

**Государственный научный центр  
Российской Федерации  
Институт ядерной физики  
им. Г.И. Будкера СО РАН**

**Г.И.Димов, А.А.Кабанцев, С.Ю.Таскаев**

**ИСТОЧНИК РАДИАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ ПЛАЗМЫ**

ИЯФ 96-75

Новосибирск

1996

УДК 533.9.07

## **ИСТОЧНИК РАДИАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ ПЛАЗМЫ**

**Г.И.Димов, А.А.Кабанцев, С.Ю.Таскаев**

*ГНЦ РФ «Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН»*

*630090 Новосибирск, Россия*

*В работе предложен новый метод заполнения магнитной ловушки плазмой, описывается созданный источник плазмы и приводятся результаты экспериментов по генерации мишенной плазмы.*

## **RADIAL INJECTION PLASMA SOURCE**

**Dimov G.I., Kabantsev A.A., Taskaev S.Yu.**

*Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russia*

*A new technique of filling of magnetic trap with plasma is proposed. The plasma source created is described, and the experimental results on target plasma generation are given.*

©ГНЦ РФ «Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН»

Традиционный сценарий получения горячей плазмы в открытых магнитных системах предусматривает предварительное заполнение ловушки относительно холодной мишенной плазмой, на которой впоследствии происходит захват инжектируемых атомарных пучков или ВЧ излучения. Обычно для создания мишенной плазмы используется газоразрядный источник плазмы, расположенный вне ловушки, и в ловушку плазма втекает вдоль силовых линий магнитного поля. Очевидные недостатки связаны с неразрешимым противоречием между желанием установить источник как можно дальше от ловушки (или в более слабое магнитное поле) для уменьшения потока основной высокотемпературной плазмы на источник и желанием повысить эффективность использования источника, которая резко уменьшается с удалением от ловушки из-за заполнения плазмой паразитного объёма между ловушкой и источником, а также вследствие развивающихся неустойчивостей в неоднородном транспортирующем магнитном поле.

В данной работе предложен и реализован новый метод заполнения магнитных ловушек мишенной плазмой. Суть метода состоит в непосредственном заполнении ловушки плазмой из кольцевого газоразрядного источника, охватывающего среднюю часть ловушки, в изменённом магнитном поле с последующим быстрым возвратом к начальной геометрии поля. Изменённая геометрия поля такова, что ввод струи плазмы в ней можно назвать “радиальным”. Этот метод не является методом поперечного ввода плазмы, когда инжекция плотного плазменного сгустка поперёк магнитного поля осуществляется из-за возникающего поляризационного электрического поля [1]. Идея метода будет более понятной при нижеследующем рассмотрении конструкции источника. Использовать этот метод предполагается для получения мишенной плазмы в центральном соленоиде амбиполярной адиабатической ловушки АМБАЛ-М.

Источник плазмы с радиальной инжекцией может быть также использован для заполнения мишенной плазмой и ловушек с замкнутой геометрией магнитного поля.

## Конструкция источника плазмы

Апробация этого метода создания мишенной плазмы была проведена на установке МАЛ (малая адиабатическая ловушка), и применительно к геометрии данной установки был сконструирован источник плазмы. Схема источника приведена на Рис. 1. С помощью 4-х катушек (1) изменяется топология магнитного поля. Силовые линии магнитного поля пробкотрона показаны на рисунке пунктирными линиями (а), а изменённые включением катушек источника — штриховыми (б). В изменённом магнитном поле вне области ожидаемого создания мишенной плазмы устанавливается 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 изменённого магнитного поля. Начальный разряд поджигается между кольцевым катодом из дюралюминия (4) и медным электродом (5), расположенным внутри полости катода (8). Начальный разряд через сквозные отверстия (9) позволяет в обеих частях источника одновременно поджечь основной разряд между катодом и анодом (2). Получаемая в разряде плазма стекает вдоль силовых линий магнитного поля и заполняет ловушку. Затем быстро выключается ток в катушках источника, и магнитное поле возвращается к первоначальной невозмущённой геометрии.

