

Скоростная видеоспектроскопия сильноточной вакуумной дуги с CuCr электродами и парой CuCr (катод)-Mo (анод)

С.А. Попов, Е.Л. Дубровская, А.В. Шнайдер, А.В. Батраков*

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

**popov@lve.hcei.tsc.ru*

Аннотация. Процессы контрагирования канала сильноточного вакуумно-дугового разряда и плазмообразования в его прианодной области имеют высокую актуальность с точки зрения улучшения коммутационных характеристик вакуумных сетевых выключателей. В настоящей работе с использованием скоростного видеоспектроскопического аппаратного комплекса исследована пространственно-спектральная структура дуги и ее динамика в процессе перехода от диффузного режима горения к режиму с активным анодным пятном. Эксперименты проведены как с парой электродов CuCr, так и с парой CuCr(катод)-Mo(анод). Полученные данные наглядно демонстрируют изменения зарядового состава плазмы анодного и катодного макрояздов в процессе смены форм разряда. В экспериментах с молибденовым анодом продемонстрирована роль испарения анода в формировании пространственно-зарядового распределения в катодном макроязделе.

Ключевые слова: анодное пятно, вакуумный выключатель, сильноточная вакуумная дуга, скоростная спектроскопия и видеорегистрация.

1. Введение

Переход сильноточного вакуумно-дугового разряда к контрагированной форме горения с анодным пятном, являющимся интенсивным источником паров и плазмы, существенно ограничивает отключающую способность вакуумных сетевых выключателей, и остается предметом пристальных исследований в течение многих лет [1].

Исходя из формы и интенсивности свечения прикатодной и прианодной областей разрядного промежутка, режимы горения дуги традиционно классифицируются на диффузный, при котором макроязды на электродах отсутствуют, режим интенсивной дуги (intense mode), связанный с образованием сжатого канала разряда в условиях сильных токов и малых межэлектродных расстояний, и различные режимы с той или иной активностью анодных процессов: режим “футпойнт” (footpoint mode), режим с активным анодным пятном (anode spot mode) [2]. По результатам недавней серии исследований электрических и спектральных характеристик, предложена дополнительная классификация режимов горения дуги с анодным пятном первого и второго типов [3, 4]. Режим с анодным пятном второго типа характеризуется формированием как прианодной, так и обширной прикатодной области свечения (катодного макроязда) и сжатого канала разряда в условиях относительно больших межэлектродных расстояний, а также повышенным на 10–20 В напряжением горения, что напрямую указывает на активную роль анодного и катодного макрояздов в механизме функционирования разряда [3, 5].

Исследования динамики перехода между различными режимами горения демонстрируют высокую скорость изменения спектрального состава и структуры свечения разряда с временем перехода в десятки и единицы микросекунд [5–7]. При этом особую актуальность приобретают исследования с регистрацией спектра анодного пятна не в отдельные моменты времени, как в [3, 7], а с непрерывной временной разверткой. Такое исследование было выполнено нами недавно с использованием аппаратного комплекса, представляющего собой композицию спектрографа со стриковой камерой (хронографом) [8]. Непрерывная временная развертка позволила с высоким временным разрешением исследовать динамику отдельных спектральных линий в привязке к осциллограммам тока и напряжения горения в процессе переходов между формами разряда. Очевидным недостатком

метода является то, что исследуется излучение лишь локальной (по сути, точечной) области разряда, что позволяет делать лишь ограниченные выводы о пространственно-спектральной структуре свечения, и, соответственно, о пространственно-зарядовой структуре плазмы в разрядном промежутке.

С целью получения надежных данных о пространственно-спектральной картине излучения в различных режимах горения разряда и ее динамике в настоящей работе, как и в [9], реализован метод скоростной видеорегистрации спектра с одномерным пространственным разрешением с одновременной обычной скоростной видеосъемкой всей (двумерной и полносспектральной) картины разряда.

С целью выяснения роли анодного и катодного пятен в формировании пространственно-зарядовой структуры канала разряда мы использовали пары электродов из различных материалов: медь-хромового катода и молибденового анода. В настоящей работе приведены и обсуждаются как данные по исследованию дуги с электродами из различных материалов, так и расширенный набор данных экспериментов с медь-хромовой парой [9].

