

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛЬНОТОЧНОГО КАТОДНОГО ФАКЕЛА РАДИОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

А.П. Артемов¹), А.Г. Русских¹), А.С. Жигалин¹),
С.А. Чайковский^{1, 2}), В.И. Орешкин¹), А.В. Федюнин¹)

¹)Институт сильноточной электроники СО РАН,

пр. Академический 2/3, 634055 Томск, Россия

²)Институт электрофизики УрО РАН,

ул. Амундсена 106, 620016 Екатеринбург, Россия, aap545@gmail.com

Предложена и экспериментально продемонстрирована методика теневой импульсной радиографии плазмы катодного факела, формируемого сильноточным вакуумным дуговым разрядом. Построены распределения линейной массы по длине катодного факела для материалов с разными атомными номерами Z . Использование отдельного компактного радиографа на основе X-пинча, синхронизованного с основным генератором, формирующим вакуумный дуговой разряд, позволило оценить скорость ионов плазмы катодного факела, которая оказалась весьма близка к значениям, полученным в работе [1].

Введение

В настоящее время теневая импульсная радиография в мягкой области спектра рентгеновского излучения является наиболее эффективным средством получения информации о структуре различных плазменных объектов, в частности, таких объектов, время жизни которых может составлять десятки микро- и даже наносекунд. В связи с этим с точки зрения реализации такого метода диагностики среди существующих радиографических схем наиболее перспективными являются компактные импульсные радиографы (250 кА, 200 нс), разрабатываемые в ИСЭ СО РАН (г. Томск). Источником излучения данных радиографов является X-пинч, обеспечивающий в спектральном диапазоне излучения $h\nu = (0.1 - 2)$ кэВ пространственное разрешение ≈ 10 мкм при времени экспозиции менее 1 нс [2-4].

В ИСЭ СО РАН в последние годы активно ведутся исследования Z-пинчей, формируемых на основе плазмы вакуумного дугового разряда [5, 6]. Информация о распределении линейной массы катодного факела, создаваемого дуговым разрядом, представляет интерес, как для теоретических расчетов сжатия Z-пинча, так и для изучения испарения и плазмообразования материала электродов при высоких плотностях тока электрической дуги.

Экспериментальная установка и методика измерений

Методика определения линейной массы плазменного объекта посредством теневой радиографии была успешно протестирована на примере катодного факела вакуумного дугового разряда с катодом плазменной пушки из висмута в работе [7]. Она основана на регистрации на одном снимке одновременно двух рентгеновских изображений: плазменного объекта и ступенчатого фильтра (рис. 1). Ступенчатый ослабитель наносится с помощью магнетронного напыления на подложку из полипропиленовой пленки толщиной 6 мкм и имеет заранее определенные толщины ступеней.

Ключевым моментом методики измерения является построение по изображению ступенчатого

ослабителя калибровочной зависимости произведения плотности вещества и толщины слоя поглощения $\rho \cdot h$ от плотности почернения пленки D .

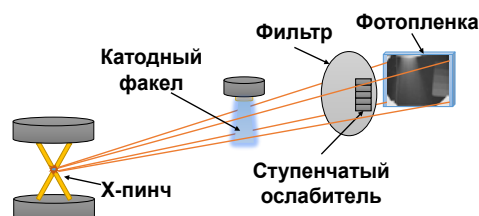


Рис. 1. Схема теневой рентгеновской радиографии с X-пинчем в качестве источника рентгеновского излучения

В работе [7] было показано, что на интервале плотностей почернения пленки, определенных для ступенчатого ослабителя, эта зависимость принимает вид:

$$\rho h(D) = aD^2 + bD + c, \quad (1)$$

где коэффициенты a , b и c определяются для каждого снимка, поскольку интенсивность и спектральные характеристики излучения X-пинча меняются от пуска к пуску.

