

## Наблюдение локальной области горячей плазмы в катодной струе вакуумного искрового разряда

М. Ф. Артамонов, В. И. Красов, В. Л. Паперный  
Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

*Получено изображение плазмы катодной струи низковольтного вакуумного искрового разряда с напряжением 0,5–2,5 кВ, током до 10 кА и периодом разряда около 2 мкс. Изображение с помощью камеры-обскуры формировалось на поверхности микроканальной пластины (МКП), что позволило регистрировать ультрафиолетовое и рентгеновское излучения с энергией квантов, превышающей 10 эВ. Обнаружено, что излучающая область имеет вид ядра, окруженного слабосветящейся оболочкой, расположенного на расстоянии 2 мм от катода, с увеличением тока разряда область приобретает вид столба длиной 3–4 мм и шириной менее 1 мм.*

Известно, что вакуумные искровые разряды являются источником рентгеновского излучения, возникающего при нагреве плазмы до высоких температур. Нагрев обусловлен сжатием катодной струи собственным магнитным полем, которое приводит к формированию либо протяженной сжатой плазменной струи (структуры типа Z-пинч [1, 2]), либо локальных микропинчевых структур ("горячих точек"), причем температура электронов в таких структурах достигает нескольких килоэлектронвольт [3, 4]. Следует подчеркнуть, что существенный нагрев плазмы наблюдался лишь при достаточно высоких энергетических характеристиках разряда: напряжении в несколько десятков киловольт и токе порядка 100 кА [2–4]. Недавно процесс образования горячих точек, излучающих в рентгеновском диапазоне спектра, наблюдался в катодных микроструях слаботокового (до 10 А) лазерно-индуцированного вакуумного разряда [5]. Для решения различных прикладных задач нами была предпринята попытка создания простого источника мягкого рентгеновского излучения с малым энергопотреблением на основе низковольтного вакуумного искрового разряда при напряжении в единицы киловольт. Указания на такую возможность были получены в эксперименте, где в разряде с напряжением до 2,5 кВ наблюдались генерируемые катодной струей пучки многозарядных ионов материала катода [6]. Для генерации этих ионов необходим нагрев плазмы до значительной температуры, который должен сопровождаться тормозным рентгеновским излучением. Рентгеновские измерения показали, что, действительно, плазма катодной струи нагревается в начальной стадии разряда до температуры порядка 100–200 эВ [7]. Ниже исследована пространственная структура источни-

ка излучения при различных параметрах разряда. Эти измерения выполнены для выяснения механизма генерации рентгеновского излучения и многозарядных ионов в данных условиях.

### Экспериментальные результаты

Измерения проводились в вакуумном разряде с напряжением накопителя  $U_0$  до 2,5 кВ. Схема эксперимента изображена на рис. 1. Электродная система состояла из медного катода диаметром 1 мм, плоского заземленного сетчатого анода, расположенного на расстоянии 9 мм от торца катода, и помещалась в вакуум. Откачку последнего осуществляли механическим насосом с комбинированной ловушкой и магниторазрядным насосом, что обеспечивало вакуум не хуже  $(5–8) \cdot 10^{-6}$  торр. Разряд инициировался на торце катода с помощью высоковольтного пробоя по поверхности диэлектрической вставки между катодом и поджигающим электродом. Ток разряда поддерживался зарядом конденсатора ( $C = 2$  мкФ) и измерялся поясом Роговского непосредственно в цепи катода. Полная индуктивность разрядной цепи не превышала 40 нГн. Для очистки поверхности катод перед началом измерений тренировался в течение  $10^3$  "выстрелов", после чего вариации параметров разряда в разных выстрелах не превышали 20 %. Форма разрядного тока представляла собой затухающую синусоиду с длительностью полупериода около 1,5 мкс. Полная длительность разряда определялась напряжением накопителя и соответствующей амплитудой тока разряда, и при указанных ниже значениях тока возрастала от 4,5 до 7,5 мкс.

