

РЕНТГЕНОВСКОЕ ПРОСВЕЧЕНИЕ СИЛЬНОТОЧНОГО РАЗРЯДА В ПЛОТНОМ ГАЗЕ

М. Э. Пинчук,^{1,*} А. А. Богомаз,¹ А. В. Будин,^{1,**}
Л. А. Широчин,² М. А. Поляков,² С. Ю. Лосев,¹ Ф. Г. Рутберг^{1,***}

¹ИЭЭ РАН

²СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

(12 ОКТЯБРЯ 2009 Г.)

Разработана система рентгеновской диагностики для определения концентрации паров металла в сильноточном импульсном разряде высокого и сверхвысокого давления на основе импульсного рентгеновского источника в области спектра 20 – 50 кэВ и рентгеновской ПЗС-камеры. Использовались два наносекундных генератора - с длительностью импульсов высокого напряжения 10–20 нс и 50 нс. Разработаны и использованы два типа рентгеновских трубок - прострельной и антикатодной конфигурации. В качестве приемника излучения использовались рентгеновские ПЗС камеры.

Проведены эксперименты по диагностике сильноточного разряда с осесимметричной геометрией электродной системы с $dJ/dt = 10^9 \div 10^{10}$ А/с и токах разряда до 1 МА. Получены данные о пространственном распределении в разрядном промежутке паров металла, поступающего с электродов в результате эрозии.

1. ВВЕДЕНИЕ

Предлагаемая работа связана с исследованием мощных импульсных разрядов в газе высокой плотности при начальном давлении рабочего газа (водорода) до 35 МПа с вкладываемой энергией на уровне $10^4 - 10^6$ Дж за импульс при амплитуде разрядного тока $\sim 10^4 - 10^6$ А со скоростью его нарастания $10^9 - 10^{10}$ А/с. Электрический разряд при

* Electronic address: pinchme@mail.ru

** Electronic address: avbudin@mail.ru

*** Electronic address: rutberg@iperas.spb.su, rc@iperas.nw.ru

таких энергокладах сопровождается значительным эрозийным износом электродов. Процесс поступления паров металла в разрядном объеме и процесс их перемешивания с рабочим газом в процессе разряда достаточно сложно исследовать.

Основные принципиальные трудности диагностики разряда указанных параметров связаны с высокой плотностью плазмы [1, 2]. Оптические методы дают информацию только о периферийных областях разряда из-за сильного поглощения. Для осуществления прямых измерений в центральной зоне канала разряда необходимо использовать рентгеновские методы диагностики. Рентгено-импульсное теневое просвечивание позволяет осуществить локальную время-разрешающую диагностику внутренних областей канала разряда, недоступных прямой диагностике другими методами.

Наиболее широкое распространение в различных областях науки и техники получила импульсная рентгенография с использованием источников с эффективной энергией квантов $\sim 10^2$ кэВ и выше ввиду их высокой проникающей способности. В то же время изучение объектов с относительно малыми концентрациями поглощающего вещества требуют применения рентгеновского излучения меньшей жесткости.

Поглощение пучка монохроматических рентгеновских лучей в среде происходит по формуле $I = I_0 \exp(-\mu \rho d)$, где I_0 - начальная интенсивность пучка, ρ - плотность среды, d - толщина среды по направлению зондирования, μ - массовый коэффициент поглощения. Массовый коэффициент поглощения μ можно приближенно записать как $\mu = cZ^3\lambda^3$, где Z - атомный номер элемента, λ - длина волны, c - константа, зависящая от положения длины волны λ относительно скачка К - края поглощения элемента. Величину ошибки измерения оценивается как $\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{1}{\mu \rho d} \frac{\Delta I}{I}$. Наиболее точные измерения получаются при условии $\mu \rho d \sim 1$ [3].