Катод плазменной пушки имеет круглое сечение, поэтому, полагая, что катодный факел также имеет круглое сечение, его изображение вдоль оси разбивалось на единичные поперечные сечения. Затем для каждого сечения строилось распределение плотности почернения по радиусу $D(r)$, которое использовалось для определения зависимости произведения плотности вещества плазмы факела и толщины слоя поглощения от радиуса единичного сечения $\rho h(r)$ по формуле (1). Линейная масса каждого слоя-сечения катодного факела рассчитывается интегрированием распределения $\rho h(r)$ по радиусу сечения [7]:

$$m_p = 2 \int_0^R \rho h(r) dr \quad (2)$$

Эксперимент проводился на специальном стенде, состоящем из двух установок. Для формирования вакуумного дугового разряда использовалась плазменная пушка, установленная в генераторе ИМРИ-5 с амплитудой тока 300 кА при времени его нарастания 500 нс [5, 6]. Синхронизованный с ИМРИ-5 компактный импульсный ра-

диограф XPG-1 (250 кА, 200 нс) применялся для получения теневых рентгеновских изображений катодного факела вакуумного дугового разряда.

Плазменная пушка представляет собой стержневой катод, помещенный внутри кольцевого анода. Между анодом и катодом располагается кольцевой изолятор, по поверхности которого происходит пробой межэлектродного промежутка. В эксперименте использовались катоды плазменной пушки, изготовленные из алюминия, магния, вольфрама и висмута. Диаметр катодов варьировался в диапазоне (3 - 7) мм. X-пинч радиографа состоял из четырех молибденовых проводников диаметром 25 мкм.

Ток, протекающий через X-пинч, и ток плазменной пушки измерялись поясом Роговского. Импульс рентгеновского излучения, указывающий момент фиксации изображения факела относительно начала тока дуги, регистрировался алмазным полупроводниковым детектором DRD (Alameda Applied Sciences Corp.) в спектральном диапазоне $h\nu = 1 - 5$ кэВ. Также в эксперименте с помощью высокоомного резистивного делителя регистрировалось падение напряжения на участке цепи, где расположена плазменная пушка, с целью оценить энерговклад в вакуумный дуговой разряд.

Типичные осциллограммы импульсов тока дуги (1) и радиографа XPG-1 (2), сигнала детектора DRD (3) и импульса напряжения дуги (4) приведены на рисунке 2. Обозначение t_{x-ray} указывает момент вспышки рентгеновского излучения X-пинча.

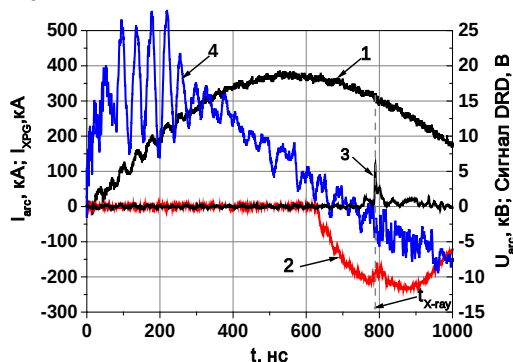


Рис. 2. Типичные осциллограммы импульсов тока дуги (1) и радиографа XPG-1 (2), сигнала детектора DRD (3) и импульса напряжения дуги (4)

Изображение факела регистрировалось на фотопленку Микрат-ОРТО с двукратным увеличением. Фотопленка располагалась за составным фильтром из пленки кимфойл толщиной 4 мкм с алюминиевым напылением толщиной 0.4 мкм и полипропиленовой пленки толщиной 6 мкм.

Результаты эксперимента

В результате проведенных экспериментов были получены рентгеновские снимки плазмы катодного факела и ступенчатого ослабителя, сделанного из того же материала, что и катод плазменной пушки. На рисунке 3(а) показан пример таких снимков для висмута, полученных в разные моменты времени от начала тока вакуум-

ной дуги. На снимке рядом со ступенчатым ослабителем указана толщина каждой ступени.

