

04

Динамика захвата и удержания плазмы в галатее „Тримикс“

© А.И. Морозов, А.И. Бугрова, А.М. Бишаев,
М.В. Козинцева, А.С. Липатов

РНЦ „Курчатовский институт“
Московский государственный институт радиотехники, электроники
и автоматики (технический университет) — МИРЭА (ТУ)
E-mail: bugrova@mirea.ru

Поступило в Редакцию 18 июля 2005 г.

Кратко описана установка „Галатее-3“ (МИРЭА), которая включает коаксиальную плазменную пушку, плазмод и ловушку — галатею „Тримикс“ с тремя миксинами. Приведены параметры плазменного сгустка в плазмод и в ловушке. Показано, что плазма может эффективно захватываться ловушкой и растекаться вдоль нее. При этом поперечные размеры плазменной конфигурации выходят за пределы поверхностей Окавы. Оценки показывают, что уход частиц из ловушки — масштаба классического.

PACS: 52.58.-c

Сегодня наиболее вероятными кандидатами на роль идеальных ловушек представляются магнитные баллоны-галатеи¹ [1–3], в которых плазма окружена со всех сторон магнитным барьером.

Исследование тороидальных мультипольных галатей (квадрупольных и октупольных) подтверждает реализуемость указанных условий, в том числе классический характер переносов [4,5]. Однако изучавшиеся модели обладают одним существенным недостатком: расстояние между сепаратрисой и поверхностью миксины δ_{1-2} здесь мало, что, естественно, ограничивает время удержания плазмы. Конечно, этот недостаток не принципиален и может быть просто преодолен пропорциональным увеличением всех размеров ловушки. Однако на начальном этапе исследований, при ограниченных размерах имеющихся в МИРЭА (ТУ) вакуумных камер, этот недостаток заставляет искать новые варианты

¹ Напомним, что „галатеями“ названы ловушки, содержащие проводники („миксины“), полностью погруженные в плазму.

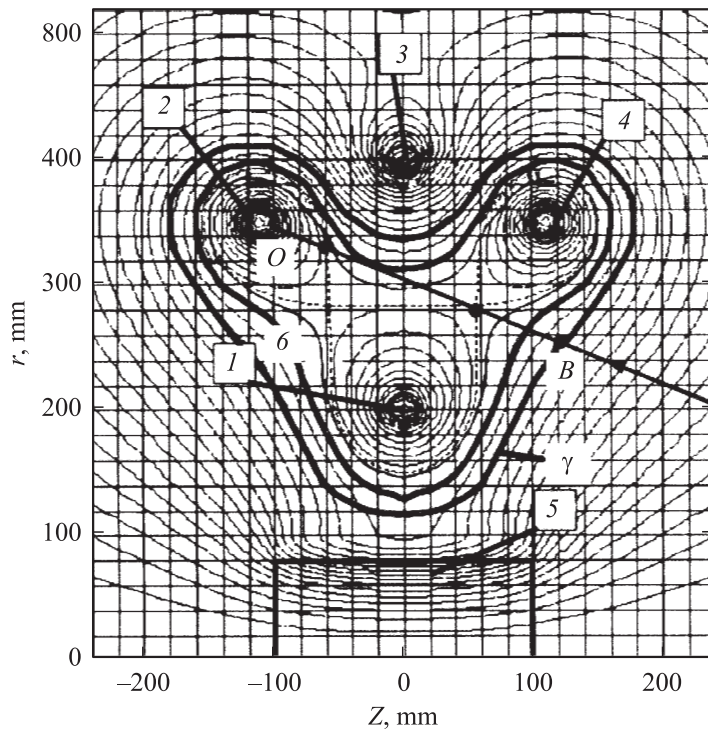


Рис. 1. Ловушка галатей „Тримикс“: 1, 2, 4 — „миксины“, 3 — „расталкиватель“, 5 — соленоид, 6 — граница Окавы. BO — линия инжекции плазмы, γ — граница плазмы.

мультипольных галатей, где при обычных размерах ловушки величина δ_{1-2} была бы значительной.

Проведенный А.И. Морозовым вместе с рядом сотрудников (Ю.А. Ермаковым, В.И. Хвесьюком, А.Ю. Сорокиной и др.) поиск привел к конфигурации „Тримикс“ [6], изображенной на рис. 1, где жирным конутом выделена силовая линия (6), удовлетворяющая условию Окавы [2]:

$$\oint \frac{d\ell}{B} = \min. \quad (1)$$

На рис. 1 изображена оптимизированная магнитная конфигурация галатеи „Тримикс“ в отсутствие плазмы. Эта конфигурация формируется пятью соосными катушками 1–5. Ближе всего к оси находятся витки соленоида 5. Далее по радиусу располагаются обмотки трех миксин 1, 2 и 4, одна из которых 1 — „внутренняя“ а две другие 2 и 4 — „внешние“. Между „внешними“ миксинами помещен „расталкиватель“ 3, который ослабляет электродинамическое взаимодействие миксин. Размеры ловушки видны из масштабной сетки, нанесенной на этом же рисунке.

