

04;07;12

Стабильный пинч в установке плазменный фокус "SPEED-2"

© В. Кис, Г. Деккер, У. Бертин, Ю.В. Сидельников,
Д.А. Глушков, К.Н. Кошелев, Д.М. Симановский, С.В. Бобашев

Институт экспериментальной физики, Университет, Дюссельдорф
Институт спектроскопии РАН, Троицк
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 3 июля 1999 г.

В экспериментах на установке плазменный фокус "SPEED-2" исследованы условия генерации разряда в дейтерии при инжекции тяжелых газов аргона и ксенона в режиме микропинчевой моды плазменного сжатия и режиме образования стабильного плазменного шнура. Использование широкого арсенала диагностических методов, в том числе спектральных, в мягком рентгеновском диапазоне с временным, пространственным и энергетическим разрешением позволило реализовать контролируемый переход от одного режима к другому. Полученные опытные данные согласуются с предположением о стабилизации разряда за счет механизма гироманнитного ускорения дейтронов.

Исследование режимов пинчевания плазменного фокуса "SPEED-2" показали, что при добавлении тяжелых примесей (Ar, Kr) в рабочий газ (дейтерий) наиболее часто осуществляется так называемая "микропинчевая мода плазменного сжатия" (МРМ) [1–3]. Для этого режима характерно образование короткоживущих (с субнаносекундными временами жизни) плазменных образований, интенсивно излучающих в рентгене с размерами от десяти до нескольких десятков микрометров. Как было показано [2,3], микропинчевание является результатом развития перетяжечных неустойчивостей в условиях сильных радиационных потерь на линейчатом излучении многозарядных ионов тяжелых элементов (модель радиационного коллапса) [4]. Это явление, как оказалось, имеет достаточно общий характер и проявляется в аксиальных разрядах различного типа (вакуумная искра, Z-пинч, взрывающиеся проволоочки и т.д.) [5].

Однако в ряде экспериментов с добавлением неона, а также при малых концентрациях аргона, интегрированные по времени изображения

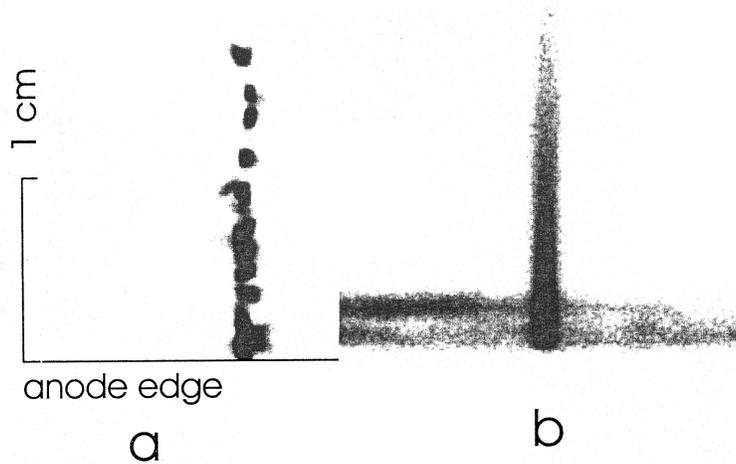


Рис. 1. Интегральные во времени изображения плазмы в собственном излучении в диапазоне $\lambda < 1 \text{ nm}$. *a* — микропинчевая мода разряда МРМ в плазме дейтерия с аргоном (типичный размер микропинчей $10 \mu\text{m}$), *b* — стабильная мода разряда SCM в плазме дейтерия с неоном (радиус пинча 1 mm).

плазменного столба демонстрировали его непрерывный в пространстве характер без разбиения на микропинчи [6,7]. Пример двух различных типов пинчевания — с разбиением на микропинчи и непрерывным плазменным столбом показан на рис. 1. Отсутствие в этих экспериментах методик с временным разрешением оставляло открытым вопрос о том, является ли наблюдаемый однородный столб плазмы результатом ее одновременной стабилизации на довольно значительном протяжении вдоль оси разряда. Однородное изображение могло также появиться в результате достаточно тривиального эффекта — интегрирования по времени движущегося “фокуса” разряда — места последовательного схождения плазменных оболочек на оси, известного как эффект “зипперинга”.

Очевидно, что режим работы с образованием однородного стабилизированного пинча представляет значительный интерес и может быть использован в ряде практических приложений. Выбору из этих двух возможностей и детальному исследованию режима с образованием

стабильного плазменного шнура — Stable Column Mode (SCM) и была посвящена эта работа. Особый интерес представляло изучение возможности контролируемого перехода из одного режима пинчевания в другой.