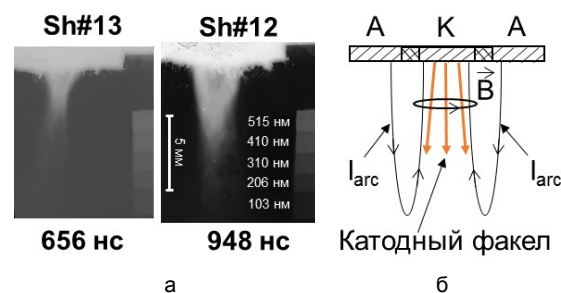


Рис. 3. Рентгеновские снимки катодного факела и ступенчатого ослабителя для висмута (а), а также схематичное изображение направления тока вакуумного дугового разряда в этот момент времени (б)

Из рисунка 3(а) видно, что испаренное вещество не разлетается во все стороны, а наблюдается образование цилиндрической структуры. Такое поведение можно объяснить тем, что ток к моменту регистрации изображения катодного факела течет не по поверхности изолятора межэлектродного промежутка, а так как показано на рисунке 3(б), вследствие чего происходит пинчевание плазмы, нарабатанной при испарении вещества катода, собственным магнитным полем протекающего по ней тока дуги.

Используя полученные рентгеновские снимки по методике, описанной выше, были построены распределения линейной массы плазмы по длине катодного факела для исследуемых в эксперименте материалов. На рисунке 4 показан пример такого распределения, построенного для висмута по снимкам, полученным в разные моменты времени относительно начала тока дуги, где «0» показывает положение катода плазменной пушки.

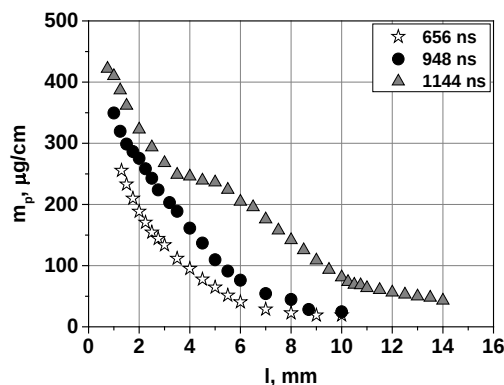


Рис. 4. Распределение линейной массы m_p по длине катодного факела l для висмута в разные моменты времени

Наблюдаемое на рисунке 4 смещение всего распределения по направлению от катода, а также интервал времени между рентгеновскими снимками, позволяют достаточно грубо оценить среднюю скорость распространения плазмы катодного факела (таблица 1). Тем не менее, сделанная оценка показывает, что скорости ионов плазмы в эксперименте оказались весьма близки к значениям, полученным для тока дуги 500 А в работе [1].

Таблица 1. Средняя скорость ионов плазмы катодного факела для разных материалов катодов плазменной пушки

Материал катода	Диаметр катода, мм	Средняя скорость ионов, см/мкс
Al	3	6 ± 2
Al	7	2.7 ± 0.5
Bi	4	1.3 ± 0.8
Bi	7	1.6 ± 0.8
Mg	4	2.5 ± 0.4
W	3	0.9 ± 0.5

Обсуждение результатов

Чтобы оценить достоверность используемой методики измерения массы, был сделан простой расчет полной массы вещества, которую в принципе можно испарить, исходя из тока генератора ИМРИ-5, по формуле (3):

$$m = \frac{E_{\text{эл}}}{E_{\text{суб}} + v^2/2}, \quad (3)$$

где m – масса, испаренного вещества катода, $E_{\text{эл}}$ – вложенная энергия, $E_{\text{суб}}$ – энергия сублимации, v – средняя скорость ионов. В расчете скорость ионов была взята из таблицы 1. Оценка показала, что масса наблюдаемой на рентгеновских снимках плазмы составляет $\approx 2\%$ от значения, рассчитанного по формуле (3). Столь значительное расхождение может быть связано с тем, что испаряемая в ходе дугового разряда масса вещества имеет некое распределение по скоростям. Таким образом, основная масса вещества, приходящаяся на максимум этого распределения и обладающая достаточно низкой температурой, находится у поверхности катода. И лишь очень небольшая часть испаренного вещества обладает скоростями достаточными чтобы отлететь на расстояние более 2 мм от катода к моменту регистрации рентгеновского изображения. Этим предположением можно также объяснить резкий рост массы плазмы катодного факела, устремленный к бесконечности, при приближении к поверхности катода, наблюдаемый на рисунке 4 для всех распределений массы по длине. Нужно отметить, что дополнительным фактором роста массы вблизи катода может быть также наличие в этой области капель расплавленного металла, возникающих при горении катодных пятен [8].