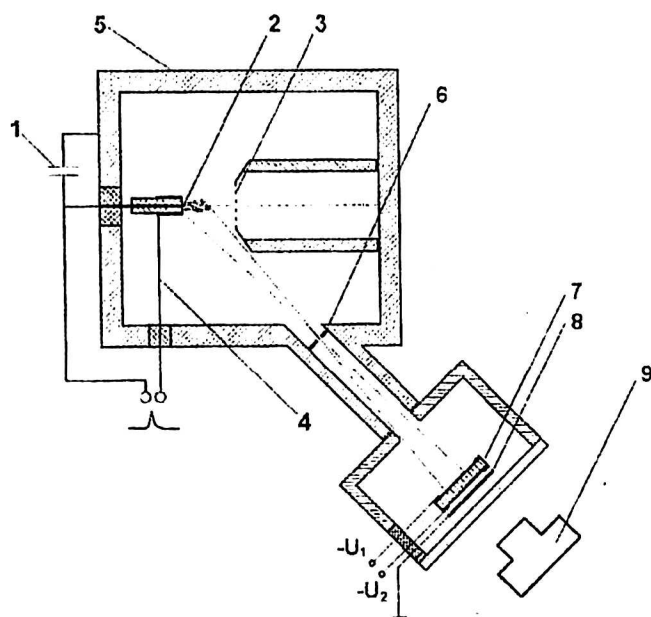


Рис. 1. Схема эксперимента:

- 1 — накопитель; 2 — катод; 3 — анод; 4 — поджигающий электрод; 5 — разрядная камера; 6 — диафрагма обскуры; 7 — микроканальная пластина; 8 — люминесцентный экран; 9 — цифровая камера

Изображение катодной струи формировалось на поверхности детектора с помощью отверстия в диафрагме диаметром 0,4 мм. Пространственное разрешение камеры-обскуры на поверхности плазменной струи с учетом геометрии измерений составляло около 1 мм. В качестве детектора использовалась микроканальная пластина типа МКП-10-34 диаметром 34 мм, толщиной 0,46 мм, с диаметром канала 10 мкм, изготовленная из свинцового стекла на технологическом объединении "Баспик" (г. Владикавказ). Коэффициент усиления по току пластины составлял около  $10^4$  при напряжении питания 1 кВ. Применение МКП для диагностики мягкого рентгеновского излучения импульсных плазменных источников на примере пластин указанного типа рассмотрено в работе [8], где также использовалась система вакуумной откачки, аналогичная описанной. Такая система необходима для исключения паров масла в рабочем объеме, которые, как отмечалось в [8], существенно ухудшают чувствительность МКП к мягкому рентгеновскому излучению. Квантовый выход пластины составляет 0,1–0,3, и эта величина слабо меняется в диапазоне энергий квантов 0,01–1,0 кэВ [9]. Пластина преобразует падающее на ее входную поверхность рентгеновское излучение в электронный поток, который усиливается до  $\sim 10^4$  раз. За пластиной помещается люминесцентный экран, который преобразует электронный поток в видимое изображение, регистрируемое цифровой камерой.

На рис. 2 представлены обскурограммы источника излучения при двух значениях напряжения накопителя и, соответственно, тока разряда. Обскурограммы получены в интегральном режиме регистрации, т. е. с усреднением по времени разряда. Из рис. 2, а видно, что при относительно небольшом токе область излучения имеет вид яркого ядра, окруженного слабо светящейся оболочкой. Принципиально, что ядро не примыкает непосредственно к катоду, а отстоит от него примерно на 2 мм. Рис. 2, б показывает, что при увеличении тока разряда характер изображения излучающей области изменяется. Во-первых, область излучения несколько приближается к катоду, во-вторых, ее изображение приобретает вид светящейся полосы шириной  $\sim 1$  мм и длиной  $\sim 3$  мм, причем вблизи катода свечение однородно по сечению столба.

