

04;12
©1995

ПЛАЗМЕННАЯ КОНФИГУРАЦИЯ “ГАЛАТЕЯ–ПОЯС”. ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

С.Ю.Богданов, В.С.Марков, А.И.Морозов, А.Г.Франк

В [1] была предложена равновесная плазменная конфигурация с $\beta = 1$ — “Галатея”, названная “Поясом”, в основе которой лежит формирование токового слоя [2,3] (“Галатеи” — это плазменные конфигурации, содержащие внутри себя омываемые плазмой проводники с токами — миксины [4]). В принципе, “Галатея–Пояс” — это тороидальная конфигурация с двумя параллельно расположенными кольцевыми миксинами с токами одинакового направления и с сепаратрисой в виде восьмерки. Окрестность сепаратрисы представляет собой квадрупольную ловушку, изучавшуюся ранее [5–7]. Если на оси системы создать переменный магнитный поток (вдоль Z), то он возбudit в “Поясе” азимутальный ток, что приведет к образованию токового слоя и эффективному нагреву плазмы. Поскольку, в отличие от токамака, плазма удерживается в ловушке и без азимутального тока, возможно многократное перемагничивание сердечника.

Экспериментальные исследования “Пояса” естественно было начать с его цилиндрического аналога с прямыми миксинами и с простым электродным разрядом. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. В цилиндрическую вакуумную камеру из кварца диаметром 18 см и длиной 1 м введены два прямых стержня (миксины) диаметром 2 см, длиной 95 см, расположенные на расстоянии 4.5 см от оси камеры. Электрические токи в миксинах, одинаковые по величине и направлению, возбуждались при разряде батареи конденсаторов ($C_1 = 2.3 \cdot 10^3$ мкФ, $U_1 \leq 2$ кВ) с полупериодом $T_1/2 = 180$ мкс и максимальным значением тока каждой миксины $I_m \leq 35$ кА. Двумерное магнитное поле содержит нулевую линию на оси Z (точка 0), через которую проходит сепаратрисная поверхность. Вблизи нулевой линии магнитное поле растет линейно с расстоянием до нее. Обратным токопроводом служат два прямых проводника, помещенные снаружи вакуумной камеры, как показано на рис. 1. В результате уменьшается сила стягивания миксин и несколько увеличивается градиент магнитного поля, который достигал величины $h \leq 0.8$ кг/см.

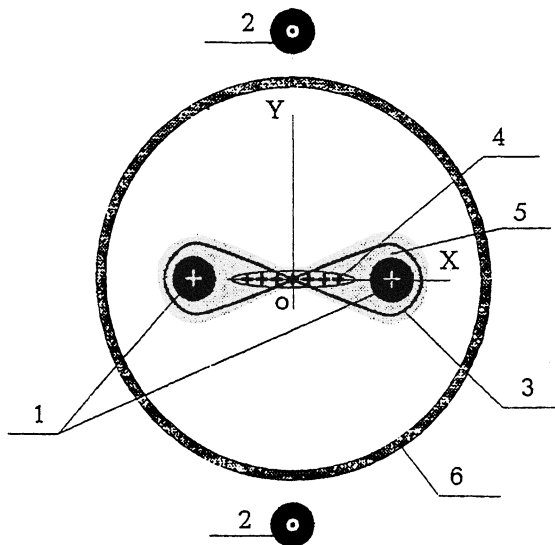


Рис. 1. Схема экспериментальной установки “Галатей-Пояс” (поперечное сечение). 1 — миксины; 2 — обратный токопровод миксин; 3 — сепаратрисная поверхность магнитного поля; 4 — токовый слой; 5 — мантия; 6 — вакуумная камера.

Вакуумная камера, откачанная до $2 \cdot 10^{-6}$ Тор, наполнялась аргоном или гелием до давления 20–200 мТор. С обоих торцов в камеру введены два плоских сетчатых электрода на расстоянии 1 м вдоль оси Z . Для создания плазмы и возбуждения в ней электрического тока к межэлектродному промежутку прикладывается импульсное напряжение от конденсатора ($C_2 = 2 \text{ мкФ}$, $U_2 = 12 \text{ кВ}$). В большинстве случаев электрический ток в плазме возбуждался в момент времени, близкий к максимуму тока миксин, т. е. поле миксин было квазистационарным. Исследования проводились в двух режимах разрядного тока: колебательном ($I_z^{\text{max}} = 17 \text{ кА}$, $T_2/2 = 2.7 \text{ мкс}$) и аperiодическом, когда ток $I_z^{\text{max}} = 10 \text{ кА}$ достигался к моменту $\approx 1 \text{ мкс}$, а его длительность $\approx 5\text{--}6 \text{ мкс}$. Направления электрических токов в миксинах и в плазме были как одинаковыми (α -режим), так и противоположными (β -режим).

