

04

Влияние величины магнитного барьера на параметры плазмы в ловушке „Тримикс-М“

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

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

Поступило в Редакцию 3 мая 2006 г.

Приведены параметры плазмы, захваченной ловушкой „Тримикс-М“, после увеличения магнитного барьера ловушки и энергии поступающего в ловушку сгустка водородной плазмы. При величине барьерного магнитного поля $B_b \sim 0.1$ Т время удержания плазмы в ловушке составило величину $\tau_p \approx 300 \mu\text{s}$, что соответствует оценкам, полученным по формулам классического переноса, максимальная концентрация $n_e \sim 5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, $T_e \approx 20 \text{ eV}$, $T_i \sim 2T_e$. Энергосодержание плазмы в ловушке $\sim 110 \text{ J}$, отношение газокINETического давления плазмы к магнитному $\beta_0 \sim 0.2$.

PACS: 52.58.-c

В работах [1,2] приведены параметры плазмы в ловушке „Тримикс“ до модернизации инжекционного комплекса и ловушки. С целью увеличения параметров плазмы была проведена модернизация установки Галатеев-3, основными элементами которой являются электромагнитная пушка и ловушка „Тримикс“. Для этого емкость накопительной батареи, питающей пушку, была увеличена в 2.5 раза. Это позволило при зарядном напряжении 17 kV накапливать энергию 8.7 kJ. Была также уменьшена индуктивность разрядной цепи пушки до 31 nH, что сравнимо с индуктивностью самой пушки. Энергия протонов при „выстреле“ такой пушки составила 100 eV при скорости сгустка в плазмоводе $1.4 \cdot 10^5 \text{ m/s}$.

Для захвата сгустков с такой энергией необходимо увеличить магнитное поле ловушки. Для этого были перемотаны все катушки

ловушки, так что при зарядном напряжении, подаваемом на катушки $U_0 = 2 \div 3$ кВ, можно получить величину барьерного поля $B_b = 0.1$ Т. Эта ловушка была названа „Тримикс-М“. Первые результаты, полученные на данной ловушке, были опубликованы в трудах Звенигородской конференции [3]. Данная работа посвящена исследованию параметров плазмы, захваченной ловушкой „Тримикс-М“.

Калориметрические измерения показали, что сгусток водородной плазмы преодолевает переднюю магнитную корку практически без потерь и не проникает за второй магнитный барьер, т.е. весь сгусток, прошедший переднюю корку ловушки, захватывается ловушкой.

Оценка времени заполнения плазмой ловушки проводилась с помощью измерения временного сдвига между сигналами на электрические зонды, разнесенные по азимуту в центре ловушки. Поверхность зондов ориентировалась параллельно азимутальной скорости. Эксперименты показали, что время заполнения составляет величину $t_f = 50 \mu\text{s}$, а скорость заполнения $\sim 2 \cdot 10^4$ м/с.

С помощью калориметров и датчиков Пельтье была измерена зависимость энергосодержания плазмы в ловушке от величины барьерного магнитного поля. Кривая этой зависимости приведена на рис. 1 (кривая 1). Из рисунка видно, что при увеличении B_b от 0.025 до 0.1 Т энергия плазмы в ловушке возрастает от 30 до 110 Дж. На этом же рисунке (кривая 2) приведена зависимость электронной температуры от B_b , измеренная с помощью электрического зонда. Видно, что электронная температура слабо зависит от величины магнитного барьера и равняется ~ 20 эВ. Максимальная концентрация плазмы рассчитывалась из вольт-амперных зондовых характеристик для разных B_b .

Время удержания плазмы в ловушке определялось временем, при котором концентрация частиц падала в e раз. Определение времени удержания плазмы τ_p , в зависимости от величины B_b , проводилось при обработке зондовых сигналов, величина которых пропорциональна концентрации плазмы. Одна из таких осциллограмм при барьерном магнитном поле $B_b = 0.05$ Т приведена на рис. 2. На рис. 3 приведены кривые зависимости максимальной концентрации плазмы в ловушке (кривая 1) и времени удержания плазмы τ_p от величины магнитного барьера (кривая 2). Из рисунка видно, что в пределах изменения B_b от 0.025 до 0.1 Т концентрация меняется от $1.4 \cdot 10^{13}$ до $5 \cdot 10^{13}$ см⁻³, а τ_p от 170 до 280 μs . Точки на кривой зависимости τ_p от B_b соответствуют средним значениям для различных „выстрелов“ пушки при каждом B_b .

