

# Физика плазмы и плазменные технологии

УДК 533.952

## Сравнительное исследование пространственной структуры источников рентгеновского излучения и ионной эмиссии в плазме микропинчевого разряда

А. Н. Долгов, Н. А. Клячин, Д. Е. Прохорович

*Получены с использованием техники камеры-обскуры изображения источников ионной эмиссии в плазме микропинчевого разряда. Область, являющаяся источником наиболее интенсивной ионной эмиссии, имеет протяженность вдоль оси разряда  $\sim 3$  мм и поперечный размер  $\leq 1$  мм. Изображение эмитирующей области, полученное при наблюдении в осевом направлении, носит, по-видимому, следы воздействия магнитного поля разрядного тока на диаграмму направленности ионного потока.*

PACS: 52.58.Lq

*Ключевые слова:* микропинчевый разряд, камера-обскура, пространственная структура, источник, ионная эмиссия, рентгеновское излучение.

### Введение

Микропинчевый разряд представляет интерес, с одной стороны, как источник металлических ионов, а с другой — импульсный источник мягкого рентгеновского излучения для целей интроскопии медико-биологических объектов с субмикронным пространственным разрешением и высокой селективностью по отношению ко многим химическим элементам. Но если пространственная структура источников рентгеновского излучения в микропинчевом разряде изучена достаточно хорошо, то структура источников ионной эмиссии исследованию не подвергалась [1].

Авторы использовали технику камеры-обскуры для получения информации о пространственной структуре источников ионной эмиссии в плазме микропинчевого разряда, в том числе в интересах сопоставления ее с картиной источников рентгеновского излучения.

### Экспериментальная часть

Эксперименты были выполнены на установке типа сильноточной вакуумной искры [1]. Разряд реализуется в продуктах эрозии материалов электродов (железо) при начальном вакууме не хуже  $10^{-2}$  Па. Источник тока разряда — батарея высоковольтных низкоиндуктивных конденсаторов. Разряд инициируется при замыкании межэлектродного промежутка форплазмой от вспомогательного слаботочного источника эрозионного типа. Максимально достигаемая в разряде сила тока — 150 кА. Время нарастания тока — 1,5 мкс. Анод — конический, катод — цилиндрический с осевым отверстием диаметром 3 мм.

Ионная камера-обскура состояла из двух основных элементов, а именно, диафрагмы с отверстием диаметром 0,5 мм, которое формировало изображение, и плоского трекового детектора, чувствительного только к ионному потоку. Диафрагма устанавливалась на расстоянии 0,1 м от области разряда. Полимерная пленка (тип CR-39), использованная в качестве детектора, располагалась за диафрагмой на расстоянии 0,1 м от нее. Необходимая для получения заметного изображения экспозиция составила 100 разрядов. Визуализация изображения осуществлялась путем травления детектора в водном растворе щелочи вплоть до проявления максимального количества треков [2]. Изображения, полученные при наблюдении

Долгов Александр Николаевич, профессор.

Клячин Николай Альбертович, доцент.

Прохорович Дмитрий Евгеньевич, старший научный сотрудник. Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова (во время выполнения работы являлся сотрудником НИЯУ МИФИ).

Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.

Тел. (495) 313-96-79.

E-mail: alnikdolgov@mail.ru; vniia4@vniia.ru

Статья поступила в редакцию 20 марта 2012 г.

© Долгов А. Н., Клячин Н. А., Прохорович Д. Е., 2012

в радиальном и осевом направлении, представлены на рис. 1 и 2, соответственно. Для сравнения на рис. 3 и 4 представлены изображения, сформированные той же камерой-обскурой в радиальном и осевом направлении при замене полимерной пленки рентгеновской фотопленкой и использовании в отверстии диафрагмы поглощающего бериллиевого фильтра толщиной 0,1 мм. В этом случае регистрировалось излучение в спектральном энергетическом диапазоне  $h\nu \geq 3$  кэВ, а экспозиция составила 10 разрядов.