Для достижения указанного условия в разряде с парами меди и/или железа (соответствующих материалу электродов и/или иницирующей проволоки в наших экспериментах) рентгеновские лучи должны быть достаточно мягкими. При концентрации паров металла $\sim 10^{19} - 10^{20}$ см $^{-3}$ и длине исследуемого пространства 1 - 2 см соответствующая длина волны $\lambda \sim 1 - 1.5$ Å (вблизи К - края поглощения).

Импульсные рентгеновские источники с малой эффективной энергией квантов нашли применение в рентгенографии взрывных процессов [4], в газодинамических экспериментах [5], для диагностики различных плазменных устройств (где в последнее

время в качестве источника мягкого рентгеновского излучения успешно используется перетяжка X-пинча) [6–8].

Диагностика мощного разряда в плотном газе осложняется наличием высокого давления в сочетании с большим энерговыделением, что делает невозможным расположить диагностическую аппаратуру в разрядном объеме. А значительная толщина диагностических окон вынуждает использовать более жесткое излучение. Построение успешной системы диагностики становится возможным только на компромиссе различных требований. Система для диагностики импульсной дуги в газе высокого давления при относительно небольших энерговыделениях описана в [9]. Мощным потенциалом для диагностики внутренних областей сильноточных разрядов высокого давления обладает метод рентгеновской индуцированной флуоресценции [10], требующий, однако, исключительно мощного источника мягкого рентгеновского излучения, высокочувствительных приемников и вычислительных мощностей.

В настоящей работе представлено описание системы рентгеновского просвечивания для диагностики разряда выше указанных параметров на основе рентгеновского ПЗС-приемника и мощного взрывоэмиссионного источника рентгеновского излучения с высоким пространственным и временным разрешением.

2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследовался разряд в водороде, инициированный электрическим взрывом проволоки. Расстояние между полусферическими стальными или медными электродами диаметром 20 мм варировалось от 5 до 25 мм. Эксперименты проводились при начальном давлении водорода от 20 торр до 35 МПа. Более полное описание экспериментального стенда можно найти в [11]. Схема просвечивания упрощенно представлена на рис. 1. Перед экспериментом разрядный и буферный объемы откачивались до давления 0.05 атм и продувались водородом, чтобы обеспечить необходимую чистоту рабочего газа. Импульсное давление в разрядной камере достигало 250 МПа; при давлении 120 – 150 МПа происходил разрыв предохранительной диафрагмы и начиналось истечение рабочего газа в ресиверную емкость.

Рентгеновская трубка устанавливалась вплотную к диагностическому окну разрядной камеры (рис. 2). У противоположного окна устанавливалась рентгеновская съемоч-

ная камера. Запуск просвечивающего импульсного источника рентгеновского излучения и съемочной рентгеновской камеры производился синхроимпульсом, задержанным относительно начала разряда на заданный промежуток времени. В ходе выполнения работ использовались два наносекундных генератора. Первоначально использовался генератор импульсного напряжения (ГИН) с длительностью импульсов высокого напряжения 10 – 20 нс. Недостаточность дозы для информативного изображения вынудила сконструировать более мощный генератор с длительностью импульса 50 нс. Разработаны и использованы два типа рентгеновских трубок - прострельной и антикатодной конфигурации. Для оптимизации параметров, размера фокального пятна были проведены расчеты и испытания различных образцов рентгеновских трубок с разными ГИН [12].

Оптимальное напряжение на трубке составило 35 – 50 кВ. При напряжении ниже 35 кВ зондирующее излучение почти полностью поглощается на диагностических окнах, что не позволяет получить хорошее изображение. Увеличение напряжения на трубке свыше 50 кВ приводит к появлению в спектре высокоэнергетичных квантов, не поглощающихся в объекте. Их присутствие проявляется в появлении "снега" на изображении, что уменьшает чувствительность метода и его динамический диапазон.

В качестве приемника излучения использовались рентгеновская ПЗС-камера DY-432-F0-9B5 [13] или рентгеновская ПЗС-камера с ЭОП К-012 [14].

3. НЕКОТОРЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 3 представлена картина просвечивания разрядного объема при начальном давлении водорода 5 МПа перед разрядом. На изображении видна медная иницирующая проволочка (горизонтальная темная полоска) диаметром 0.5 мм, натянутая между торцев стальных электродов (вертикальные размытые темные границы перпендикулярно проволочке). Эта картина наглядно дает представление о пространственном разрешении разработанного комплекса диагностики и о чувствительности метода для определения концентрации металла в объеме. Анализ тестовых фольг со ступеньками разной толщины показал, что мы различаем фольги из меди и железа толщиной вплоть до 5 мкм и перепады толщины в 2 мкм. Что ограничивает сверху определяемую концентрацию паров металла в $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

На рис. 4 представлена картина рентгеновского просвечивания разрядного проме-

жутка через 20 мкс после инициирования разряда. Наблюдается ромбовидная структура рентгеновского изображения канала разряда, сходная по структуре с картиной в оптическом диапазоне [15]. В разрядах с током в сотни килоампер канал разряда сжимается из-за тепловой контракции и пинч-эффекта. В этом случае средняя по поверхности электрода плотность тока достигает величины $10^6 - 10^7$ А/см². При таких условиях тепловой поток, приходящийся на электроды, составляет $10^8 - 10^9$ Вт/см², что превышает критическую плотность потока энергии, соответствующую началу интенсивного испарения и является условием появления эрозионной струи. В разрядном промежутке формируются интенсивные электродные эрозионные струи. Ромбовидная структура канала дуги связана со взаимодействием анодной и катодной струй между собой в разрядном промежутке. Изображение на рис. 4 показывает, что доминирующей компонентой в плазме электродных струй является металлическая плазма паров материала электродов. Что подтверждает ранее принятую модель разрядного канала в парах металла, окруженного поглощающей оболочкой из водорода [16]. Оценки концентрации ионов в эрозионной плазме $\sim 10^{19} - 10^{20}$ см⁻³ в [15, 16] соответствуют оценкам концентрации согласно рентгеновскому изображению.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана система рентгеновской диагностики для определения концентрации паров металла в сильноточном импульсном разряде на основе импульсного рентгеновского источника в области спектра 20 – 50 кэВ и рентгеновской ПЗС-камеры. Разработаны и использованы два типа рентгеновских трубок - прострельной и антикатодной конфигурации. Для оптимизации параметров, размера фокального пятна были проведены расчеты и испытания различных образцов рентгеновских трубок. В ходе выполнения работ были использовались два разработанных наносекундных генератора - с длительностью импульсов высокого напряжения 10 – 20 нс и 50 нс. Проведены эксперименты по диагностике сильноточного разряда в геометрии z-пинча с $dJ/dt \sim 10^9 - 10^{10}$ А/с и токах разряда до 1 МА. Получены данные о пространственном распределении в разрядном промежутке паров металла, поступающего с электродов в результате эрозии. Данные показывают, что во время разряда основная часть паров металла сконцентрирована у оси разряда. Поступление металла в канал обусловлено эрозионными электродными

плазменными струями.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Администрации Санкт-Петербурга (грант молодым ученым, молодым кандидатам наук вузов и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга 2009 год)

