

04

## Исследование времени удержания плазмы в мультипольной магнитной ловушке-галатее „Тримикс-М“

© А.М. Бишаев, А.И. Бугрова, М.В. Козинцева,  
А.С. Липатов, А.С. Сигов, В.К. Харчевников

Московский государственный институт радиотехники, электроники  
и автоматики (технический университет) МИРЭА, Москва  
E-mail: bishaev@mirea.ru

Поступило в Редакцию 12 января 2010 г.

Приведены результаты измерения времени удержания водородной плазмы различных параметров (в диапазоне концентраций  $1 \cdot 10^{16}$ – $6 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$  и энергий ионов  $\sim 100$ – $300 \text{ eV}$ ) в мультипольной магнитной ловушке-галатее „Тримикс-М“. Показано, что: а) время удержания увеличивается с уменьшением концентрации плазмы в ловушке; б) с ростом барьерного магнитного поля время удержания увеличивается быстрее, чем по линейному закону. Полученные результаты указывают на столкновительный характер диффузии плазмы через барьерное поле ловушки.

Эксперименты проводились на модернизированной установке „Галатее-3М“, состоящей из инжекционного комплекса и ловушки „Тримикс-М“, подробно описанной в [1]. Первые полученные на ней результаты по транспортировке, захвату и удержанию плазменных сгустков приводятся в [1,2].

Для расширения диапазона параметров плазмы, удерживаемой ловушкой, генерация плазменных сгустков, инжектируемых в ловушку, осуществлялась двумя различными плазменными пушками. Пушка № 1 имела конические медные электроды, длина которых равна 63 см, а средний диаметр — 20 см. Пушка № 2 имела цилиндрические стальные электроды, длиной 26 см и диаметром наружного электрода 7.5 см [3].

Подбирая различные режимы их работы, в настоящее время удалось получить в ловушке средние параметры плазмы, представленные в таблице. Параметры плазмы в ловушке определялись с помощью: а) электрических одиночных зондов (для определения границы плазменного образования); б) СВЧ-интерферометра с длиной волны 8.3 mm

Параметры плазмы в ловушке для различных режимов инжекции

Режим №	Концентрация плазмы, $m^{-3}$	Температура ионов, eV
1	$1 \cdot 10^{16} - 5 \cdot 10^{17}$	100–260
2	$8 \cdot 10^{17} - 1 \cdot 10^{18}$	100–270
3	$2 \cdot 10^{18} - 6 \cdot 10^{18}$	160–300

(для определения средней концентрации плазмы); в) магнитных зондов (для определения энергии направленного движения ионов водорода в инжектируемом сгустке). Температура ионов оценивалась в предположении, что энергия термализованной плазмы, удерживаемой ловушкой, составляет около одной трети энергии направленного движения ионов, инжектируемых в ловушку.

Представленные в таблице параметры относятся к тому моменту времени, когда концентрация плазмы в ловушке достигает своего максимального значения (спустя 100–150  $\mu s$  с момента инжекции). Начиная с этого момента, концентрация уменьшается.

С помощью СВЧ-интерферометра, а в некоторых случаях и с помощью электрического зонда была измерена зависимость средней концентрации плазмы, удерживаемой в ловушке, от времени для указанных в таблице режимов и для различных значений барьерного магнитного поля. По этим данным было определено время  $\tau_p$  уменьшения концентрации  $n$  плазмы в ловушке в  $e$  раз.

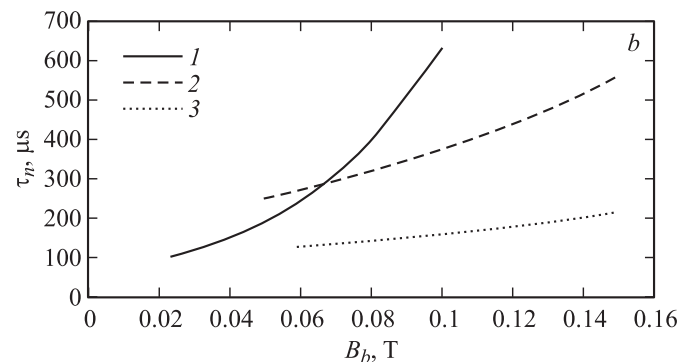
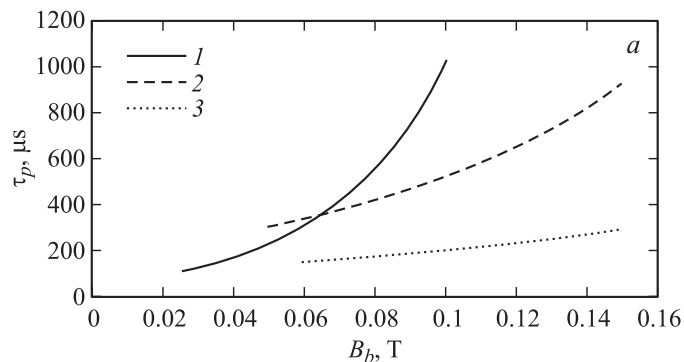
Экспериментально полученные зависимости времени  $\tau_p$  от величины барьерного магнитного поля в ловушке для режимов, указанных в таблице, представлены на рисунке, *a*.