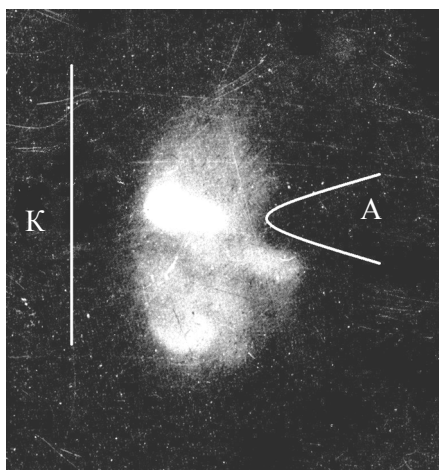


Рис. 1. Ионная обскурограмма, полученная при наблюдении в радиальном направлении

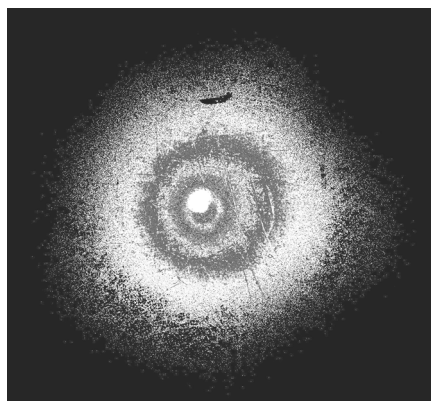


Рис. 2. Ионная обскурограмма, полученная при наблюдении в осевом направлении

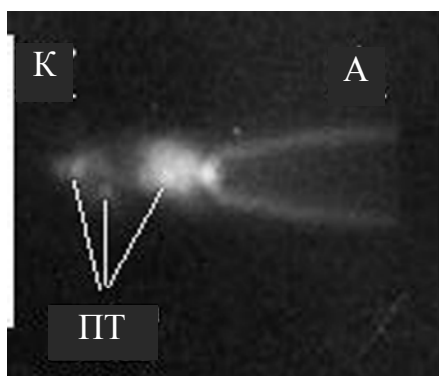


Рис. 3. Рентгеновская обскурограмма, полученная при наблюдении в радиальном направлении

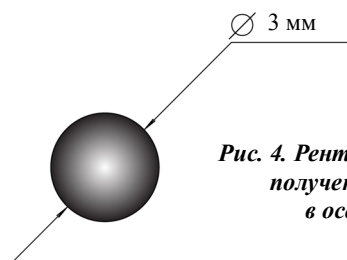


Рис. 4. Рентгеновская обскурограмма, полученная при наблюдении в осевом направлении

Ионная обскурограмма, полученная при наблюдении в радиальном направлении (см. рис. 1), дает изображение вытянутого вдоль оси разряда "яркого" источника длиной 3 мм, поперечный размер которого составляет 1 мм. Указанный источник смещен к аноду А и погружен в диффузную область, которая вероятно является изображением плазмы, рассеивающей ионы, рождающиеся в "ярком" приосевом источнике. При наблюдении в осевом направлении ионная камера-обкура формирует более сложное изображение (см. рис. 2). В центре выделяется объект диаметром 1 мм, окруженный концентрическими кольцеобразными структурами, диаметр которых равен последовательно 2, 3—5 и 7—14 мм. Данные структуры не могут являться прямыми (т. е. сформированными по законам геометрической оптики) изображениями каких либо источников ионов в плазме разряда. Рождение ионов, энергии которых достаточны для образования треков в полимерном детекторе [2], происходит в процессе сжатия перетяжки плазменного канала тока, по крайней мере, до диаметра  $\sim 1$  мм [1].

