

## ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 533.9.07

### РАДИАЛЬНЫЙ ИНЖЕКТОР ПЛАЗМЫ В ПРОБКОТРОН

© 1997 г. Г. И. Димов, А. А. Кабанцев, С. Ю. Таскаев

ГНЦ РФ "Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН"

Россия, 630090, Новосибирск, просп. Лаврентьева, 11

Поступила в редакцию 30.10.96 г.

Описывается источник плазмы и новый метод заполнения магнитной ловушки плазмой. Приводятся результаты экспериментов по генерации мишенной плазмы.

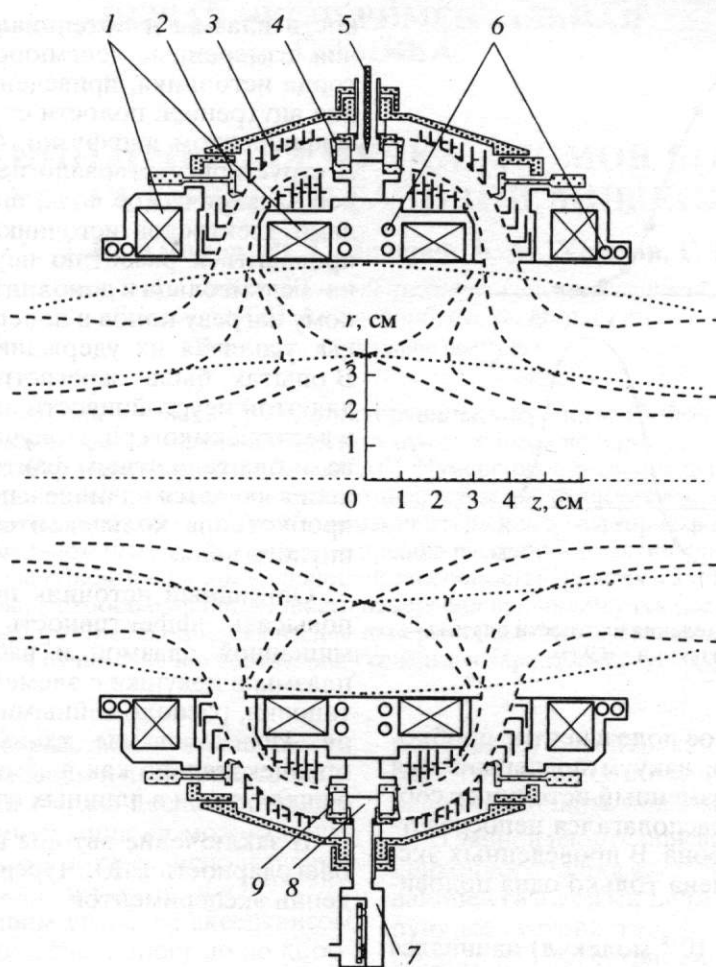
Для получения горячей плазмы в открытых магнитных системах традиционными способами ловушка предварительно заполняется относительно холодной мишенной плазмой, которая затем облучается атомарными пучками или в.ч.-излучением. Обычно для создания мишенной плазмы используется газоразрядный источник плазмы, расположенный вне ловушки, и в ловушку плазма втекает вдоль силовых линий магнитного поля. Очевидны недостатки, связанные с противоречием между необходимостью располагать источник как можно дальше от ловушки (или в более слабом магнитном поле) для уменьшения потока основной высокотемпературной плазмы на него и стремлением повысить эффективность использования источника, которая резко уменьшается с удалением от ловушки из-за заполнения плазмой паразитного объема между ловушкой и источником, а также вследствие развивающихся неустойчивостей в неоднородном транспортирующем магнитном поле.