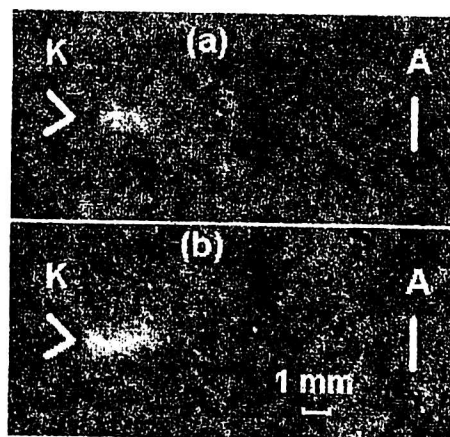


Рис. 2. Изображение катодной струи при токе разряда: (К — катод, А — анод); а — 3 кА; б — 10 кА

### Обсуждение результатов

При анализе результатов измерений следует учитывать, что МКП регистрирует не только электромагнитное излучение плазмы, но также потоки электронов и ионов, генерируемых плазменной струей. Попадание электронов на поверхность пластины исключается подачей запирающего напряжения  $U_1 = -6$  кВ на ее входной электрод (см. рис. 1). Ситуация с ионами сложнее. Оценка ионного потока из катодной струи в предположении изотропного разлета плазмы дает величину, более чем на порядок превосходящую поток тормозного рентгеновского излучения горячей плазмы. Эффективность регистрации МКП однозарядных ионов с энергией до 10 кэВ достаточно близка к соответствующей величине для фотонов с энергией в диапазоне 0,1–1,0 кэВ [9], но для ионов с зарядом до +10,

регистрируемых в данном эксперименте [6], эффективность регистрации выше в 3—6 раз [10]. С другой стороны, известно, что в сильноточном вакуумном разряде при токах выше 3—4 кА происходит сжатие катодной струи к оси под действием собственного магнитного поля [1], что ограничивает поперечный разлет плазмы. Контрольные измерения посредством ионного электростатического анализатора с коллиматором показали, что поток многозарядных ионов, генерируемых плазмой катодной струи, действительно распространяется вблизи оси разряда, так что уровень ионного сигнала под углом  $20^\circ$  к оси падает ниже порога регистрации, т. е. более чем на два порядка величины. Кроме того, известно, что в сильноточных разрядах плотность плазмы на расстоянии  $< 0,1$  мм от катода превышает  $10^{19}$  см $^{-3}$  [11]. Эта величина на 2—3 порядка выше плотности плазмы в области регистрации, отстоящей на 2 мм от катода [9], поэтому ионный сигнал дал бы изображение более плотной прикатодной плазмы. Суммируя вышеизложенное, можно заключить, что основной вклад в полученные обскурограммы вносит все же именно излучение плазмы в рентгеновской и УФ-областях спектра, хотя нельзя исключить некоторого вклада многозарядных ионов, эмитируемых этой областью.

Яркость рентгеновского (в основном тормозного [7]) излучения плазмы определяется ее температурой и плотностью, поэтому факт регистрации локального источника излучения (см. рис. 2, а) свидетельствует о формировании в катодной струе на расстоянии 2—3 мм от катода области горячей плотной плазмы. Это находится в качественном согласии с ранее выполненными нами измерениями динамики рентгеновского излучения плазмы катодной струи [7], из которых следовало, что источник излучения должен располагаться на расстоянии 3—5 мм от катода. С другой стороны, формирование в данных экспериментальных условиях области горячей плазмы вблизи катода предсказывает результаты численного моделирования процессов в катодной струе [12]. Согласно расчетам, этот процесс обусловлен пинч-эффектом, приводящим к образованию в струе перетяжки размером менее 0,1 мм на расстоянии 2—4 мм от катода, где температура электронов достигает 100—300 эВ. Этот эффект, очевидно, вызывает генерацию УФ- и рентгеновского излучений из нагретой области, имеющего как тормозной характер спектра, так и линейчатую составляющую вследствие появления здесь многозарядных ионов материала катода.