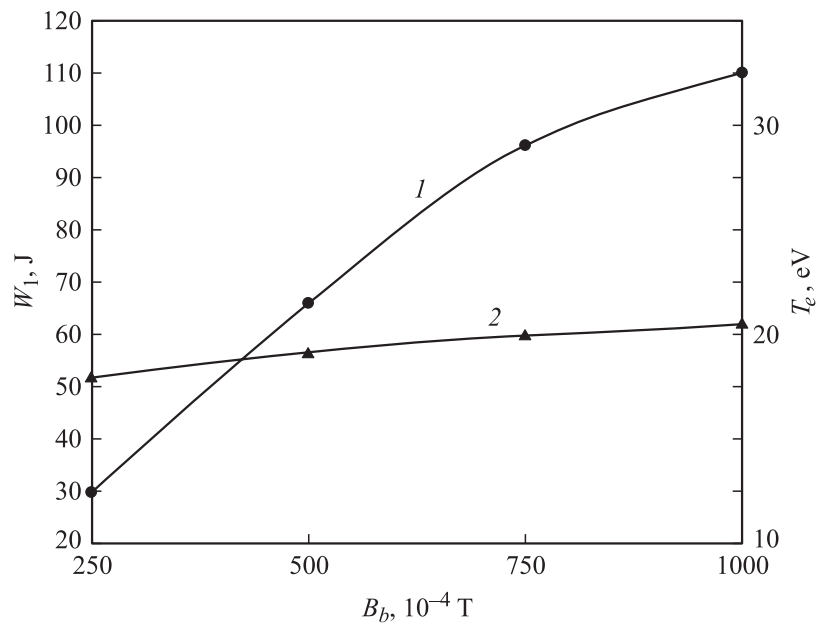


Рис. 1. Зависимость энергосодержания плазмы в ловушке (1) и электронной температуры (2) от величины магнитного барьера.

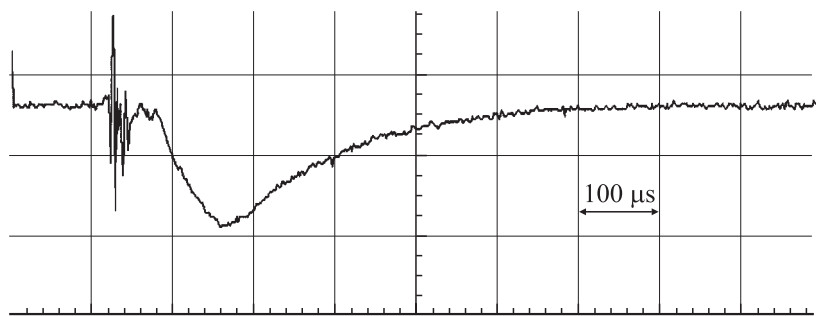


Рис. 2. Осциллограмма электронного тока на электрический зонд. $B_b = 0.05 \text{ T}$.