2. Методика эксперимента

Схема эксперимента приведена на Рис. 1. Методика и условия экспериментов с медь-хромовыми электродами и парой CuCr-Mo полностью совпадали и приведены более подробно в [9]. Диаметр электродов составлял 14 мм. Гармонический полупериод тока амплитудой до 15 кА длительностью 10 мс, моделирующий ток промышленной частоты, формировался высокооборотной цепью C_0L_0 ($C_0 = 60$ мФ, $L_0 = 167$ мкГн) с тиристором VT_0 в качестве коммутатора. Дуговой разряд инициировался размыканием контактов на начальном этапе протекания импульса тока. Подвижным являлся катодный электрод, его скорость в процессе размыкания была практически постоянна и близка к 1.3 м/с. Внешние магнитные поля к разрядному промежутку не прикладывались. Для регистрации осциллограмм тока и напряжения горения дуги служили низкоомный шунт R_{sh} в цепи катода и предварительно калиброванный резистивный делитель напряжения (на схеме не показан).

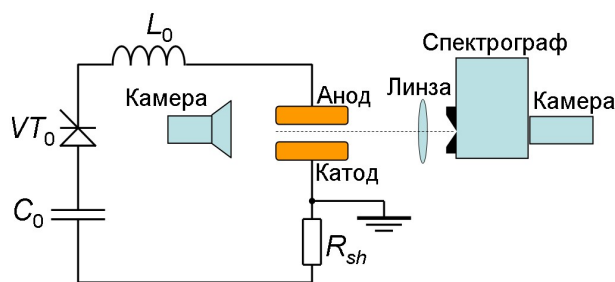


Рис. 1. Схема эксперимента.

Для исследования спектральной структуры разряда и его динамики изображение разрядного промежутка фокусировалось на входную щель монохроматора МДР-23, на месте выходной щели которого располагалась скоростная видеокамера EVERCAM-3000-4. Входная щель спектрографа была ориентирована вдоль оси разряда, т.е., в направлении катод-анод (не так, как можно понять из схемы на Рис. 1). Таким образом, двумерная картина на выходе спектрографа представляет собой спектр излучения плазмы в разрядном промежутке с одномерным пространственным разрешением вдоль оси разряда. Для получения обычного 2-D видеоряда разряда такая же видеокамера устанавливалась со стороны противоположного окна вакуумной камеры. Скорость съемки составляла 5000 кадров/с, длительность экспозиции при съемке спектра составляла 100–200 мкс, а при съемке обычного 2-D изображения — 1–2 мкс.

3. Результаты экспериментов с CuCr электродами

Динамика дуги при переходе от диффузной к контрагированной форме горения с катодным и анодным макрофакелами представлена осциллограммами тока и напряжения горения, а также спектрами и двумерными кадрами разряда в отдельные моменты времени при амплитуде тока 6.2 кА на Рис. 2 и 3, соответственно. Временные метки t_A - t_T на осциллограмме (Рис. 2) соответствуют экспозиции спектрограмм на Рис. 3 а)-г). В данном случае размыкание контактов производилось с минимальной задержкой $t_0 = 100$ мкс относительно начала импульса тока (см. Рис. 2). Следует специально отметить, что в этом режиме процесс перехода от диффузного режима горения к режиму с активным анодным пятном происходил стабильно от импульса к импульсу как во временном ($t_1 = 2.4$ – 2.5 мс), так и в пространственном отношении (положение канала разряда было близко к оси разряда и оставалось стабильным на протяжении импульса тока).