Двумерные изображения излучающей плазмы в плоскости, перпендикулярной нулевой линии магнитного поля (интегральные по Z), регистрировались в последовательные моменты времени и в различных участках видимого спектра. С этой целью использовался электронно-оптический преобразователь с временем экспозиции 80 нс и коэффициентом усиления 400 в комбинации с узкополосными ($\delta\lambda_{1/2} = 10\text{--}12 \text{ \AA}$) интерференционными фильтрами,

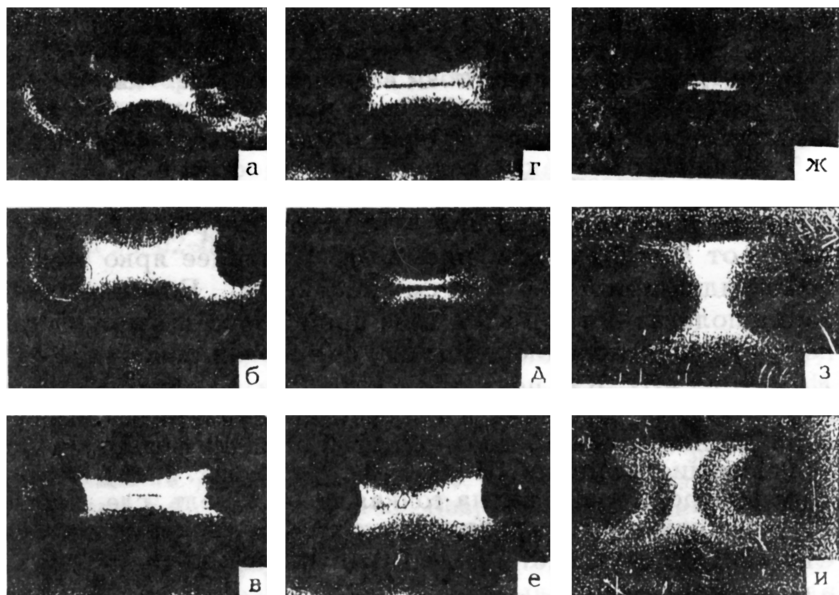


Рис. 2. Изображения плазмы, полученные в различных условиях:
а — газ Ar, линия ArII 4609Å, $h = 0.2$ кг/см, $t = 0.3$ мкс, α -режим;
б — газ Ar, линия ArII 4806Å, $h = 0.2$ кг/см, $t = 1.6$ мкс, α -режим;
в — газ Ar, линия ArII 4806Å, $h = 0.4$ кг/см, $t = 1.5$ мкс, α -режим;
г — газ Ar, линия ArII 4806Å, $h = 0.8$ кг/см, $t = 2.1$ мкс, α -режим;
д — газ Ar, линия ArII 4806Å, $h = 0.8$ кг/см, $t = 4.2$ мкс, α -режим;
е — газ He, линия HeI 5876Å, $h = 0.8$ кг/см, $t = 1.7$ мкс, колеб. режим;
ж — газ Ar, линия CIII 5698Å, $h = 0.8$ кг/см, $t = 1.9$ мкс, α -режим;
з — газ Ar, линия 4806Å, $h = 0.8$ кг/см, β -режим; *и* — газ He, линия HeI 5876Å, $h = 0.8$ кг/см, $t = 5.0$ мкс, колеб. режим.

с максимумами пропускания вблизи спектральных линий: ArII 4806Å, ArII 4609Å, CIII 5696Å, CIV 5801Å, HeI 5876Å и HeII 4686Å (см. [8]).

При одинаковых направлениях электрических токов в миксинах и в плазме (α -режим, рис. 2, *а-ж*) изображения в линиях ArII (энергия возбуждения $E_x = 19.22$ эВ) содержат две характерные области: во-первых, это область интенсивного свечения, имеющая форму слоя и расположенная между миксинами, и, во-вторых, область свечения меньшей интенсивности (мантия), окружающая миксины и близкая по форме к сепаратрисной поверхности (рис. 2, *а-в*). На ранней стадии, $t < 2$ мкс, и при малых магнитных полях, $h < 0.5$ кг/см, хорошо видна "очковая" структура, связанная с сепаратрисой. Позднее светящиеся мантии, охватывающие миксины, близко подходят к их поверхностям и ли-

бо исчезают совсем, либо оказываются прижатыми к миксинам. Характерно, что исчезновение мантии происходит тем быстрее, чем больше токи в миксинах, т. е. чем больше градиент h исходного магнитного поля (ср. рис. 2, б и в). Скорость сжатия плазмы в слой и интенсивность свечения собственно в слое также возрастают с ростом h .