Основные трудности реализации данного метода следующие. Необходимо вернуться к начальной геометрии магнитного поля за время, меньшее времени жизни плазмы в ловушке. Также важно не испортить катастрофически газовые условия в

ловушке предварительным напуском газа в источник. В описываемом источнике эти трудности преодолены.

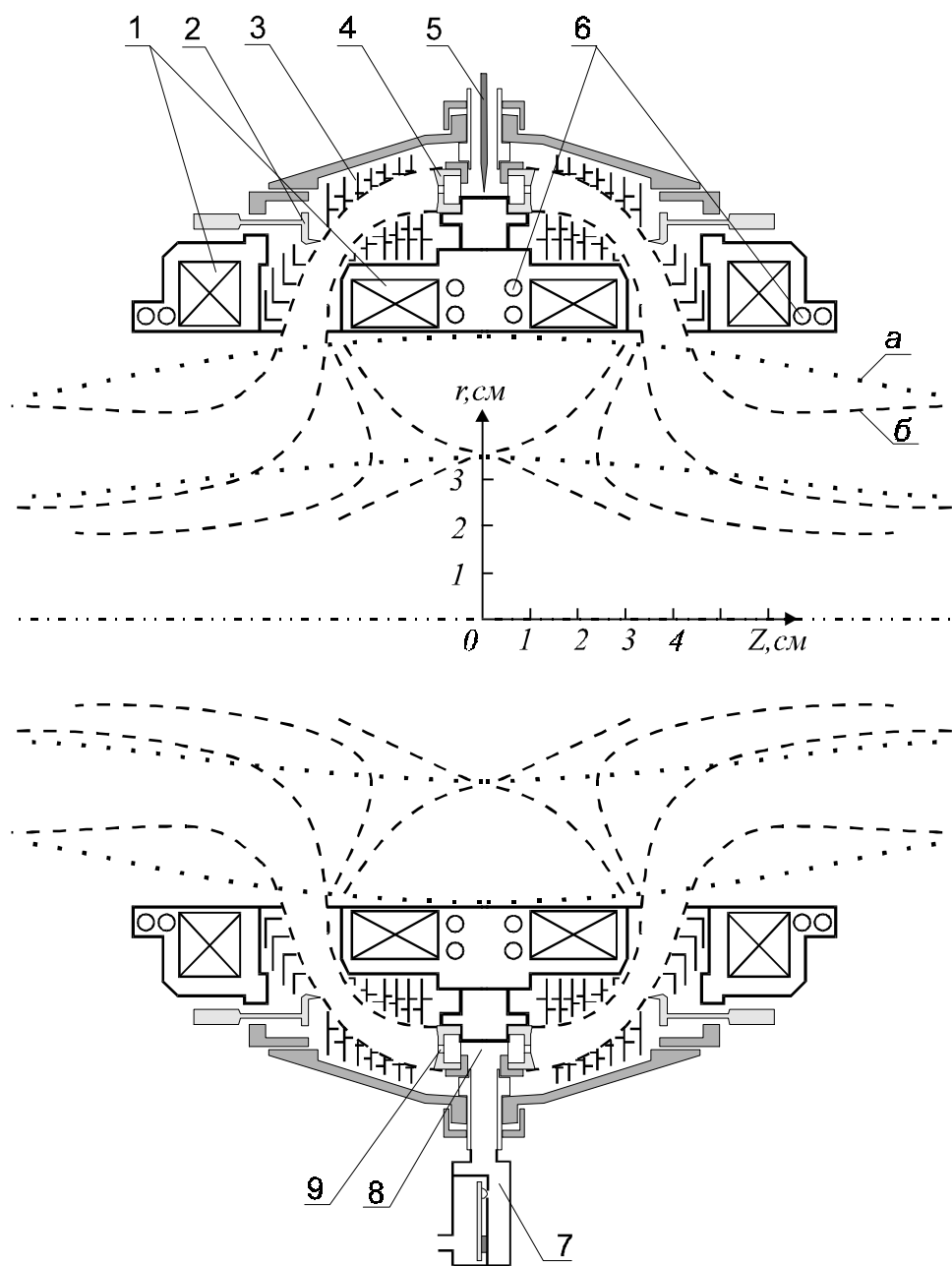


Рис. 1. Схема “радиального” источника плазмы. 1 — катушки магнитного поля, 2 — анод, 3 — диафрагмы, 4 — катод, 5 — поджиговый электрод, 6 — трубки охлаждения, 7 — клапан, 8 — газораспределительная полость катода, 9 — отверстия для напуска газа в разрядные каналы. Также показаны невозмущённые силовые линии магнитного поля пробкотрона (а) и силовые линии, изменённые включением катушек источника (б).

Питание катушек источника производилось от  $LC$ -линии. Для быстрого выключения тока в катушках использовалось встречное включение близко расположенных катушек. Так, при собственной индуктивности каждой катушки  $18 \text{ мкГн}$ , суммарная индуктивность при параллельном подключении всех четырёх катушек оказалась равной  $L = 3 \text{ мкГн}$ . Тогда время выключения  $\tau_{off} = \sqrt{LC} = \frac{L I}{U}$  при необходимой величине тока  $I = 10 \text{ кА}$  и возможном напряжении зарядки емкостей в несколько киловольт получается порядка  $10 \text{ мкс}$ , что значительно меньше времени жизни плазмы в пробкотроне, характерная величина которого порядка миллисекунды.