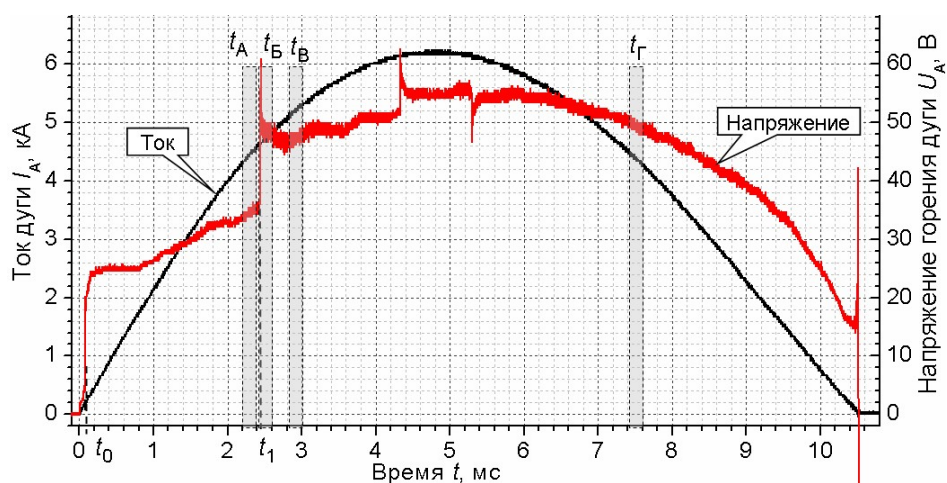


Рис. 2. Осциллограммы тока, напряжения горения дуги с CuCr электродами.

В диффузном режиме горения дуги (Рис. 3а) свечение разряда представлено в основном микропятнами на поверхности катода. Объемное свечение плазмы на этом этапе представлено обширным катодным макропятном. Его интенсивность усиливается со временем по мере нарастания тока разряда и межэлектродного расстояния. Напряжение горения разряда при этом также постепенно нарастает от 20–26 В до 32–36 В. В спектральном отношении свечение макропятна представлено в основном линиями двухзарядных ионов меди. Анодное пятно на этой стадии практически отсутствует.

Переход к режиму контракции дуги с активным анодным пятном в момент времени $t_1 = 2.43$ мс в нашем примере сопровождается резким ростом напряжения горения разряда на 20–25 В. В процессе перехода количество катодных микропятен заметно уменьшается, прежде всего, за счет подавления микропятен в периферийных областях электрода. При этом яркость катодного макропятна резко возрастает, в то же время генерируется сравнимое по яркости анодное пятно, а спектральная структура приобретает комплексный характер и довольно динамично меняется (Рис. 1б, 1в). В прикатодной области в спектре по-прежнему преобладают линии двухзарядных ионов. В прианодной области быстро возрастает интенсивность линий нейтральных атомов, в основном, хрома. Свечение же в средней части промежутка, в периферийных слоях анодного и катодного факелов, в значительной степени связано с излучением на линиях однозарядных ионов хрома Cr II длиной волны 462.76–463.41 нм. Следует отметить, что это излучение существенно нестационарно во времени. Оно носит характер вспышки, интенсивность которой со временем релаксирует практически до нуля, в отличие от других линий однозарядных ионов как меди, так и хрома.

После окончания процессов релаксации и в процессе дальнейшего расхождения контактов устанавливается квазистационарная пространственно-спектральная структура свечения (Рис. 3г), на основании которой пространственно-зарядовая структура плазмы может быть представлена следующим образом. Концентрация нейтральных паров максимальна непосредственно вблизи поверхностей электродов как в прианодной, так и в прикатодной областях. В катодном макрофакеле однозарядные ионы сосредоточены во внутренней, а двухзарядные - во внешней области факела. Максимальная интенсивность свечения в катодном факеле достигается на некотором удалении от катода и монотонно спадает к периферии факела, указывая на определяющую роль ионов в структуре излучения.