-
1. Диагностика плотной плазмы / Под ред. *Басова Н. Г. М.* : Наука, 1989. - 368 с.
 2. *Митин Р.В.* // Свойства низкотемпературной плазмы и методы ее диагностики. Новосибирск: Наука, 1977. С. 105-138.
 3. Сб. Физические измерения в газовой динамике и при горении. ИЛ, 1957. С. 92.
 4. А. С. Борискин, А. Я. Бродский, В. И. Карелин *et al.*, ПТЭ 6, 107 (2003)
 5. В. К. Баев, А. Н. Бажайкин, Е. И. Биченков *et al.*, ПМТФ 1, 105 (1980)
 6. S. A. Pikuz, T. A. Shelkovenko, V. M. Romanova *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **68** 1, 740 (1997)
 7. Г. В. Иваненков, С. А. Пикуз, Д. Б. Синарс *et al.*, Физика Плазмы **26**, 10, 927 (2000)
 8. Г. С. Волков, Е. В. Грабовский, М. В. Зурин *et al.*, ПТЭ 3, 110 (2004)
 9. *Митин Р. В., Канцедал В. П.* // Применение рентгеновских лучей для диагностики импульсных дуг в аргоне при давлении 100-800 атмосфер и экспериментальное определение электропроводности плотной плазмы / препринт ХФТИ 72-39, Харьков, 1972. - 14 с.
 10. J. J. Curry, H. G. Adler, S. D. Shastri *et al.*, J. Appl. Phys **93**, 5, 2359 (2003)
 11. А. В. Будин, С. Ю. Лосев, М. Э. Пинчук *et al.*, ПТЭ 4, 106 (2006)
 12. М. А. Поляков, Г. Н. Фурсей, Л. А. Широчин *et al.*, Письма в ЖТФ **34**, 14, 1 (2008)
 13. <http://www.andor-tech.com>;
 14. <http://www.bifocompany.com>;
 15. А. А. Богомаз, А. В. Будин, В. А. Коликов *et al.*, ЖТФ **72**, 1, 28 (2002)
 16. А. А. Богомаз, А. В. Будин, С. Ю. Лосев *et al.*, Физика Плазмы, **34**, 5, 404 (2008)

X-RAY RADIOGRAPHY OF HIGH CURRENT DISCHARGE IN HIGH DENSITY GAS

**M.E. Pinchuk, A.A. Bogomaz, A.V. Budin, L.A. Shirochin,
M.A. Polyakov, S.Yu. Losev, Ph.G. Rutberg**

The X-ray diagnostic system for determination of metal vapour concentration in high-current discharge in a high-pressure gas, based on pulsed X-Ray source with hardness of 20 – 50 keV and X-ray CCD camera was designed. Two samples of nanosecond generators were used - with duration of pulses 10 – 20 ns and 50 ns. Two types of X-ray tubes - through-target and anticathode - were designed and used. For X-ray through-target tube simulation of electron trajectories in vacuum diode was made. Dense cathode plasma expansion was taken into account and its external sheath has been supposed as source of electrons. For load matching of X-ray tubes with generators of different voltage pulse durations, the analyses of plasma expansion velocity in nanosecond mode was used. Different diode geometries of later sealed-off X-ray tubes were preliminary tested at the mockup with continuous pumping. The voltage, current and X-ray dose on test objects were measured with this mockup. X-ray CCD cameras were used for X-ray registration.

Experimental research on diagnostic of high-current discharge in high-pressure gas with z-pinch geometry was carried out. The parameters of experiments are: $dJ/dt \sim 10^9 - 10^{10}$ A/s, current amplitudes up to 1 MA. Experimental data on spatial metal vapour distribution in discharge gap, provided by electrode erosion, were obtained. The result of experiments show that main part of metal vapours concentrates to the axis of discharge channel.