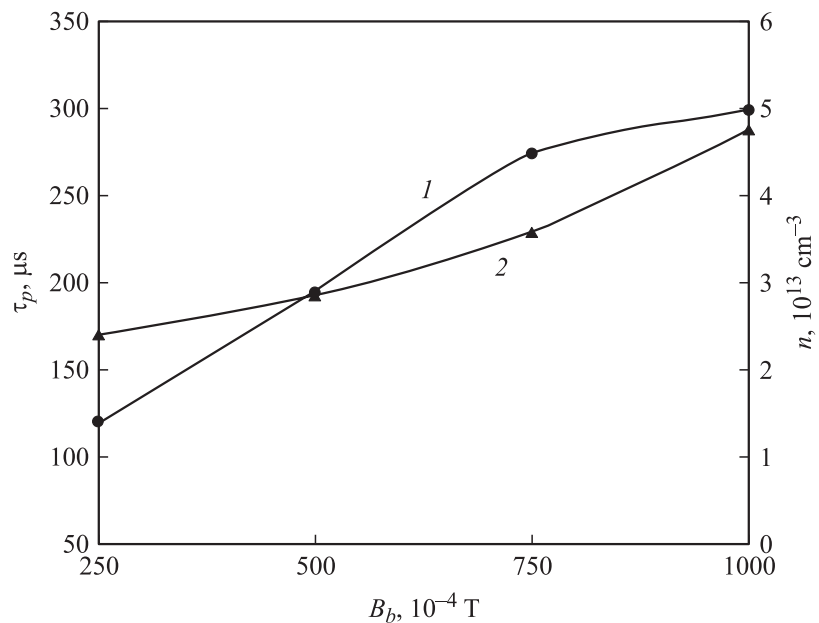


Рис. 3. Зависимость максимальной концентрации плазмы в ловушке (1) и времени удержания τ_p (2) от величины магнитного барьера.

Поведение времени удержания от величины B_b соответствует классическому переносу частиц через боковую поверхность „плазмиды“. Для дальнейшего увеличения τ_p необходимо увеличить электронную температуру T_e , так как в случае классических переносов:

$$\tau_p \sim \frac{\delta^2}{\beta_0} (T_e)^{3/2}, \quad (1)$$

где δ — ширина магнитного барьера, β_0 определяется как отношение максимального давления плазмы в ловушке к давлению магнитного поля при $B = B_b$. Также необходимо уменьшить потери частиц на элементы конструкции ловушки.

Кроме времени удержания τ_p было измерено время существования плазмы в ловушке τ_* . Время τ_* определялось как время, за которое

плотность плазмы уменьшалась примерно в 20 раз. Это время также росло с ростом B_b и достигало $\sim 900 \mu\text{s}$ при $B_b = 0.1 \text{ Т}$.

При прохождении сгустка водородной плазмы от пушки до ловушки протекают несколько процессов, разделенных во времени.

Плазмовод формирует сгусток плазмы, идущий от пушки с энергией W_0 .

Плазма преодолевает передний магнитный барьер, тормозится задним магнитным барьером.

Идет процесс термализации и „растекания“ плазмы в объеме ловушки по азимуту в течение $\sim 50 \mu\text{s}$.

После окончания заполнения энергия плазменного сгустка уменьшается за счет диффузии частиц через магнитную корку ловушки.

Следует отметить, что во время всех процессов происходит потеря энергии на элементы конструкции: „державки“ и „миксины“.

После процесса термализации и заполнения ловушки баланс энергии выглядит следующим образом:

$$W_1 = W_3 + W_4 + W_5. \quad (2)$$

Энергосодержание плазмы в W_1 уменьшается с течением времени за счет W_3 — диффузии частиц, потерь энергии на „державки“ W_4 и „миксины“ W_5 . Измерения показали, что величины W_4 и W_5 равны 15 и 30 J соответственно.

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

1. Модернизированная система пушка–ловушка „Тримикс-М“ позволила захватить в ловушку сгусток с энергией ионов 100 eV. Это привело к повышению параметров плазмы в ловушке: $T_e \approx 20 \text{ eV}$, $T_i \sim 2T_e$, $n_e \sim 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, энергосодержание плазмы $\sim 110 \text{ J}$, $\beta_0 \approx 0.2$.

2. Время удержания плазмы ловушкой при $B_b = 0.1 \text{ Т}$ составило $\tau_p = 280 \mu\text{s}$. Характер зависимости $\tau_p(B_b)$ соответствует классическому переносу. Сравнительно малое возрастание τ_p в ловушке „Тримикс-М“ по сравнению с предыдущими данными, полученными до модернизации ловушки [1], по-видимому, определяется возрастанием β_0 .

Авторы выражают благодарность А.А. Пушкину и И.А. Тарелкину за активное участие в проведении экспериментов, а также В.И. Васильеву и В.М. Струнникову за обсуждение результатов экспериментов.

Работа выполнена в рамках контракта с Росатомом № 1.05.19.15.547 от 1 апреля 2005 г.

Список литературы

- [1] *Морозов А.И., Бугрова А.И., Бишаев А.И.* и др. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 1. С. 65–70.
- [2] *Морозов А.И., Бугрова А.И., Бишаев А.И.* и др. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 3. С. 195–206.
- [3] *Бишаев А.И., Бугрова А.И., Васильев В.И.* и др. // Тез. докл. XXXIII Междунар. (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС. г. Звенигород, 13–17 февраля 2006 г. С. 44.