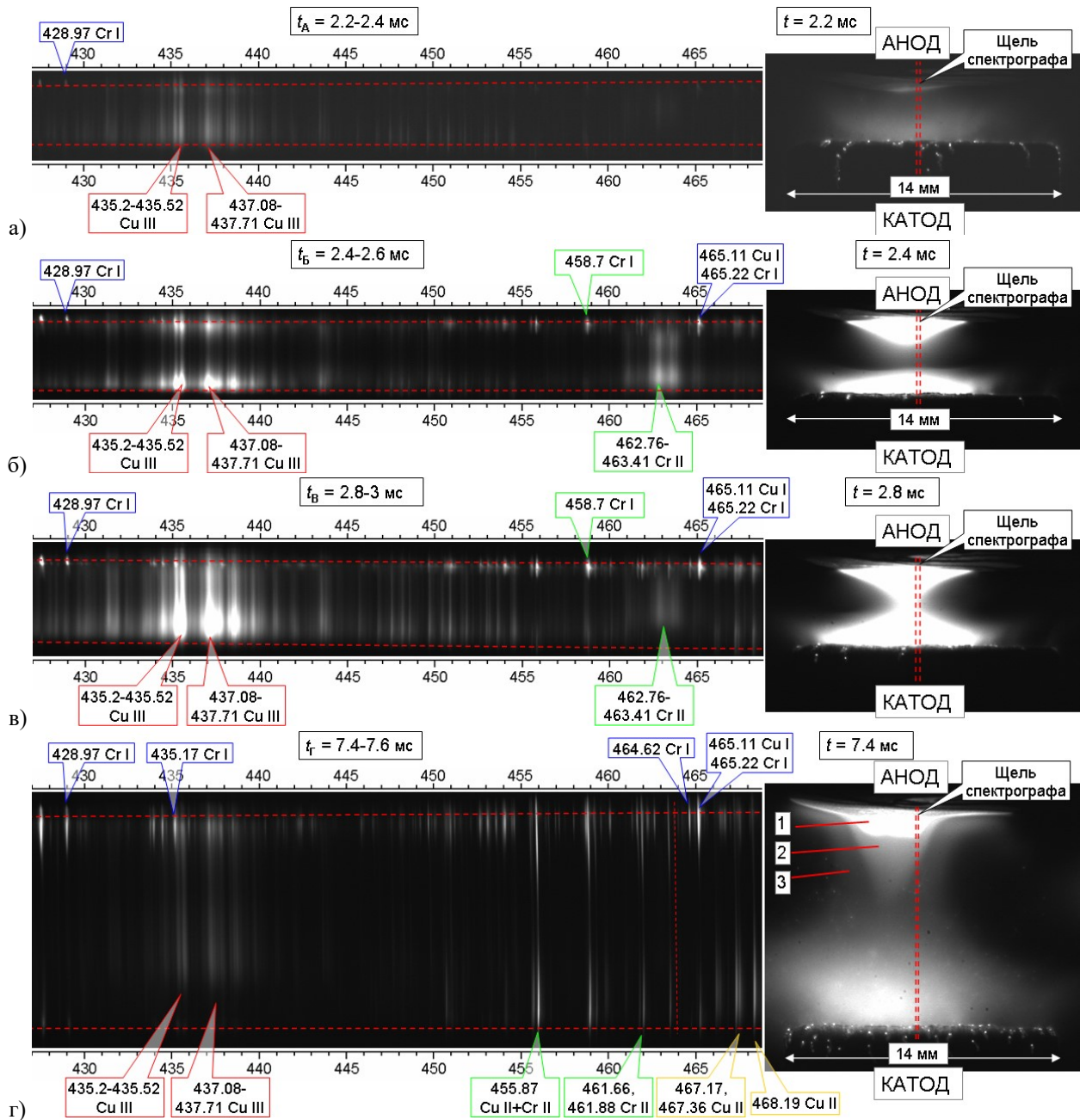


Рис. 3. Одномерные эмиссионные спектры и фотографии разрядного промежутка с CuCr электродами с началом экспозиции в моменты времени $t = 2.2$ (а), 2.4 (б), 2.8 (в) и 7.4 мс (г).

Структура анодного факела может иметь выраженный слоистый характер с тремя областями и четкими границами между ними (обозначены выносками 1–3 на двумерной фотографии на Рис. 3г). Из сопоставления с пространственным распределением интенсивности спектральных линий можно сделать следующий вывод: внутренняя область анодного факела представляет собой область максимальной концентрации нейтральных паров и, в отличие от катодного факела, содержит также двухзарядные ионы. Средний слой представлен в основном однозарядными ионами. Наконец, внешний слой анодного факела, соприкасающийся с периферийным слоем катодного, представляется содержащим в значительной степени двухзарядные ионы. Распределение интенсивности по областям анодного факела указывает на более низкую по сравнению с катодным факелом степень ионизации плазмы.

Необходимо также отметить разницу в пространственном распределении интенсивности линий меди и хрома, которая указывает на то, что, несмотря на идентичный элементный состав электродов, содержание элементов в плазме несколько ассиметрично (анод является в большей степени источником хрома, катод — меди).