Установка плазменный фокус "SPEED-2" подробно описана ранее [8]. Общая энергетика разряда — до 70 кДж, напряжение — 180 кВ и ток — 1.5 МА. Плазменный разряд инициируется на поверхности изолятора и затем развивается в атмосфере дейтерия с плотностью 10^{17} cm^{-3} . Синхронизованно с разрядом в дейтерии с помощью быстрого клапана происходит напуск тяжелого газа (неона или аргона) через отверстие в аноде. Инжекция осуществляется за несколько миллисекунд до начала разряда и формирует коническую струю газа вдоль оси Z, перпендикулярной поверхности анода. Инжектируемая струя характеризуется диаметром около 1 см у поверхности анода и линейной плотностью порядка 10^{17} cm^{-1} , которая медленно спадает вдоль оси Z. Осесимметричная ионизованная оболочка плазмы дейтерия достигает сформированной в центре струи нейтрального тяжелого газа обычно за время около 50 ns до полного сжатия на оси разряда. Время сжатия плазмы на ось разряда зависит от линейной плотности струи тяжелого газа, которая определяется начальным подклапанным давлением p и временем задержки τ между открытием клапана, инжектирующего газ, и моментом инициирования разряда в дейтерии. Была отмечена тенденция появления режима SCM при уменьшении величин τ и p до значений $\tau \approx 5\text{--}6 \text{ ms}$ и $p \approx 3\text{--}4 \text{ bar}$. Режим MPM проявляется при повышении задержек до 7–12 ms и подклапанного давления до 8–10 bar.

Особенностью настоящих исследований является широкий арсенал использованных методов диагностики плазмы. Помимо регистрации традиционных электротехнических параметров плазмы, таких как производная тока и напряжение в пинче, регистрировался поток нейтронов в области энергий от 2.2 до 2.8 MeV с временным разрешением не хуже чем 10 ns. Излучение плазмы исследовалось с помощью ряда рентгеновских диагностик. Камера-обскуры с отверстиями диаметром от 20 до 100 μm с набором различных фильтров позволяла получать изображение плазмы в широком диапазоне энергий от 1 до 10 KeV с пространственным разрешением 10 μm при регистрации на рентгеновскую пленку KODAK DEF2. На упомянутом выше рис. 1 представлено интегрированное по времени разряда изображение пинча в области длин волн короче 1 nm, иллюстрирующее два режима сжатия плазмы: MPM в аргоне (a) и режим SCM в неоне (b).

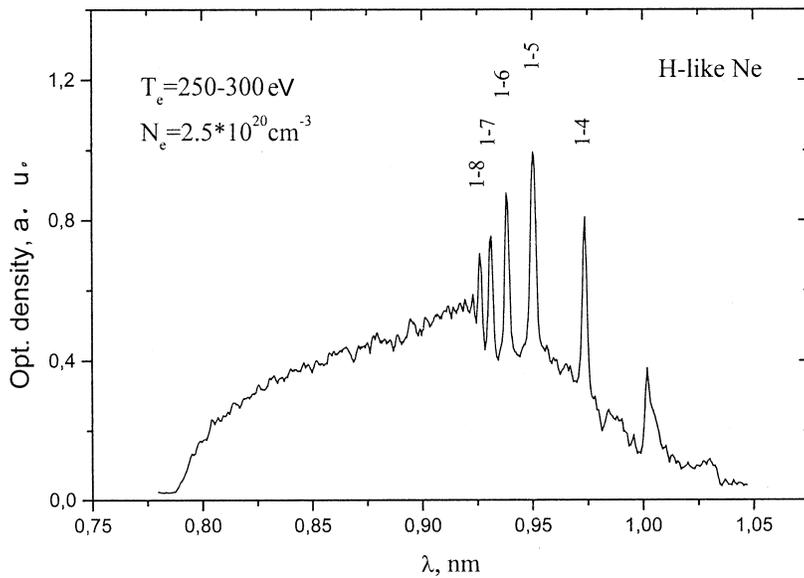


Рис. 2. Спектр излучения плазмы на оси разряда в неоне для режима SCM в момент от 20 до 10 ns до максимального сжатия. Время экспозиции спектра 10 ns.

Спектры излучения плазмы регистрировались с помощью компактного рентгеновского фокусирующего спектрографа на кристалле CaF₂ в диапазоне длин волн 0.8–1.5 nm со спектральным разрешением $\lambda/\Delta\lambda = 2 \cdot 10^4$. Установка дополнительной щели и соответствующая ориентировка спектрографа позволяла регистрировать спектры с пространственным разрешением в 1 mm. Временное разрешение в 10 ns обеспечивалось путем регистрации спектров с помощью микроканальных детекторов изображения. Пример спектра плазмы разряда в неоне для режима SCM в области 0.8–1.5 nm для плазмы на оси разряда приведен на рис. 2. Спектры, содержащие переходы Лаймановской серии водородоподобного неона NeX и соответствующий рекомбинационный континуум, позволяют провести оценку основных параметров плазмы — ее температуры (T_e) и плотности электронов (N_e). Значение плотности плазмы на оси разряда $N_e = 2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ получена по штарковскому уширению высоких переходов серии водородоподобного неона.

