенной прямоугольником на рис. 9, a, при этом для этой области вычислялось усредненное плоское сечение, нормальное к оси объекта. Такая мера позволяла снизить влияние шума на результат интегрирования. После этого и с той же целью исходные данные аппроксимировались функцией Лоренца. Восстановленное распределение интенсивности свечения объекта по радиусу (рис. 9, b) явно указывает на то, что интенсивность свечения оболочки факела значительно ярче свечения вещества внутри оболочки.

Таким образом, имеем в распоряжении следующие факты: 1) пространство внутри оболочки относительно темное, 2) излучение из оболочки эмитируется нейтральными атомами, 3) оболочка окружена внешним (по отношению к аноду) гало, излучение из которого эмитируется ионами. Данные факты могут быть интерпретированы с использованием модельных представлений [11]. Согласно [11], в результате столкновения катодной плазмы, распространяющейся со скоростью порядка 10^6 cm/s, с анодной плазмой, распространяющейся с меньшей скоростью, возможно формирование устойчивого ударного фронта в дуговом промежутке. При этом поток катодной плазмы может замедляться практически до полной его остановки. В отличие от [11], где оба потока рассматриваются как высокоионизованная плазма, полагаем, что анодная плазма имеет низкую степень ионизации. В этом случае при столкновении потоков и замедлении скорости их распространения возможно формирование ионизационно-рекомбинационного фронта (ИРФ), в котором основным механизмом ионизации нейтральной компоненты анодного потока является резонансная перезарядка ионов на атомах. В результате такой перезарядки и с учетом результатов [11] действительно возможно формирование оболочки из возбужденных атомов, окруженной ионным гало. Структура такого фронта приведена на рис. 10. На основании наблюдений и с учетом концепции ИРФ можно сделать оценки средней концентрации паров в анодном факеле. Толщина оболочки ИРФ, L , составляет

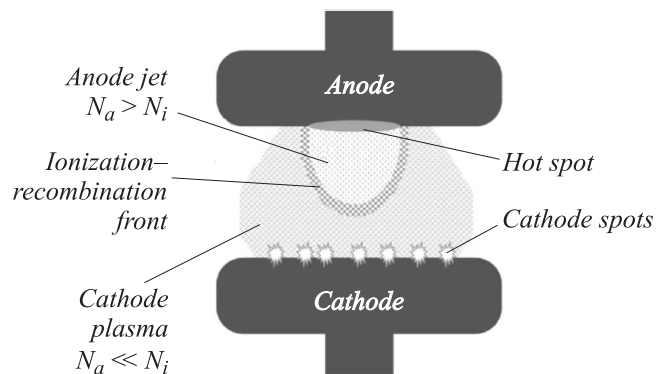


Рис. 10. Модельное представление структуры анодного факела, где N_i — концентрация ионов и N_a — концентрация атомов.

1 mm. С другой стороны, перезарядка осуществляется на длине $L \approx \sigma^{-1} N_a^{-1}$, где σ — сечение резонансной перезарядки (порядка 10^{-14} cm^2 [12]) и N_a — концентрация нейтральных атомов. В этом случае $N_a \approx 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, что соответствует давлению пара порядка 10 Па. Данная оценка является вполне резонной для условий сильноточной вакуумной дуги [1,2].

Для достижения режима формирования ИРФ анод должен испаряться настолько интенсивно, чтобы электронного потока, эмитированного катодными пятнами, было недостаточно для ионизации паров в непосредственной близости от поверхности анода. Именно поэтому анодный факел с оболочкой формируется только вокруг теплоизолированных выступов в случае медного анода. С другой стороны, формирование подобного факела является частым событием в случае плоского медно-хромового анода при прочих равных условиях. Это означает, что тепловой режим поверхности массивного медно-хромового анода в дуге характеризуется таким же затрудненным теплоотводом, как и в случае теплоизолированного выступа на медном аноде. Причиной такого затрудненного уноса тепла может быть существование области на диаграмме состояний системы медь-хром [13], в которой жидкая медь и жидкий хром не образуют раствора. Это приводит к существованию большого числа чередующихся границ разделов двух жидкостей, создающих препятствие для отвода тепла. Подобная ситуация возникает в вакуумной дуге с накалившимся анодом [14], где такой режим горения дуги целенаправленно используется для формирования потоков испаренного материала с предельно низкой концентрацией капель.

Кроме вышеуказанной причины интенсификации испарения, связанной с существованием областей несмешивающихся расплавов, скорость испарения поверхности электрода сама по себе сильно зависит от термодинамических характеристик материала, из которого он сделан. В частности, это относится к меди и хрому. Для оценки толщин испаренного и расплавленного слоев, численным интегрированием одномерного уравнения теплопроводности с поверхностным тепловым источником было проведено моделирование температурных полей для электродов, изготовленных из меди и хрома. Процесс плавления моделировался с помощью метода эффективной теплоемкости, а процесс испарения учитывался в рамках модели теплового разрушения. Тыльная сторона мишени предполагалась теплоизолированной. Более детально процедура решения уравнения теплопроводности описана в работе [15].