При выборе затвора для напуска газа в источник учитывалось следующее. Поскольку газ в источник напускается заблаговременно, то для создания лучших газовых условий желательно расположить затворы как можно ближе к разрядному каналу источника. По этой причине использование таких традиционных затворов, как электромагнитные или электродинамические, невозможно из-за сильного магнитного поля в месте расположения источника. Как следствие, в качестве затворов были выбраны пьезокерамические клапаны, на работу которых не оказывает влияние магнитное поле. Для формирования азимутально однородного разряда напуск водорода в кольцевую полость катода производится из четырех клапанов, равномерно распределённых по внешнему обводу катода.

Схема пьезокерамического клапана стандартна. Пьезокерамическая пластина с уплотнительной резинкой плотно закрывает выходное отверстие объёма, в котором находится газ под давлением до  $10 \text{ атм}$ . При подаче на пластинку необходимого напряжения вследствие механической деформации происходит открытие выходного отверстия и напуск газа в источник. Экспериментально было обнаружено, что при

быстром изменении магнитного поля из-за механических вибраций клапаны могут самопроизвольно открываться, давая нежелательный напуск газа. Для устранения влияния вибрации длительность открывающего импульса напряжения устанавливалась равной половине периода собственных колебаний пьезокерамической пластинки ( $1,1 \text{ мс}$ ) и в схеме питания клапана было добавлено подпирющее пластинку напряжение.