Также необходимо отметить некоторые особенности динамики анодного пятна со слоистой структурой. Такое пятно формируется при значительном токе (энерговкладе), очевидно, связано с образованием зоны расплава и интенсивного испарения, и характеризуется высокой пространственной стабильностью и стационарностью. Тем не менее, его появление коррелирует с наличием неких разнонаправленных нестационарных пиков на осциллограмме напряжения горения разряда ($t = 4.4\text{--}5.4$ мс). Однако, никаких нестационарных особенностей в эти периоды времени в структуре анодного факела и его динамике не наблюдаются. Очевидно, понимание природы такой слоистой структуры требует дальнейшего исследования.

4. Результаты экспериментов с парой CuCr (катод) – Mo (анод)

Соответствующий набор данных представлен на Рис. 4 и 5. Заранее отметим трудности в интерпретации (расшифровке) спектров молибдена, несмотря на использование двух авторитетных баз данных [10, 11]. По этой причине на рисунках маркированы лишь отдельные знаковые линии.

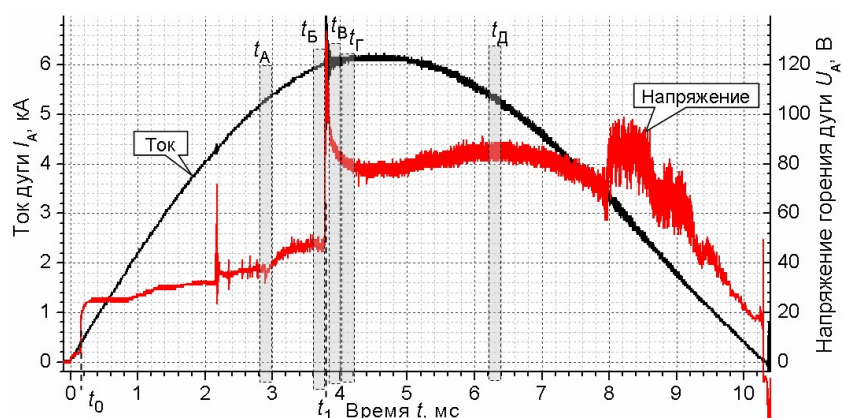


Рис. 4. Осциллограммы тока, напряжения горения дуги с парой CuCr(катод)-Mo(анод).

В диффузном режиме горения дуги на отрезке времени между размыканием t_0 и до перехода в контрагированную форму с катодным и анодным факелами t_1 напряжение горения дуги по величине и характеру изменения с током и межэлектродным расстоянием близко к такому для пары электродов CuCr (очевидно, анод на этом этапе играет пассивную роль).