Ловушка заполнялась водородной плазмой с помощью инжекционного комплекса, основными элементами которого были электромагнитная пушка и плазмовод. Линия инжекции ВО изображена на рис. 1.

В одних условиях пушка может генерировать два сгустка: „быстрый“ и „медленный“. В других случаях образуется только „медленный“ сгусток. Эксперименты показали, что при используемых нами магнитных полях быстрый сгусток пробивает как передний, так и задний магнитные барьеры ловушки и, практически, не захватывается ею. Поэтому работа проводилась при режиме работы пушки, дающем только медленный сгусток. Перед тем как войти в ловушку, плазма должна преодолеть магнитный барьер, величина которого при токах в витках катушек ~ 200 А составляет $B_{\max} \approx 2.2 \cdot 10^{-2}$ Т.

Средняя скорость частиц медленного сгустка в плазмоводе составляет $5 \cdot 10^4$ м/с, длина сгустка равна ~ 1.5 м при его длительности ~ 30 мкс.

Энергия сгустка, выходящего из плазмовода, равна 2 Дж, а число выходящих из него частиц составляет $\sim 1 \cdot 10^{18}$ штук. Средняя концентрация частиц на выходе из плазмовода равна $\sim 2 \cdot 10^{20}$ м⁻³.

Все приведенные величины были измерены с помощью калориметров, СВЧ-интерферометрии, магнитных и электрических зондов.

Динамическое давление сгустка перед передним магнитным барьером на входе в ловушку

$$\rho V^2 = nm_p V^2 \approx 8.3 \cdot 10^2 \text{ Па}, \quad (2)$$

где m_p — масса протона, в то время как при $B = B_{\max} = 2.2 \cdot 10^{-2}$ Т магнитное давление равно

$$\frac{B^2}{2\mu_0} \approx 1.9 \cdot 10^2 \text{ Па}. \quad (3)$$

Таким образом, динамическое давление сгустка заметно выше магнитного давления, и плазма легко входит в ловушку.

Преодолевая магнитный барьер, часть частиц медленного сгустка проходила в ловушку, заметно теряя скорость в направлении инжекции от $5 \cdot 10^4$ до $1.4 \cdot 10^4$ m/s. Поэтому из ловушки эти частицы не вылетят в связи с уменьшением динамического давления перед задним магнитным барьером благодаря термализации и растеканию вдоль ловушки. Этот факт был подтвержден экспериментально с помощью электрического зонда, поставленного сзади ловушки, сигнал с которого был равен нулю. Таким образом, захват плазмы оказывается эффективным.

Вошедшая в ловушку плазма (области входа припишем азимут $\Theta = 0^\circ$) растекается по азимуту симметрично в двух направлениях: по часовой стрелке ($\Theta < 0$) и против. Через время заполнения ловушки средняя концентрация частиц плазмы в ней будет везде практически одинаковой.

Время заполнения плазмой t_1 будет не сильно отличаться от времени, за которое потоки частиц, идущие по часовой стрелке и против нее, встретятся на азимуте 180° :

$$t_1 = \frac{\pi r_1}{u}, \quad (4)$$

где r_1 — средний радиус ловушки, равный 30 см; u — средняя азимутальная скорость сгустка.

Для определения u использовались три одиночных плоских электрических зонда, расположенных на разных азимутах в центральном сечении плазменного образования. При каждом выстреле пушки измерялись временные сдвиги сигналов с этих зондов. Затем зоны переставлялись в другие места, соответствующие другим азимутам. Так были измерены временные сдвиги между максимумами сигналов от электрических зондов, расположенных на азимутах от $\Theta_0 = 0^\circ$ до $\Theta = \pm 180^\circ$ с шагом 30° . Оказалось, что скорость распространения медленного сгустка по азимуту равна примерно $1 \cdot 10^4$ m/s, поэтому время заполнения ловушки составляет величину $\sim 100 \mu\text{s}$.