В данной работе описан новый метод заполнения магнитных ловушек мишенной плазмой, суть которого состоит в непосредственном заполнении ловушки плазмой из кольцевого газоразрядного источника, охватывающего среднюю часть ловушки, в измененном (инжекционном) магнитном поле с последующим быстрым возвратом к начальной геометрии поля. Инжекционная геометрия поля такова, что ввод струи плазмы в ней можно назвать "радиальным". Однако этот метод не является методом поперечного ввода плазмы, когда инжекция плотного плазменного сгустка поперек магнитного поля происходит в результате возникновения поляризационного электрического поля [1]. Использовать метод предполагается для получения мишенной плазмы в центральном солениоде амбиполярной адиабатической ловушки АМБАЛ-М, эксперименты проводились на установке МАЛ (малая адиабатическая ловушка), применительно к геометрии которой и был сконструирован источник плазмы (рис. 1). Инжекционное магнитное поле создается с помощью че-

тырех катушек 1. Силовые линии магнитного поля пробкотрона показаны на рисунке пунктирными линиями, а измененные включением катушек источника – штриховыми. Вне области создания мишенной плазмы установлен дуговой источник плазмы с кольцевой геометрией разрядного канала. Источник состоит из двух частей, симметричных относительно центральной плоскости пробкотрона. Разрядный канал, ограниченный изолированными диафрагмами 3, повторяет форму силовых линий инжекционного магнитного поля. Начальный разряд поджигается между кольцевым катодом из дюралюминия 4 и медным электродом 5, расположенным внутри полости катода 8. Начальный разряд, проникающий в камеру через сквозные отверстия 9, позволяет поджечь основной разряд между катодом и анодом 2 одновременно в обеих частях источника. Получаемая в разряде плазма стекает вдоль силовых линий магнитного поля и заполняет ловушку. Затем ток в катушках источника быстро выключается, и магнитное поле возвращается к первоначальной невозмущенной геометрии.

Основные трудности реализации метода связаны с выполнением следующих условий: время возвращения к начальной геометрии магнитного поля должно быть меньше времени жизни плазмы в ловушке; важно сохранить газовые условия в ловушке после предварительного напуска газа в источник.

Катушки 1, создающие магнитное поле, питаются током от LC-линии. Для быстрого выключения тока в катушках использовалось встречное включение близко расположенных катушек. При собственной индуктивности каждой катушки 18 мкГн суммарная индуктивность при параллельном подключении всех четырех катушек составила  $L = 3$  мкГн. При необходимой величине тока  $I = 10$  кА и напряжении на емкостях несколько киловольт время выключения  $\tau = \sqrt{LC} = LI/U \approx 10$  мкс, что значительно меньше характерного времени (порядка миллисекунды) жизни плазмы в пробкотроне.



**Рис. 1.** Схема "радиального" источника плазмы. 1 – катушки магнитного поля, 2 – анод, 3 – диафрагмы, 4 – катод, 5 – электрод поджига, 6 – трубки охлаждения, 7 – клапан, 8 – газораспределительная полость катода, 9 – отверстия для напуска газа в разрядные каналы. Также показаны невозмущенные силовые линии (пунктир) магнитного поля пробкотрона и силовые линии (штриховые), измененные включением катушек источника.

Поскольку газ в источник должен напускаться заблаговременно, то для создания наилучших газовых условий желательно располагать затворы как можно ближе к разрядному каналу источника. По этой причине использование традиционных затворов (электромагнитных или электродинамических) невозможно из-за сильного магнитного поля в месте расположения источника, и в качестве затворов были выбраны пьезокерамические клапаны, на работу которых магнитное поле влияния не оказывает. Для формирования азимутально однородного разряда водород в кольцевую полость катода напускался через четыре клапана, равномерно расположенные по внешнему обводу катода.