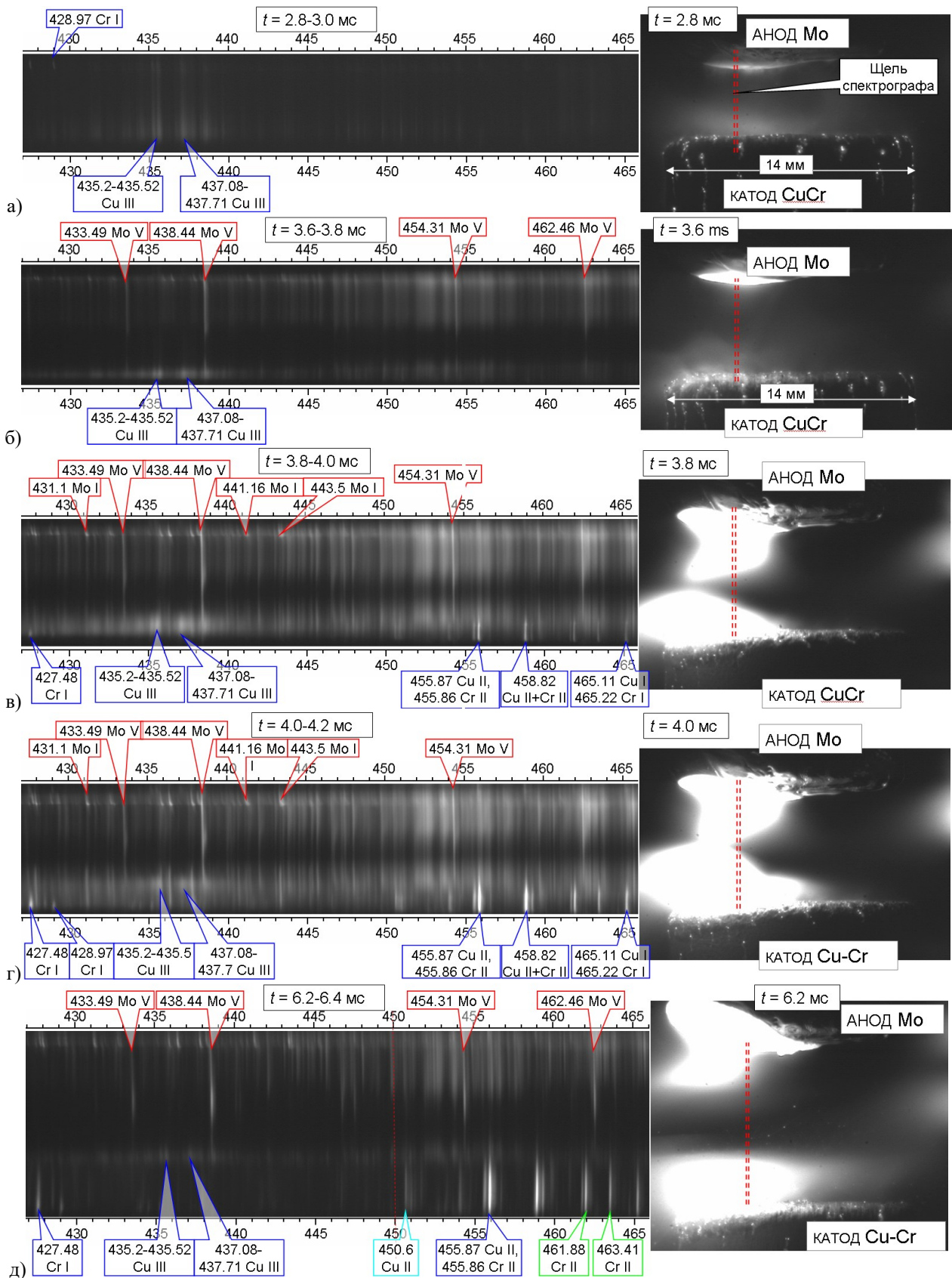


Рис. 5. Одномерные эмиссионные спектры и фотографии разрядного промежутка с CuCr катодом и Mo анодом с началом экспозиции в моменты времени $t=2.8$ (а), 3.6 (б), 3.8 (в), 4 (г) и 6.2 мс (д).

Свечение в разрядном промежутке (Рис. 5а) также предельно близко к случаю с медь-хромовой парой (Рис. 3а). Вблизи перехода t_1 яркость катодного факела усиливается, а также появляется яркое свечение поверхности анода, связанное с тепловым излучением (появление прианодной области свечения на Рис. 5б связано с тем, что в экспозицию камеры спектрографа частично попал переход t_1).

Собственно, в момент перехода t_1 напряжение горения испытывает резкий скачек, амплитуда которого может превышать 40 В (Рис. 4), что заметно превосходит величину скачка напряжения с медь-хромовыми электродами (см. Рис. 3). Количество катодных микропятен резко сокращается, как и в случае с CuCr электродами (Рис. 5б–в).

Излучение анодного факела представлено линиями Mo (Рис. 5б–д). При этом линии нейтральных паров Mo I (например, 431.1, 441.2, 443.5 нм и др.) локализованы вплотную к поверхности анода. Линии ионов, напротив, занимают более обширные области, в частности-наиболее яркие из расшифрованных линии ионов Mo V (согласно [10]), помеченные на Рис. 5б–д).

В спектральной структуре катодного макрофакела, начиная с момента перехода t_1 , происходят сильные изменения. Относительная яркость линий двухзарядных ионов материала катода с течением времени уменьшается, при этом появляются и усиливаются в яркости линии однозарядных ионов и даже нейтральных атомов материала катода. В пространственном отношении линии паров материала локализованы во внутренней зоне факела, линии однозарядных и особенно двухзарядных ионов- в периферийной части факела.