Для этих же зондов, нормали к которым были направлены перпендикулярно к азимутальному направлению, измерялись вольт-амперные характеристики. Собирающая поверхность зонда составляла 0.07 mm^2 . После подачи различных по величине и по знаку напряжений на зонд снимались осциллограммы сигналов зонда на различных азимутах и по ним строились вольт-амперные характеристики. Обработав стандартным методом вольт-амперные характеристики, получили зависимости

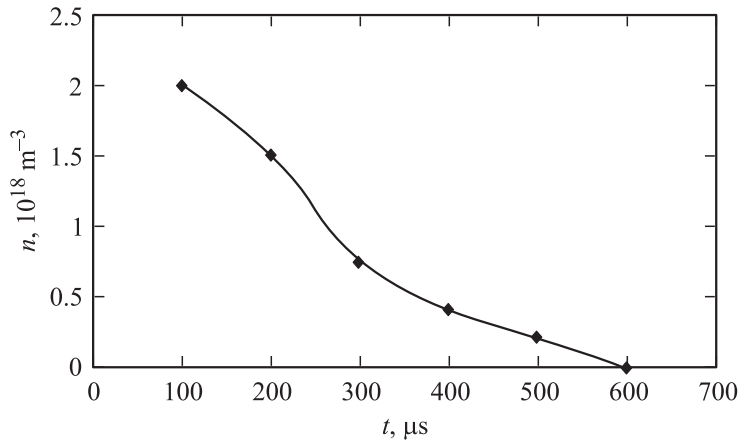


Рис. 2. Зависимость концентрации частиц плазмы от времени после заполнения ловушки.

величин электронной температуры kT_e и потенциала пространства ϕ от азимута. Оказалось, что эти величины меняются незначительно после заполнения плазмой ловушки. Так, kT_e меняется в пределах от ~ 7 до ~ 5 eV, а потенциал пространства — от ~ 20 до ~ 15 eV.

Следующим шагом было изучение поперечных размеров плазмы в ловушке „Тримикс“.

Измерения плотности проводились на азимуте $\Theta = 100^\circ$ путем определения электронного тока на электрический зонд. Зонд помещался на координатное устройство, которое перемещало его по оси Z . Измерения проводились через каждые 2 см по оси Z для $r = 16, 22, 24, 28, 33$ и 37 см, т.е. была охвачена практически вся область в плоскости (r, Z) , занимаемая плазмой.

Оказалось, что плазма занимает явно большее сечение, чем площадь, находящаяся внутри границы Окавы. Измерения показали, что площадь, охватываемая линией Окавы, равна $S_{OK} = 4.1 \cdot 10^2 \text{ cm}^2$, а плазма в плоскости (r, Z) занимает площадь $S = 5 \cdot 10^2 \text{ cm}^2$. Поэтому объем, занимаемый плазмой, будет равен $\sim 9 \cdot 10^4 \text{ cm}^3$ (~ 90 литров). Граница плазмы обозначена буквой γ на рис. 1. Средняя концентрация плазмы после заполнения ловушки составляет величину порядка

$n = 2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$. Эта величина получена с помощью СВЧ-интерферометра и электрических зондов.

После выравнивания концентрации до среднего значения она начинает убывать. На рис. 2 изображена зависимость концентрации плазмы в ловушке от времени после ее заполнения, полученная с помощью электрических зондов и СВЧ-интерферометра. Из рис. 2 видно, что концентрация частиц в ловушке уменьшается в e раз за время порядка $\sim 200 \mu\text{s}$. Это время соответствует времени удержания частиц плазмы в „Тримиксе“; оно порядка времени ухода частиц из ловушки за счет классической диффузии.

Таким образом, на основании приведенных данных можно сделать следующие выводы:

1. В ловушке „Тримикс“ удерживается плазма плотностью $\sim 2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ и $kT_i \sim kT_e (5 \div 10) \text{ eV}$ с характерным временем $\sim 200 \mu\text{s}$.
2. Время жизни частиц в ловушке порядка диффузионного времени.
3. Поперечные размеры плазменного образования в ловушке „Тримикс“ явно выходят за пределы Окавы.

Авторы выражают благодарность Е.П. Горбунову (РНЦ „Курчатовский институт“) за предоставление оборудования для СВЧ-интерферометрии и помощь в его освоении, И.А. Тарелкину и А.А. Пушкину (МИРЭА) — за активное участие в проведении экспериментов, В.В. Савельеву (ИПМ им. Келдыша) — за расчеты магнитных конфигураций.

Работа выполнена в рамках договоров с Минатомом РФ и при поддержке программы сотрудничества МО РФ и Минатома РФ (проект № 2.06.13 и проект № 3.06.23).

Список литературы

- [1] Kerst D.W., Ohkawa T. // Nuovo Cimento. 1961. V. 22. P. 784.
- [2] Yoshikawa S. // Nucl. Fusion. 1973. V. 13. P. 433.
- [3] Бугрова А.И., Липатов А.С., Морозов А.И., Харчевников В.К. // Физика плазмы. 1993. Т. 19. № 2. С. 1411–1417.
- [4] Морозов А.И., Бугрова А.И., Бишаев А.М. и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 17. С. 57–61.
- [5] Морозов А.И., Савельев В.В. // Успехи физических наук. 1998. Т. 168. № 11. С. 1153–1194.
- [6] Морозов А.И., Бугрова А.И., Бишаев А.М. // XXX Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС. 24–28 фев. 2003 г. Тез. докл. С. 70.