Конструкция пьезокерамического клапана традиционна. Пьезокерамической пластиной с уплотнительной резинкой плотно закрыто выходное отверстие объема, в котором находился газ под давлением до 10 атм. Клапан открывался при подаче

на пластину напряжения. Экспериментально обнаружено, что при быстром изменении магнитного поля из-за сопутствующих механических вибраций клапаны могут самопроизвольно открываться, давая нежелательный напуск газа. Для устранения этого длительность импульса напряжения, открывающего клапан, устанавливалась равной половине периода собственных колебаний пьезокерамической пластины (1.1 мс) и в схему открывания клапана было добавлено постоянное запирающее напряжение.

При конструировании механических частей источника учитывали силы (до  $2 \cdot 10^4$  Н), возникающие в переменном магнитном поле, а также нагрев катушек ( $3^\circ\text{C}$  за выстрел). Для оперативного доступа к разрядному каналу применен байонетный разъем, позволяющий легко отделить внешние катушки.

Аксиально-симметричный пробкотрон МАЛ имеет пробочное отношение 2, расстояние между



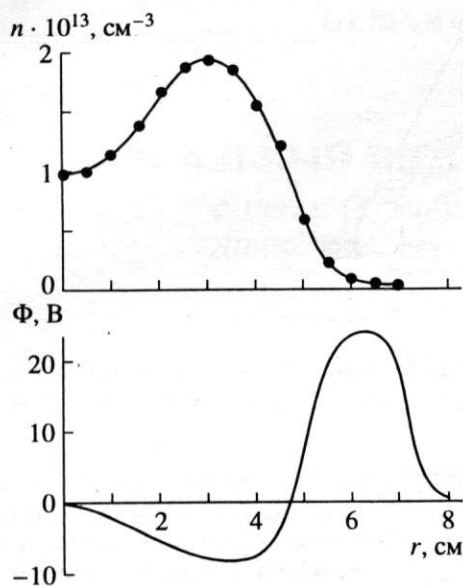


Рис. 2. Радиальные распределения плотности плазмы (вверху) и потенциала (внизу) при  $z = 9$  см.

пробками 40 см, магнитное поле в центре пробкотрона 6 кГс. Начальный вакуум поддерживался на уровне  $10^{-6}$  Торр. Плазменный источник с собственными катушками располагался непосредственно в центре пробкотрона. В проведенных экспериментах была включена только одна половина источника плазмы.

Напуск водорода ( $6 \cdot 10^{18}$  молекул) начинался за 2 мс до поджига. Длительность дугового разряда 600 мкс; напряжение на разряде 150 В; ток дуги до 3 кА. Генерируемая одной половиной источника плазма имела следующие параметры: поток 500 А, плотность до  $2 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$ , электронная температура 16 эВ. Радиальные распределения плот-

ности плазмы и потенциала на стадии заполнения, измеренные ленгмюровским зондом вблизи торца источника, приведены на рис. 2. Заполнение внутренней полости струи происходило с коэффициентом диффузии, большим боровского. В струе присутствовало неравновесное радиальное электрическое поле, определяемое потенциалами электродов источника плазмы. Оно могло приводить к развитию неустойчивости Кельвина-Гельмгольца и дополнительному стохастическому нагреву ионов в поперечную степень свободы, усиливая их удержание в пробкотроне [2]. В опытах была зарегистрирована характерная для этой неустойчивости активность на частотах в десятки кГц. Получаемая плазма устойчива, и благоприятным фактором на стадии заполнения является наличие в центральной плоскости пробкотрона кольцевой области нулевого магнитного поля.

Описанный источник позволяет существенно повысить эффективность заполнения ловушки мишенной плазмой и избавиться от контакта плазмы в ловушке с элементами конструкции установки, расположенными вдоль магнитного поля. Использование таких источников плазмы привлекательно как в замкнутых магнитных ловушках, так и в длинных открытых.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность Е.Ю. Чурсину за помощь в проведении экспериментов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Asano S., Ihara M., Fukao M. // J. Phys. Soc. Japan. 1989. V. 58. P. 1265.
2. Кабанцев А.А., Таскаев С.Ю. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. С. 635.