Результаты моделирования температурных полей представлены на рис. 11. Следует иметь в виду, что данное моделирование носит сугубо иллюстративный характер. Для поверхности меди характерны относительно большая глубина расплава и относительно малая толщина испаренного слоя. Хром испаряется значительно интенсивнее, чем медь. В результате значительная часть

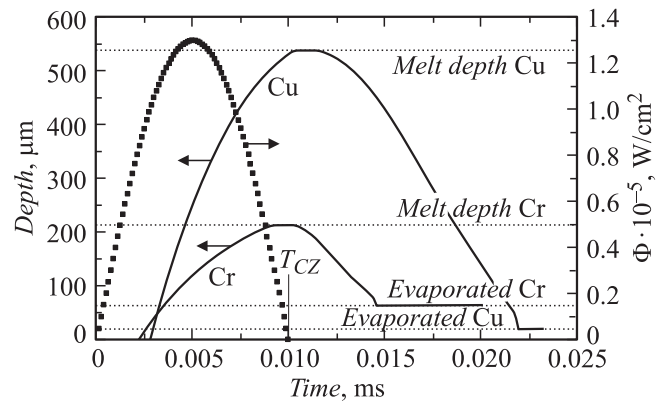


Рис. 11. Динамика глубины зоны расплава для случая электрода из чистой меди и чистого хрома при потоке энергии на поверхность, представленном пунктирной линией.

энергии уходит на его испарение, и глубина расплава на поверхности хрома значительно меньше, чем на меди.

Заключение

На основании полученных данных можно сделать следующие выводы.

1. В сильноточной вакуумной дуге зарегистрирован анодный факел, имеющий яркую оболочку. Излучение из оболочки эмитируется нейтральными атомами. Излучение вещества внутри оболочки значительно слабее, чем в оболочке. Оболочка окружена диффузным гало, свет из которого излучается преимущественно ионами.

2. Появление анодного факела с яркой оболочкой зависит от интенсивности испарения материала анода. Для появления такого факела требуется высокая интенсивность испарения.

3. В условиях сильноточной вакуумной дуги на массивных медно-хромовых электродах реализуется тепловой режим, при котором скорость испарения материала анода достаточно высока для стабильного формирования анодного факела с яркой оболочкой. В случае медных электродов подобный режим реализуется только на жидкометаллических выступах с затрудненным отводом тепла и вокруг крупных капель, летящих в промежутке.

4. Высокая скорость испарения поверхности медно-хромового анода может быть связана с существованием диапазона на диаграмме состояния системы медь-хром, в котором жидкая медь и жидкий хром не образуют раствора. Наличие множественных границ между несмешиваемыми жидкостями может быть причиной затрудненного отвода тепла.

5. В качестве механизма формирования оболочки анодного факела можно рассматривать ионизационно-рекомбинационный фронт, формируемый в результате столкновения потока высокоионизованной катодной плазмы с потоком испаренного материала анода, имеющего большую долю нейтральной компоненты.

Авторы выражают признательность профессору Д.И. Проскуровскому за интерес к работе и плодотворные дискуссии.

Часть работы, посвященная оптической диагностике анодной плазмы, выполнена в рамках государственного контракта № 14.740.11.0317.

Список литературы

- [1] *Miller H.C.* Anode Phenomena, in Handbook of Vacuum Science and Technology. Fundamentals and Applications. / ed. by R.L. Boxman, Noyes Publications. 1995. P. 308–366.
- [2] *Slade P.G.* The Vacuum Interrupter. Theory, Design, and Application. NY: CRC Press. 2008. ch. 2. 510 p.
- [3] *Heberlein J., Gorman J.* // IEEE Trans. Plasma Sci. Dec. 1980. Vol. 8. N 4. P. 283–288.
- [4] *Batnikov A., Schneider A., Rowe S., Sandolach G., Markov A., Zjukova L.* // Proc. 24th Int. Symp. Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. 2010. Braunschweig, Germany, P. 351–354.
- [5] *Maatsui Y., Sano A., Komatsu H., Satou H., Saito H.* // Proc. 24th Int. Symp. Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. 2010. Braunschweig, Germany, P. 324–327.
- [6] *Janiszewski J., Zalucki Z.* // Czechoslovak Journ. of Physics. 1996. Vol. 46. N 10. P. 961–971.
- [7] *Janiszewski J., Zalucki Z.* // Proc. 17th Int. Symp. Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. 1996. Berkley, USA, P. 220–225.
- [8] *Rich J.A., Prescott L.E., Cobine J.D.* // J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42. N 2. P. 587–601.
- [9] *Bracewell R.N.* The Fourier Transform and Its Applications. McGraw-Hill. N Y, 2000.
- [10] *Batnikov A., Jüttner B., Popov S., Proskurovsky D., Vogel N.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2005. Vol. 33. N 5. P. 1465.
- [11] *Gidalevich E., Goldsmith S., Boxman R.L.* // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 92. N 9. P. 4891–4896.
- [12] *Smirnov B.M.* Reference Data on Atomic Physics and Atomic Processes. Berlin: Springer–Verlag, 2008. P. 81.
- [13] Диаграммы состояния двойных металлических систем. / Справочник под ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1997. Т. 2. С. 112–114.
- [14] *Shashurin A., Beillis I.I., Boxman R.L.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2010. Vol. 19. 015 002 (8 p).
- [15] *Rotshtein V., Ivanov Yu., Markov A.* Surface treatment of materials with low-energy, high-current electron beams. Chapter 6 in book Materials surface processing by directed energy techniques / ed. by Y. Pauleau. Elsevier. 2006. P. 205–240.