Как показано в [4], с учетом процесса ионообразования в плазме, удерживаемой внутри ловушки, время жизни плазмы  $\tau_n$  определяется по формуле:

$$\tau_n = \frac{1}{I/n - d(\ln n)/dt},$$

где  $I$  — скорость ионообразования, а  $d(\ln n)/dt = -1/\tau_p$ . Отношение  $I/n$  не зависит от концентрации  $n$  плазмы и для параметров нашей установки (остаточное давление равно  $3 \cdot 10^{-6}$  mm Hg, температура электронов равна  $\sim 10$  eV) составляет величину  $\sim 700$  s $^{-1}$ .

С учетом этой поправки были рассчитаны и построены зависимости времени жизни плазмы  $\tau_n$  от величины барьерного магнитного поля  $B_b$  для режимов № 1, 2, 3. Полученные кривые представлены на рисунке, *b*.



Зависимость времени удержания  $\tau_p$  (a) и  $\tau_n$  (b) от величины барьерного магнитного поля  $B_b$ : 1, 2, 3 — режим № 1, 2, 3 соответственно.

При концентрации плазмы  $n = 1 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$  и ниже (т.е. для режимов № 1 и 2) учет процесса ионообразования приводит к тому, что значение времени жизни плазмы  $\tau_n$  заметно уменьшается по сравнению со временем  $\tau_p$ . Несмотря на это, как  $\tau_p$ , так и  $\tau_n$  увеличиваются нелинейно с ростом магнитного поля именно для этих режимов в данном диапазоне барьерного магнитного поля.

Для режимов с концентрацией выше, чем  $1 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$  (режим № 3), влияние процесса ионообразования сказывается значительно меньше и время  $\tau_p$  мало отличается от времени  $\tau_n$ . Время удержания для этого режима в данном диапазоне барьерного поля практически пропорционально величине магнитного поля.

С другой стороны, согласно полученным экспериментальным данным (см. рисунок), времена удержания увеличиваются при уменьшении концентрации плазмы.

Эти установленные экспериментально для ловушек-галатей факты, а именно: нелинейный рост времени удержания с ростом величины магнитного поля и увеличение времени удержания при уменьшении концентрации плазмы, свидетельствуют о том, что диффузия в исследуемой ловушке близка к столкновительной. Заметим, что близкая к линейной зависимость времени удержания плазмы от величины магнитного поля, наблюдаемая при больших плотностях, по-видимому, связана со спецификой этих ловушек, в которых имеется только пологидальное магнитное поле весьма сложной конфигурации, и имеются державки миксин — элементы конструкции, пересекающие силовые линии магнитного поля [5]. Возможно также, что зависимость  $\tau_n$  от магнитного поля для режима № 3 при большом коэффициенте диффузии и магнитных полях от 0.05 до 0.15 Т представляет собой слабо растущий участок параболической зависимости.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ТРИНИТИ В.И. Васильеву и В.М. Струнникову за ценные советы и обсуждение результатов экспериментов.

Работа выполнена в рамках госконтрактов № 24-05-07 и 281-2008 с ГОУ МИФИ и № П957 с ФАО.

## Список литературы

- [1] Морозов А.И., Бугрова А.И., Бишаев А.М., Липатов А.С., Козинцева М.В. // ЖТФ. 2007. Т. 77. В. 12. С. 15–20.
- [2] Морозов А.И., Бугрова А.И., Бишаев А.М., Липатов А.С., Козинцева М.В. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 21. С. 50–55.
- [3] Бишаев А.М., Бугрова А.И., Морозов А.И., Козинцева М.В., Липатов А.С. и др. // Тез. докл. XXXV Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС. Звенигород, 2008. С. 63.
- [4] Кузнецов Э.И., Щеглов Д.А. Методы диагностики высокотемпературной плазмы. М.: Атомиздат, 1974. 101 с.
- [5] Морозов А.И., Бугрова А.И., Бишаев А.М., Козинцева М.В., Липатов А.С., Васильев В.И., Струнников В.М. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 3. С. 195–206.