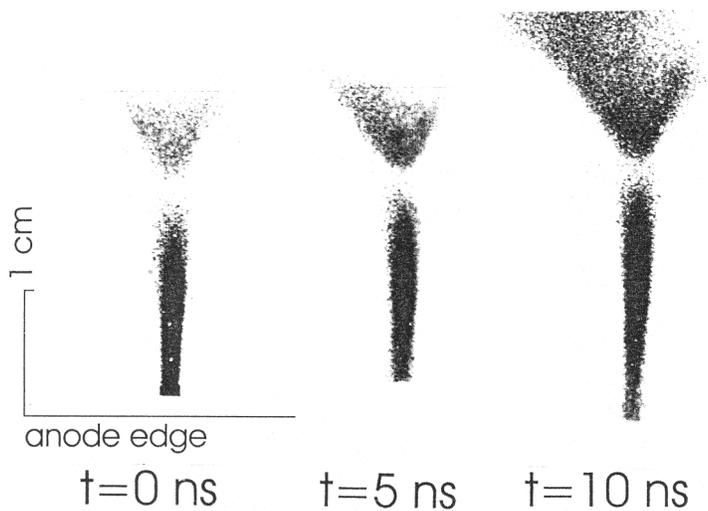


Рис. 3. Изображения плазмы стабильной моды SCM разряда в неоне при $\lambda < 2 \text{ nm}$, полученные с помощью временной многокадровой камеры-обскуры с МСР-детектором. $T = 0$ соответствует моменту максимального сжатия плазмы. Задержка между кадрами 5 ns, экспозиция каждого кадра 5 ns.

По спаду рекомбинационного водородного континуума ($\lambda < 0.9 \text{ nm}$) оценена температура плазмы $T_e \approx 250 \text{ eV}$. Близкое значение температуры получено независимо из отношения интенсивностей резонансного Ly_α перехода $1s-2p$ -подобного неона и диэлектронного сателлита $1s2p(^1P_1)-2p^2(^1D_2)$. Наиболее убедительная демонстрация существования режима стабильного пинча получена с помощью многокадровой камеры-обскуры на основе МСР-детектора. На рис. 3 представлено изображение столба плазмы неона в собственном излучении в режиме SCM в спектральном диапазоне $\lambda < 2 \text{ nm}$. Время экспозиции каждого кадра равнялось 5 ns, время задержки между кадрами — 5 ns. Дополнительная информация была получена при использовании рентгеновской скоростной камеры KENTECH с временным разрешением 100 ps, позволяющей регистрировать динамику разряда по радиусу либо по оси Z в спектральном диапазоне излучения плазмы $\lambda < 1 \text{ nm}$. Обе методики дают оценку времени жизни плазмы SCM моды $t > 30 \text{ ns}$. Спектрально разрешенное покадровое изображение плазмы в SCM моде было получе-

но с помощью рентгеновского оптического объектива с цилиндрическим многослойным рентгеновским зеркалом (W/Sc) с периодом $d = 1.18$ nm (MLM-объектив), имеющим спектральное разрешение $\lambda/\Delta\lambda = 100$. В этом приборе использовался временной МСП-детектор с временным разрешением 3 ns. Эти эксперименты показали стабильность зоны излучения на длине волны резонансной линии водородо-подобного неона NeX ($\lambda = 1.21$ nm) в течение более чем 30 ns. Существенное различие для двух исследуемых режимов сжатия (MPM и SCM) обнаружено также на осциллограммах производной тока разряда (dI/dt) и на кривых выхода нейтронов при развитии разряда. Особенность на кривой dI/dt в SCM режиме в момент схождения плазмы разряда на ось выражена значительно сильнее по сравнению с режимом MPM. Для случая SCM моды наблюдается больший выход (2–10 раз) нейтронов, большая полуширина нейтронного импульса и значительно меньшая структуризация на кривой зависимости выхода нейтронов от времени.

Таким образом, приведенные экспериментальные данные позволяют утверждать, что в быстром динамическом разряде на установке "SPEED-2" с током 1.5 MA при инжекции тяжелых газов неона и аргона впервые наблюдается устойчивый однородный пинч длиной 10–20 mm и радиусом ≤ 1 mm со временем существования несколько десятков ns, что превышает время магнитного удержания плазмы (несколько ns), а также и время распространения "фокуса" пинчевания вдоль оси разряда (~ 10 ns) при измеренной скорости "зипперинга" порядка 10^8 cm/s.