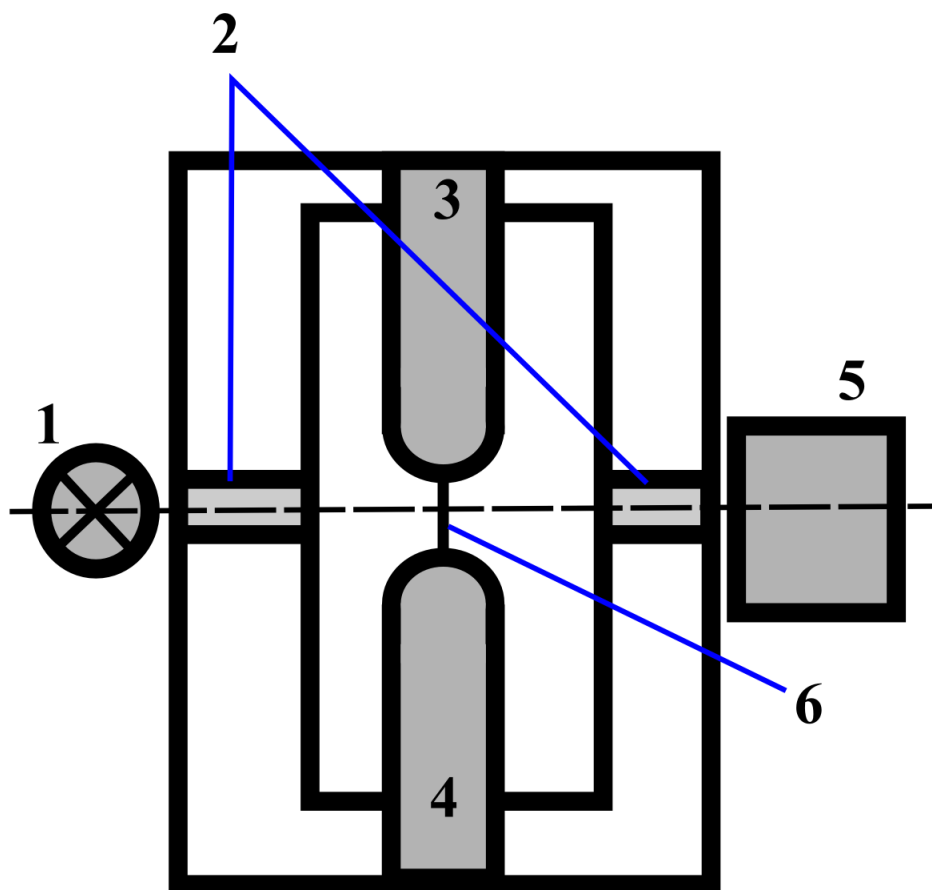


Рис. 1. Схема просвечивания разряда: 1 - рентгеновская трубка; 2 - диагностические окна; 3 - анод; 4 - катод; 5 - рентгеновская ПЗС-камера; 6 - инициирующая проволочка.