Нельзя не отметить, что в спектре катодного факела в полной мере представлены и линии материала анода. Причем линии нейтральных атомов локализованы больше во внутренней, приэлектродной области катодного факела, линии ионов, напротив, на его внешней границе. Таким образом, пространственно-зарядовое распределение материала анода в катодном факеле повторяет пространственно-зарядовое распределение частиц материала катода.

5. Заключение

С использованием метода скоростной видеоспектроскопии с одномерным пространственным разрешением, совмещенного с 2-D видеорегистрацией, исследована спектрально-пространственная структура свечения плазмы сильнооточного вакуумно-дугового разряда и ее динамика при переходе от диффузного к контрагированному режиму горения дуги.

Установлено, что в режиме контрагирования дуги периферийные области катодного и анодного факелов излучают в значительной степени в линиях двухзарядных ионов, внутренние области- в большей степени в линиях однозарядных ионов и нейтралов. В случае CuCr анода продемонстрировано формирование трехслойной структуры анодного пятна с четкими границами между слоями, в отличие от свечения в прикатодной области, а также установлен спектральный состав излучения слоев.

В экспериментах с парой медь-хром (катод)- молибден (анод) установлено, что в составе катодного факела значительную долю занимают продукты испарения анода.

Характер изменения напряжения горения разряда и количества катодных микропятен при переходе от диффузного режима разряда к контрагированному, динамика и пространственно-зарядовая структура плазмы в межэлектродном промежутке- все эти данные указывают на существенную плазмообразующую роль анодного пятна и возрастание роли механизмов газового разряда в контрагированном режиме горения дуги.

Благодарности

Настоящая работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FWRM-2021-0007.

6. Список литературы

- [1] P.G. Slade, *The Vacuum Interrupter. Theory, Design, and Application*. N.Y.: CRC Press, 2008.
- [2] H.C. Miller, A review of anode phenomena in vacuum arcs, *Contrib. Plasma Phys.*, vol. **29**, 223, 1989, doi: 10.1002/ctpp.2150290302.
- [3] A. Khakpour *et al*, Optical and electrical investigation of transition from anode spot type 1 to anode spot type 2, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. **45**, 2126, 2017, doi: 10.1109/TPS.2017.2690572
- [4] H.C. Miller, Anode modes in vacuum arcs: Update, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. **45**, 2366, 2017; doi: 10.1109/TPS.2017.2708695
- [5] S. Popov, A. Schneider, V. Lavrinovich, A. Batrakov, S. Gortschakow, and A. Khakpour, Fast Video Registration of Transition Processes from Diffuse Mode to Anode Spot Mode in High-Current Arc with Copper-Chromium Electrodes, *Proc. XXVIIth ISDEIV*, Suzhou, China, Vol. **I**, 375, 2016.
- [6] A.V. Schneider, S.A. Popov, V.A. Lavrinovich, A. Yu. Yushkov, High Speed Registration of the Anode Spot Evolution of High Current Vacuum Arc Combined with Spectrally Selective Images, *Proc. XXVIIIth ISDEIV*, Greifswald, Germany, 213, 2018, doi: 10.1109/DEIV.2018.8536989
- [7] A. Khakpour *et al*, Time and space resolved spectroscopic investigation during anode plume formation in a high-current vacuum arc, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. **50**, 18, 185203, 2017, doi: 10.1088/1361-6463/aa6494
- [8] A.V. Schneider, S.A. Popov, E.L. Dubrovskaya, A.Yu. Yushkov, and A.V. Batrakov, Study of Transient Processes in a High-Current Vacuum-Arc Anode Spot Using High-Speed Spectroscopy and Videorecording, *Russian Physics Journal*, vol. **64**, 130, 2021, doi: 10.1007/s11182-021-02308-3
- [9] С.А. Попов, Е.Л. Дубровская, А.В. Шнайдер, А.В. Батраков, Скоростная видеоспектроскопия сильнооточного вакуумно-дугового разряда с медь-хромовыми электродами, *Изв. ВУЗов. Физика*, том **65**, 127, 2022, doi: 10.17223/00213411/65/11/127
- [10] *Электронная база данных спектральных линий* [online], 28.08.2024; https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html
- [11] А.Н. Зайдель, В.К. Прокофьев, С.М. Райский, В.А. Славный, Е.Я. Шрейдер, *Таблицы спектральных линий*. М.: Наука, 1969.