Особый интерес представляет появление темной щели в середине плоского слоя при $h = 0.4$ кг/см (рис. 2, в) (в отличие от $h = 0.2$ кг/см, рис. 2, б). Наиболее ярко темная щель видна при $h = 0.8$ кг/см (рис. 2, г, д). Есть все основания полагать, что в этой зоне происходит выгорание ионов Ag^+ и образование ионов Ag^{++} (энергия ионизации Ag^+ $E_I = 27.63$ эВ). Как показано в [3,9], T_e и N_e обычно имеют максимальные значения в плоскости симметрии токового слоя. Действительно, именно в этой области возникает яркое свечение в линии СИ ($E_x = 34.27$ эВ, рис. 2, ж), в середине которого также видна тонкая темная щель, где, в свою очередь, появляется сравнительно слабое свечение в линии СИV 5801\AA ($E_x = 39.67$ эВ). Таким образом, температура электронов максимальна в средней плоскости слоя излучающей плазмы, расположенного между миксинами, что отражает, по-видимому, пространственное распределение электрического тока. Устойчивость плазменной конфигурации иллюстрируется изображениями, полученными при $t = 2.1$; 4.2 мкс (рис. 2, г, д).

Изображения разряда, полученные в α -режиме, согласуются в целом с ожидавшимися. Единственное явное расхождение — это довольно быстрое, в течение 1–2 мкс, исчезновение мантий, окружавших миксину, что можно связать с испарением вещества с поверхности миксины и, возможно, с большим ларморовским радиусом ионов аргона ρ_i . В условиях эксперимента $\rho_i \approx 1$ см, тогда как расстояние от мантии до миксины менее 1 см. Интенсивное взаимодействие плазмы с миксинами демонстрирует изображение в линии HeI (рис. 2, е), на котором отчетливо видны ярко светящиеся области на внутренних поверхностях миксин, что обусловлено, по-видимому, потоками плазмы, которые генерируются в пределах токового слоя (см. [10]).

В β -режиме, когда электрические токи в плазме и миксинах направлены противоположно, осуществляется эффективное отжатие плазмы от миксин (см. рис. 2, з, и; рис. 2, и получен в колебательном режиме и соответствует второму полупериоду разрядного тока).

На следующем этапе исследований предполагается ввести в действие предварительную ионизацию газа, увеличить “ларморовское расстояние” от сепаратрисы до поверхности миксины (переход на водород, увеличение тока в миксинах), существенно увеличить длительность разряда.

В заключение авторы благодарят Г.М. Батанова за внимание и интерес к работе, М.А. Морозова за существенный вклад в создание установки, Н.П. Кирий и В.Б. Бурилину за сотрудничество.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 95-02-06054).

Список литературы

- [1] Морозов А.И., Франк А.Г. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. В. 11. С. 982-989.
- [2] Syrovatskii S.I. // Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1981. V. 19. P. 163-229.
- [3] Франк А.Г. // Тр. ФИАН. 1985. Т. 160. С. 93-121.
- [4] Морозов А.И. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. В. 3. С. 305-316.
- [5] Yoshikawa S. // Nucl. Fusion. 1973. V. 13. N 3. P. 433-449.
- [6] Перегуд Б.П., Ленерт Б. и др. Вопр. атомной науки и техники. Сер. Термояд. синтез. 1984. В. 3 (16). С. 46.
- [7] Бугрова А.И., Лунатов А.С., Морозов А.И. и др. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 17. В. 8. С. 1-4.
- [8] Богданов С.Ю., Бондарь Ю.Ф., Бурилина В.Б. и др. // ЖТФ. 1994. Т. 64. В. 9. С. 30-38.
- [9] Frank A.G., Kiselev D.T., Kyrie N.P. et al. // Proc. SPIE. 1992. V.1843. P. 19-30.
- [10] Frank A.G., Kyrie N.P., Markov V.S. et al. // Proc. ICPIG-17. Budapest, 1985. V. 1. P. 102-104.

Институт общей физики
РАН
Москва

Поступило в Редакцию
8 августа 1995 г.