Рис. 2. Рентгеновская трубка у диагностического окна разрядной камеры

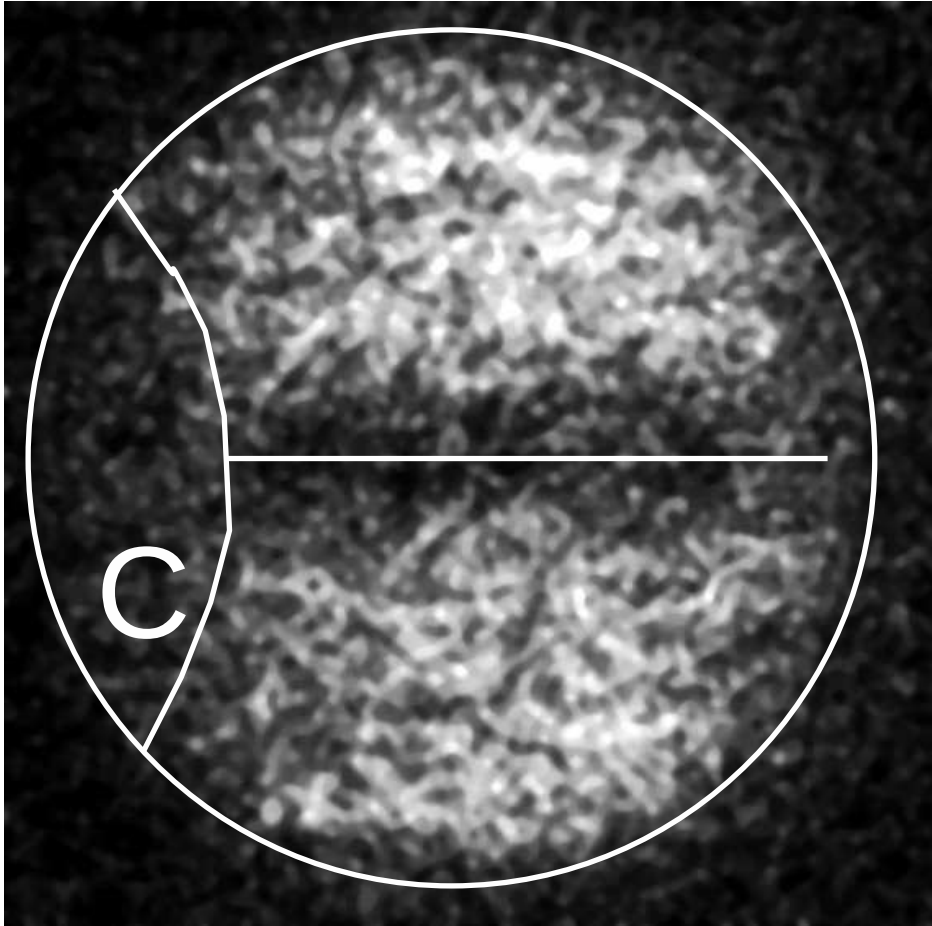


Рис. 3. Радиографическое изображение иницирующей проволочки в меж-электродном промежутке (белыми линиями показаны контур диагностического окна (диаметр окна 8 мм), катод, ось симметрии; анод вне поля зрения)

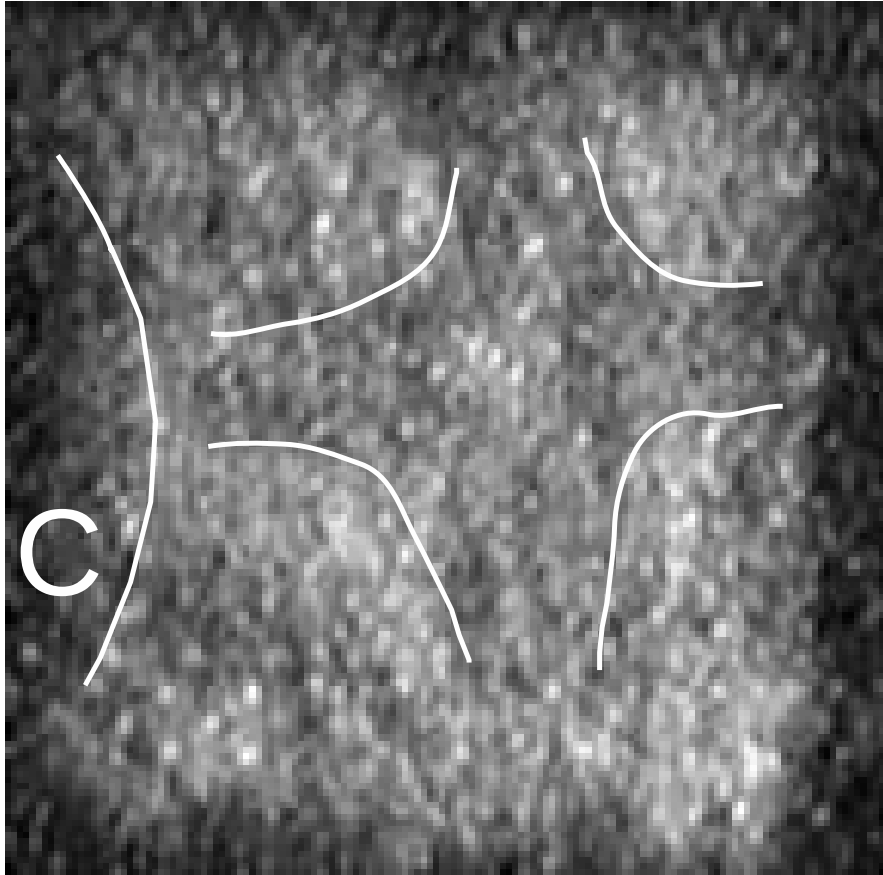


Рис. 4. Радиографическое изображение межэлектродного промежутка через 20 мкс после инициирования разряда с амплитудным током 600 кА (белыми линиями показаны катод, контуры сталкивающихся в центре промежутка эрозионных струй с катода и анода, анод вблизи правого края фото вне поля зрения)