

Физика плазмы и плазменные технологии

УДК 533.952

Экспериментальное наблюдение генерации пучка электронов в приосевой области сильноточного разряда вследствие пинч-эффекта

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

Методами импульсной оптической тенезафии, рентгеновского обскурографирования и времяпролетных измерений получены экспериментальные свидетельства реализации явления "убегания" электронов в приосевой области Z-пинчевого разряда в среде тяжелых элементов.

PACS: 52.58.Lq, 52.70.-m, 52.77.-j

Ключевые слова: плазма, микропинч, электронный пучок.

Введение

В настоящее время предложено большое число теоретически возможных механизмов формирования потоков быстрых частиц в Z-пинче, однако общепринятой картины ускорительных процессов до сих пор не существует, так как имеющиеся в наличии экспериментальные данные в силу их фрагментарности допускают самую широкую трактовку. Некоторым исключением, возможно, являются представления, касающиеся ускорения ионной компоненты в плазме микропинчевого разряда [1—3]. Стоит отметить, что обнаруженные экспериментально механизмы ускорения ионов не способны обеспечить эффективное ускорение электронной компоненты плазмы.

Авторы данной работы представляют результаты экспериментальных исследований, которые свидетельствуют о реализации механизма "убегания" электронов в продольном электрическом поле в приосевой области микропинчевого разряда.

Экспериментальное исследование и его анализ

Эксперименты были выполнены на установке типа сильноточной вакуумной искры [4] при силе

тока в разряде до 150 кА, рабочая среда разряда — плазма железа. Регулярный характер развития процесса пинчевания токового канала вплоть до формирования микропинчевой области [5] в первой четверти периода разрядного тока вблизи максимума тока подтверждается наличием "особенности" на осциллограмме сигнала с магнитного зонда, работающего в режиме регистрации производной тока, а также характером интегральных по времени изображений источников рентгеновского излучения, получаемых с помощью камер-обскур, регистрирующих излучение в двух спектральных диапазонах $\lambda \leq 1,8$ нм и $\lambda \leq 0,4$ нм (включающих излучение L- и K-спектров железа, соответственно) [4] и результатами теневого фотографирования пространственной структуры плазмы разряда, выполняемого с использованием в качестве осветителя азотного лазера ($\lambda = 337$ нм) с длительностью импульса излучения 6 нс и регулируемой относительно профиля тока задержкой [5].

На тенезафиях, фиксирующих процесс пинчевания, наблюдается появление канала оптически плотной среды, тянущегося от сгустка пинчующейся плазмы разряда к поверхности внешнего электрода (плоского) вдоль оси симметрии разрядного устройства (рис. 1). Данная структура наблюдается при отрицательной полярности зарядного напряжения высоковольтной конденсаторной батареи, являющейся источником тока для разряда, когда на начальной стадии разряда токовый дрейф электронов происходит в направлении от внутреннего электрода (катода) к внешнему электроду (аноду). Набранная статистика теневых изображений позволяет утверждать, что вышеуказанный тонкий канал не является продуктом пин-

Долгов Александр Николаевич, профессор.
Земченкова Надежда Вячеславовна, аспирант.
Клячин Николай Альбертович, доцент.
Прохорович Дмитрий Евгеньевич, доцент.
Национальный исследовательский ядерный университет (МИФИ).
Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.
Тел. (495) 313-96-79. E-mail: prokhorovich73@mail.ru
Статья поступила в редакцию 20 сентября 2011 г.

чевания плазмы разряда. В пользу этого же вывода говорит характер изображений источников рентгеновского излучения в спектральном диапазоне $\lambda \leq 1,8$ нм (рис. 2).



Рис. 1. Тенеграмма разряда:
К — катод; А — анод (стрелкой отмечен канал оптически плотной среды, тянущийся от области пинчевания к поверхности внешнего электрода)

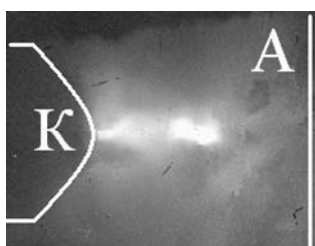


Рис. 2. Рентгеновская обскурограмма разряда в диапазоне $\lambda \leq 1,8$ нм:
К — катод; А — анод

В то же время на изображениях источников излучения с $\lambda \leq 0,4$ нм фиксируются объекты, которые не представляется возможным трактовать иначе как следы взаимодействия с плазмой разряда и поверхностью электрода пучка высокоэнергетичных электронов, распространяющегося из области формирования микропинча в сторону внешнего электрода (рис. 3).