Кроме того, с наличием распределения массы по скоростям ионов может быть связана ступенька на кривой $m(l)$ на рисунке 4 для $t_{\text{кадр}} = 1144$ нс.

В этом случае вещество, испарившееся позже, но обладающее высокой скоростью, может догонять более медленный слой массы, испарившейся раньше по времени, и суммировать массу вещества, измеряемую в локальной точке. С другой стороны, наблюдаемая ступенька может быть вызвана торможением скорости испарения вещества, вызванного падением тока дуги.

Заключение

Чтобы ответить на поставленные вопросы о трактовке экспериментально полученных распределений линейной массы по длине катодного факела, необходимо в дальнейшем проводить более детальные расчеты процесса испарения вещества при горении вакуумной дуги, а также учитывать динамику распределения массы по скоростям $m(v)$ с ростом плотности тока дуги при расчете испаряемой массы вещества катода исходя из энергетического баланса.

Тем не менее, в работе продемонстрированы возможности исследования структуры плазменного объекта радиографическим методом на примере сильнооточного катодного факела. Построенные распределения линейной массы по длине катодного факела позволили сделать предварительные оценки скорости распространения плазмы для разных материалов катода плазменной пушки, которые показали, что они сопоставимы со значениями, полученными ранее для тока дуги 500 А.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФ № 16-19-10142.

Список литературы

1. Bugaev A.S., Gushenets V.I., Nikolaev A.G. et al // Tech. Phys. 2000. V. 45. № 9. P. 1135-1140.
2. Ратахин Н.А., Федущак В.Ф., Ефремов А.А. и др. // Изв. вузов. Физика. 2007. Т. 50. № 2. С. 87–92.
3. Artyomov A.P., Zhigalin A.S., Lavrinovich I.V. et al // Instr. Exp. Tech. 2014. V. 57. № 4. P. 461–474.
4. Baksht R.B., Roussikh A.G., Zhigalin A.S. et al // Phys. Plasmas. 2015. V. 22. 103521.
5. Baksht R.B., Roussikh A.G., Zhigalin A.S. et al // IEEE Trans. on Plas. Sci. 2013. V. 41. P. 1-5.
6. Roussikh A.G., Zhigalin A.S., Oreshkin V.I. et al // Phys. Plasmas. 2016. V. 23. 063502.
7. Artyomov A.P., Roussikh A.G., Fedunin. A.V. et al // Journ. Of Phys.: Conf. Series. 2017. V. 830. 012038.
8. Месяц. Г.А. Эктоны в вакуумном разряде: пробы, искра, дуга. М.: Наука, 2000. 424 с.

INVESTIGATION OF HIGH CURRENT CATHODE PLASMA JET BY RADIOGRAPHIC METHOD

A.P. Artyomov¹), A.G. Roussikh¹), A.S. Zhigalin¹), S.A. Chaikovskiy^{1, 2)}, V.I. Oreshkin¹), A.V. Fedyunin¹)

¹)Institute of High Current Electronics SB RAS, 2/3 Akademicheskoy ave., 634055 Tomsk, Russia

²)Institute of Electrophysics UD RAS, 106 Amundsen str., 620016 Ekaterinburg, Russia, aap545@gmail.com

The technique of a backlighting pulse radiography of a cathode plasma jet formed by the high current vacuum arc discharge is proposed and demonstrated. A linear mass distributions of the cathode plasma jet over its length for the materials with the different atomic numbers Z are obtained. The compact pulse radiograph with an X-pinch load synchronized with the main generator forming a vacuum arc discharge was used in experiments. The technique made possible to obtain x-ray image of cathode plasma jet in different time and estimate the plasma ion velocity. The estimations have been showed that the plasma ion velocity is close to the values obtained in Ref. [1].