Анализируя условия возникновения режима SCM, мы пришли к выводу, что необходимым условием является создание высокой плотности энергии плазмы в быстрой токовой оболочке дейтерия. Для установки "SPEED-2" эти условия достигаются как уменьшением начального давления дейтерия в камере, так и уменьшением числа частиц инжектированного газа неона или аргона при изменении подклапанного давления и временем открытия клапана. Обычно линейные Z-пинчи в плазме имеют тенденцию к развитию в плазменном столбе макронеустойчивости (типа $m = 0$), что в условиях больших радиационных потерь на многозарядных ионах приводит к образованию микропинчей (MPM режим разряда). Как было показано в [9,10], в динамических пинчах со сжимающейся токовой оболочкой можно избежать образования перетяжек в результате генерации быстрых ускоренных ионов дейтерия ("убегающие дейтоны"), возникающих при взаимодействии дейтонов с магнитным поршнем оболочки, так называемый механизм гиромагнитного ускорения. Присутствие ускоренных дейтонов в периферийной зоне

оболочки может стабилизировать формирование плазменного столба длительностью до нескольких 10 ns, приводя к стабильному режиму разряда SCM. Как показывают расчеты, развитие моды SCM в таком случае должно характеризоваться высокой плотностью энергии, высокой скоростью сжатия и низкими радиационными потерями в плазме токовой оболочки. Эти условия стабилизации плазменного столба реализуются в разрядах с высоким током, низким давлением и легким рабочим газом, как, например, дейтерий. И напротив, разряды со сравнительно низкой плотностью энергии плазменной оболочки, низкой скоростью сжатия и высокими потерями энергии на линейчатое излучение тяжелых ионов имеют тенденцию к развитию микропинчевой моды МРМ.

Суммируя результаты работы, отметим, что для быстрого динамического пинча ("SPEED-2") разряд может развиваться в двух режимах: в режиме микропинчевой моды (МРМ) при сравнительно высоком начальном давлении дейтерия и большом числе инжектированных атомов неона или аргона, когда механизм стабилизации подавлен быстрой термализацией ускоренных ионов, и в режиме стабильного пинча SCM при невысоком начальном давлении дейтерия и малом числе инжектируемых частиц, когда действует механизм стабилизации ускоренными ионами. Экспериментальное наблюдение увеличения нейтронного выхода и изменение временной структуры нейтронного импульса, а также и характера особенности на кривой производной тока согласуются с предположением о стабилизации пинча за счет гиромангнитного ускорения дейтонов.

Работа выполнена при поддержке гранта НАТО NTECH LG971298 и гранта РФФИ 99-02-16414.

Список литературы

- [1] *Kies W., Lucas B., Rowekamp P., Schmitz F., Ziethen G., Decker G.* // Plasma Sources Sci. Technol. J. 1998. V. 7. P. 21–27.
- [2] *Decker G., Kies W., Nadolny R., Rowekamp P., Schmitz F., Ziethen G., Koshelev K.N., Sidelnikov Yu., Sopkin Yu.* // Plasma Sources Sci. Technol. J. 1996. V. 5. P. 112–118.
- [3] *Bobashev S.V., Simanovskii D.M., Platonov Yu.Ya., Rowekamp P., Decker G., Kies W.* // Plasma. Sources Sci. Technol. J. 1996. V. 5. P. 578–581.
- [4] *Vikhrev V.V., Ivanov V.V., Koshelev K.N.* // Sov. J. Plasma Phys. 1982. V. 8(6). P. 688.

- [5] *Koshelev K.N., Pereira N.R.* // J. Appl. Phys. 1991. V. 69. P. R21.
- [6] *Bobashev S.V., Simanovskii D.M., Decker G., Kies W., Rowekamp P., Zoll Ch., Berntien U.* // Tech. Phys. Lett. 1997. V. 23(4). P. 316–318.
- [7] *Lebert R., Engel A.* // Journal of Appl. Phys. 1995. V. 78(11). P. 6414–6420.
- [8] *Decker G., Kies W., Malzig M., van Calker C., Ziethen G.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Research. 1986. A249. P. 477–483.
- [9] *Deutsch D., Kies W.* // Plasma Phys. and Contr. Fusion. 1988. V. 30(3). P. 263–276.
- [10] *Deutsch D., Kies W.* // Plasma Phys. and Contr. Fusion. 1988. V. 30(9). P. 921–934.