Из рис. 2, а видно, что при относительно небольшом разрядном токе излучающая область

горячей плазмы имеет размер менее 1 мм с учетом пространственного разрешения обскуры. Изменение вида изображения излучающей области при увеличении тока разряда может быть обусловлено либо прогревом части плазменной струи как целого, либо движением горячей точки вниз по течению струи, приводящим к "размазыванию" ее изображения. В отсутствие временного разрешения методики невозможно указать, по какому варианту происходит нагрев плазмы. Однако модельные расчеты [12] показали, что особенностью процесса пинчевания струи при увеличении разрядного тока действительно являются вынос области горячей плазмы вниз по течению струи, а также приближение области максимальной температуры к катоду. Сравнивая рис. 2, а и 2, б, мы видим, что обе эти тенденции действительно прослеживаются в эксперименте. Наблюдаемая картина находится в качественном согласии с обскурными измерениями рентгеновского излучения из плазмы сильноточного искрового разряда [2], где также наблюдалось образование вблизи катода сжатого столба горячей плазмы ( $z$ -пинча). Однако полученные нами результаты отличаются от данных измерений в оптическом диапазоне, выполненных в аналогичных экспериментальных условиях. Так, в работе [1] при токах разряда 3—5 кА светящийся плазменный столб шириной 3—4 мм начинался непосредственно от поверхности катода и заполнял весь межэлектродный промежуток длиной около 10 мм. Это факт можно объяснить, предположив, что в то время как в указанной работе регистрировалось излучение всего плазменного столба, в том числе периферийной холодной плазмы, в данных экспериментальных условиях наблюдается лишь область горячей плазмы вблизи токового канала, где происходит основной джоулев нагрев плазмы.

Результаты данной работы являются прямым экспериментальным подтверждением возникновения пинч-эффекта в низковольтной вакуумной искре, приводящего к локальному нагреву плазмы вблизи катода и генерации УФ- и мягкого рентгеновского излучений.

#### Литература

1. Алферов Д. Ф., Коробова Н. И., Сибиряк И. О. // Физика плазмы. 1993. Т. 19. С. 399.
2. Chuaqui H., Favre M., Windhan E. S. et al. // Phys. Plasmas. 1995. V. 2 (10). P. 3910.
3. Kochelev K. N., Pereira N. R. // J. Appl. Phys. 1991. V. 69. P. R21.
4. Negus C. R., Peacock N. J. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1979. V. 12. P. 91.
5. Фогель Н. // Письма ЖЭТФ. 1998. Т. 67. С. 622.
6. Артамонов М. Ф., Красов В. И., Панерный В. Л. // Там же. 2001. Т. 120. С. 1404.

7. Артамонов М. Ф., Красов В. И., Паперный В. Л.// Прикладная физика. 2002. № 5. С. 69.  
8. Алтынцева А. Т., Красов В. И., Лебедев Н. В. и др.// ПТЭ. 1983. № 6. С. 177.  
9. Дмитриев В. Д., Лукьянов С. М., Пениожкевич Ю. Э. и др.// Там же. 1982. № 2. С. 7.

10. Stockli M. P., Fry D.// Rev. Sci Instrum. 1997. V. 68 (8). P. 3053.  
11. Anders A., Brown I. G., MacGill A.// IEEE Trans. Plasma Sci. 1997. V. 25. № 4. P. 718.  
12. Зверев Е. А., Кризберг И. А.// Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. № 18. С. 50.

## Observation of a local area of heated plasma in cathode jet of a vacuum spark

M. F. Artamonov, V. I. Krasov, V. L. Paperny  
Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

*An image has been obtained of the cathode jet of a low voltage vacuum spark with a store voltage at the range of 0.5–2.5 kV, the discharge current being less than 10 kA and a semi-period about of 2  $\mu$ s. The image was formed by means of a pinhole at surface of a microchannel plate (MCP), that allows to record the ultraviolet and the X-ray radiation with the quants energy exceeding 10 eV. It was found that the radiating region of plasma has a form of a bright core embedded in a low intensive shell. This core was placed at 2 mm apart the cathode and as the discharge current increases the radiation region takes a form of column of 3–4 mm length and less than 1 mm in diameter.*