Рентгеновская обскурограмма, полученная при наблюдении в радиальном направлении (см. рис. 3), дает изображение, во-первых, поверхности анода А, испускающей рентгеновское излучение под действием ускоренных в межэлектродном пространстве электронов. Наиболее интенсивным источником рентгеновского излучения на поверхности анода является пятно, которое образуется в результате бомбардировки электрода пучком быстрых электронов, распространяющимся вдоль оси разряда. Во-вторых, на обскурограмме заметна смещенная к аноду диффузная область свечения — след торможения ускоренных электронов в плазме разряда, размер которой составляет около 2 мм вдоль оси разряда и 1 мм поперек оси. В-третьих, на обскурограмме зарегистрированы изображения отдельных, практически точечных объектов — локализованных областей горячей плазмы с электронной температурой в несколько килоэлектронвольт, которые часто называют плазменными точками (ПТ) или горячими точками. Согласно наиболее признанной теоретической модели, образование этих объектов происходит в результате пинчевания, т. е. обжатия плазменного канала тока в разряде собственным магнитным полем до микронных

размеров в условиях высокого уровня радиационного излучения [3]. По этой причине употребляется еще одно наименование для данного объекта — микропинч.

При наблюдении в осевом направлении (см. рис. 4) рентгеновская камера-обскура формирует изображение осесимметричного источника излучения с диффузной внешней границей и наиболее яркой центральной областью диаметром, примерно, 0,5 мм. Центральная область источника — это, по-видимому, область формирования ПТ в приосевом пространстве разряда.

### Обсуждение результатов

Сравнение полученных ионных и рентгеновских обскурограмм позволяет сделать вывод о том, что основным источником ионов является прианодная область диаметром 1 и протяженностью 3 мм, которая, в основном, пространственно совпадает с областью формирования горячих точек или микропинчей [3]. Кроме того, характер изображения, полученного с помощью ионной камеры-обскуры при наблюдении вдоль оси разряда, заставляет прийти к заключению, что данное изображение отражает не только пространственную структуру испускающей ионный поток плазмы, но и условия формирования направленности ионного потока. Вероятно, ключевым обстоятельством является взаимодействие ионов с магнитным полем канала тока в разряде. В приосевой области магнитное поле не оказывает заметного влияния на распространение ионного потока, поэтому центральная часть изображения дает представление о поперечном по отношению к оси разряда размере области формирования ионного потока. Кольцевые структуры на ионной обскурограмме, в свою очередь, обязаны своим происхождением взаимодействию ионного потока с магнитным полем разряда.

Представляет интерес выяснить диапазон энергий частиц, формирующих изображение на ионной обскурограмме. Для решения указанной задачи необходимо было осуществить сепарацию частиц в коллимированном пучке, т. е. в условиях, подобных тем, в которых происходит отбор частиц, формирующих изображение в трековом детекторе ионной камеры-обскуры. В ходе соответствующих исследований спектры ионов были зарегистрированы с помощью анализатора Томсона. В качестве детектора использовалась та же полимерная пленка, что и в ионной камере-обскуре. Ввиду отсутствия возможности осуществить прямую калибровку анализатора был применен метод "математической" калибровки [4], основанной на расчете траекторий частиц в параллельных электрическом и магнитном полях с учетом полей рассеяния.

С этой целью путем прямых измерений определялось распределение в пространстве магнитного поля, а распределение электрического поля моделировалось в электролитической ванне на макете анализатора. Восстановление энергетического распределения регистрируемых ионных потоков основано на подсчете числа проявленных треков, приходящегося на единицу поверхности детектора, вдоль параболы Томсона, т. е. следа выделенного пучка ионов определенной зарядности.

На рис. 5 представлены распределения по энергиям одно- и двукратных ионов железа, которые удалось зарегистрировать в эксперименте. Согласно спектрометрическим измерениям, основной вклад в формирование изображений на ионных обскурограммах вносят ионы с энергиями 10—70 кэВ. Ионы указанных энергий рождаются в плазме разряда на конечной стадии процесса пинчевания, который характеризуется образованием объекта, получившего название горячей точки или микропинча [3].