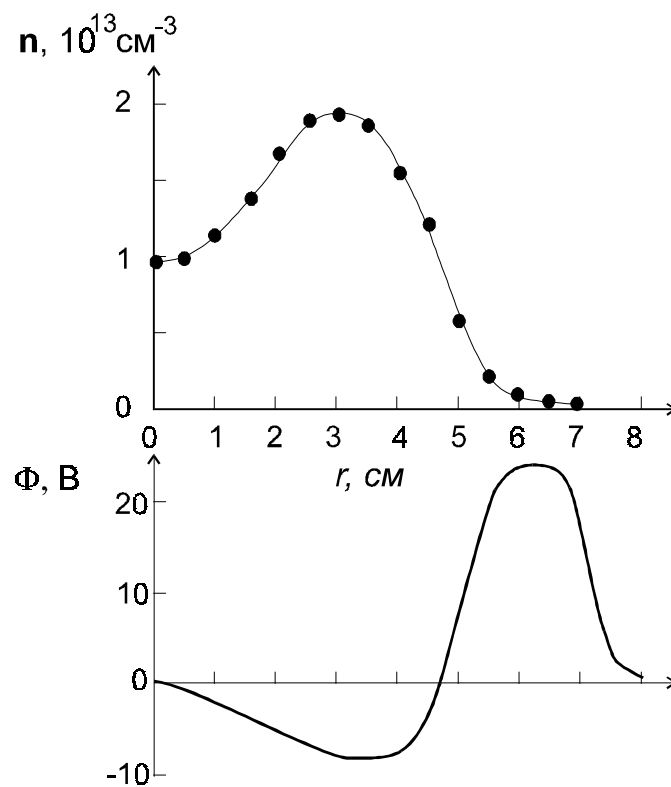
При конструировании источника учитывали возникающие силы (до  $2 \cdot 10^4 \text{ Н}$ ), нагрев катушек ( $3^\circ$  за выстрел). Для оперативного доступа к разрядному каналу применён байонетный разъём, позволяющий легко отделить внешние катушки.

## **Первые экспериментальные результаты**

Эксперименты проведены на аксиально-симметричном пробкотроне МАЛ. Пробочное отношение — 2, расстояние между пробками —  $40 \text{ см}$ , магнитное поле в центре пробкотрона —  $6 \text{ кГс}$ . Начальный вакуум поддерживался на уровне  $10^{-6} \text{ Торр}$ . Плазменный источник с собственными катушками располагался непосредственно в центре пробкотрона. В проведённых экспериментах была включена только одна половина источника плазмы.

Напуск водорода ( $6 \cdot 10^{18}$  молекул) начинается за  $2 \text{ мс}$  до поджига. Длительность дугового разряда —  $600 \text{ мкс}$ . Напряжение на разряде  $150 \text{ В}$ . Ток дуги — до  $3 \text{ кА}$ . Генерируемая одной половиной источника плазма характеризуется следующими параметрами: поток —  $500 \text{ А}$ , плотность — до  $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , электронная температура —  $16 \text{ эВ}$ . Радиальные распределения плотности плазмы и потенциала на стадии заполнения, измеренные ленгмюровским зондом вблизи торца источника, приведены на Рис. 2. Заполнение внутренней полости струи происходит с коэффициентом

диффузии, большим боровского. В струе присутствует неравновесное радиальное электрическое поле, определяемое потенциалами электродов источника плазмы, которое может приводить к развитию неустойчивости Кельвина-Гельмгольца и дополнительному стохастическому нагреву ионов в поперечную степень свободы, улучшая их удержание в пробкотроне [2]. Регистрируется характерная для данной неустойчивости активность на частотах в десятки килогерц. Получаемая плазма МГД устойчива, и здесь благоприятным фактором на стадии заполнения является наличие в центральной плоскости пробкотрона кольцевой области нулевого магнитного поля.



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



## Заключение

Предложен новый метод заполнения магнитной ловушки мишенной плазмой. Заполнение происходит с помощью газоразрядного источника, установленного непосредственно в ловушке (в её средней части на периферии) и работающего в изменённой дополнительными катушками топологии магнитного поля. Последующий возврат к начальной топологии магнитного поля осуществляется за время, существенно меньшее времени жизни плазмы в ловушке.

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

В работе описывается конструкция источника плазмы и приводятся первые экспериментальные результаты по заполнению ловушки плазмой.

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

## Литература

- [1]. Asano S., Ihara M., Fukao M. *J. Phys. Soc. Japan*, **58** (1989) 1265.
- [2]. Кабанцев А.А., Таскаев С.Ю. *Физика плазмы*, **18** (1992) 635.