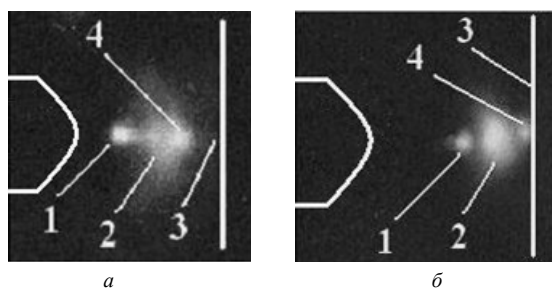


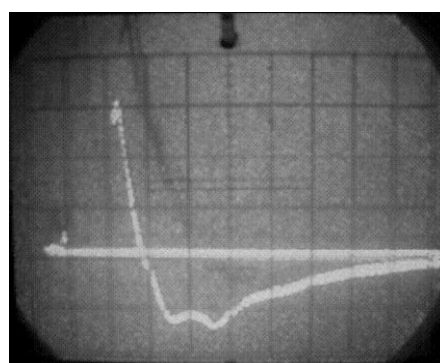
Рис. 3. Рентгеновские обскурограммы разряда в диапазоне $\lambda \leq 0,4$ нм, регистрируемые при отрицательной полярности зарядного напряжения конденсаторной батареи:

1 — изображение микропинчевой области; 2 — диффузно светящееся облако периферийной плазмы; 3 — поверхность анода; 4 — след торможения электронного пучка

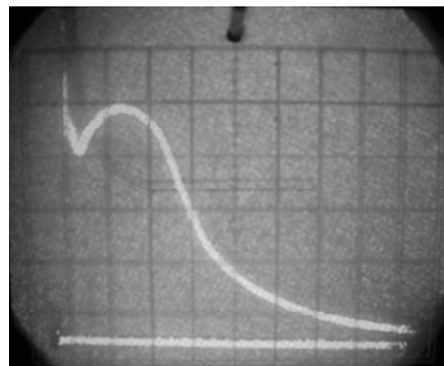
По-видимому, на тенеграммах, фиксирующих процесс пинчевания, также регистрируется траектория электронного пучка в периферийной плазме разряда низкой плотности, визуализация которой происходит вследствие рефракции и аномального поглощения зондирующего лазерного излучения. Ускорение электронной компоненты плазмы в

приосевой области разряда в условиях слабого магнитного поля происходит, вероятно, в продольном электрическом поле в области формирования микропинча в результате аномального роста сопротивления плазмы [6].

В данной работе с помощью коллекторных измерений удалось непосредственно зарегистрировать пучок электронов, испущенный из области пинчевания в осевом направлении. При любой полярности потенциала смещения коллектора на переднем фронте сигнала с коллектора регистрируется импульс, соответствующий приходу на коллектор сгустка отрицательных частиц, т. е. электронов (рис. 4).



а



б

Рис. 4. Типичные осциллограммы сигналов с коллектора, расположенного в осевом направлении на расстоянии 1,5 м от области разряда:

а — коллектор находится под отрицательным (-60 В) потенциалом смещения, горизонтальная развертка 2 мкс/дел, вертикальная — 80 мА/дел; б — коллектор находится под положительным ($+40$ В) потенциалом смещения, горизонтальная развертка 20 мкс/дел, вертикальная — 80 мА/дел

Рост амплитуды указанного импульса с переходом от отрицательной к положительной полярности потенциала смещения коллектора свидетельствует о подавлении вторичной электронной эмиссии с поверхности коллектора. Вслед за пучком "убегающих" электронов коллектора достигает поток плазмы. При этом полярность сигнала с коллектора зависит от полярности его смещения. Регистрация пучка "убегающих" электронов с по-

мощью коллектора, расположенного за пределами разряда, стало возможным благодаря использованию внешнего электрода с осевым отверстием достаточно большого диаметра, при котором с одной стороны, наблюдается устойчивый режим пинчевания, а с другой — на пути пучка убегающих электронов отсутствует область плотной периферийной плазмы. Последнее обстоятельство подтверждается отсутствием диффузно светящегося облака периферийной плазмы на рентгеновских обскурограммах.

Заключение

Результаты представленных экспериментальных исследований и их анализ убедительно свиде-

тельствуют о реализации механизма "убегания" электронов в продольном электрическом поле в приосевой области микропинчевого разряда.

Литература

1. Веретенников В. А., Гурей А. Е., Долгов А. Н., Семенов О. Г., Шидловски А. // Краткие сообщения по физике. 1988. № 2. С. 2.
2. Долгов А. Н. // Физика плазмы. 1996. Т. 22. № 6. С. 629.
3. Гурей А. Е., Долгов А. Н., Прохорович Д. Е., Савелов А. С., Тихомиров А. А. // Там же. 2004. Т. 30. № 1. С. 41.
4. Долгов А. Н. // Там же. 2005. Т. 31. № 6. С. 539.
5. Долгов А. Н., Прохорович Д. Е. // Прикладная физика. 2009. № 3. С. 76.
6. Долгов А. Н., Вихрев В. В. // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 3. С. 290.

Experimental observation of the electron beam generation near the axis of a high current discharge due to the pinch effect

A. N. Dolgov, N. V. Zemchenkova, N. A. Klyachin, D. E. Prokhorovich
National Research Nuclear University, Moscow Engineering Physics Institute,
31 Kashirskoye shosse, Moscow, 115409, Russia
E-mail: prokhorovich73@mail.ru

Generation of runaway electrons in the axial region of a Z-pinch discharge operating in a high Z medium was observed experimentally using pulsed optical shadowgraphy, X-ray pinhole imaging and time of flight method.

PACS: 52.58.Lq, 52.70.-m, 52.77.-j

Keywords: plasma, micropinch, electron beam.

Bibliography — 6 references.

Received September 20, 2011

* * *