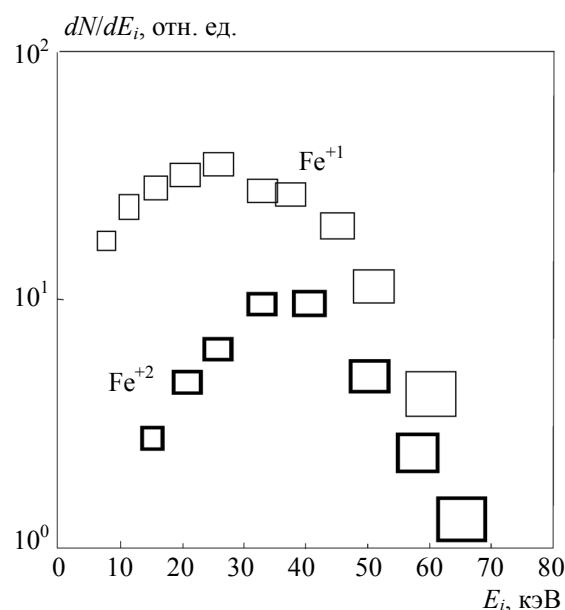


Рис. 5. Зарегистрированный энергетический спектр ионной эмиссии.  $E_i$  — энергия иона

### Заключение

Наиболее важные результаты проведенного исследования можно сформулировать следующим образом:

в микропинчевом разряде основным источником ионов с энергиями 10—70 кэВ является приосевая область протяженностью ~ 3 мм и диаметром ~ 1 мм;

область разряда, являющаяся основным источником высокоэнергетичных ионов, пространственно совпадает с областью формирования микропинчей, что говорит в пользу рождения этих ионов в самих микропинчах;

о дополнительном подтверждении факта рождения высокоэнергетичных ионов в микропинчах свидетельствует близкий вид зарегистрированных спектров ионов различной зарядности  $Fe^{+1}$  и  $Fe^{+2}$ ;

условия формирования потока ионов в осевом и радиальном направлениях значительно отличаются и, вероятно, определяются структурой магнитного поля разряда;

камера-обскура формирует изображение осесимметричного источника рентгеновского излучения с диффузной внешней границей и наиболее яркой центральной областью диаметром, примерно, 0,5 мм;

наиболее интенсивным источником рентгеновского излучения является пятно на поверхности

анода, которое образуется в результате бомбардировки электрода пучком быстрых электронов, распространяющимся вдоль оси разряда.

#### Литература

1. Долгов А. Н., Земченкова Н. В., Клячин Н. А., Прохорович Д. Е. // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 9. С. 826.
2. Czyzewski T., Szydowski A. // Jour. Tech. Phys. 1981. V. 22. No. 22. P. 153.
3. Бакиаев Ю. Л., Блинов П. И., Вихрев В. В. // Физика плазмы. 2001. Т. 27. № 12. С. 1101.
4. Mozer A. Energieanalyse von schnellen Ionen am Plasmafokus// IPF-80-1. Institut für Plasmaforschung der Universität Stuttgart. 1980.

## Comparative study of the spatial structure of the X-rays and ion emission sources in the micropinch discharge plasma

*A. N. Dolgov, N. A. Klyachin, D. E. Prokhorovich*

National Research Nuclear University, Moscow Engineering Physics Institute

31 Kashirskoe highway, Moscow, 115409, Russia

E-mail: alnikdolgov@mail.ru

*The image of ion emission sources in a micropinch discharge plasma is obtained by the camera obscura technique. A region that is the source of the most intense ion emission is of approximately 3 mm along the discharge axis and it has a width  $\leq 1$  mm. It seems that the image of the emitting region observed in the axial direction is the traces of the influence of a magnetic field of the discharge current on the diagram of ion flow directivity.*

PACS: 52.58.Lq

*Keywords:* micropinch discharge, camera obscura, spatial structure, source, ion emission, X-rays.

Bibliography — 4 references.

*Received March 20, 2012*