

# ИНЖЕКЦИЯ ПЛАЗМЫ ИЗ НЕЗАВИСИМОГО СВЧ ИСТОЧНИКА В ОТКРЫТУЮ МАГНИТНУЮ ЛОВУШКУ II. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПРОБОЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ

*З.Р.Берия, Г.Е.Гогиашвили, С.И.Нанобашвили*

Настоящая работа является продолжением работы [1]. Ее целью было изучение характеристик и свойств плазмы, инжектируемой из независимого стационарного СВЧ источника [2] в открытую магнитную ловушку пробочной геометрии в широких пределах изменения условий эксперимента. Исследования основывались в основном на измерении распределения заряженных частиц в плазме вдоль ловушки и зависимости концентрации от условий образования плазмы в СВЧ источнике.

Подробное описание экспериментальной установки было приведено в работе [1]. Принципиальная схема установки представлена на рис. 1. Плазма создавалась в режиме ЭЦР на частоте 2400 МГц (подводимая мощность до 150 Вт) в сильно неоднородном магнитном поле независимого СВЧ источника плазмы 1, который располагался вдали от ловушки и расстояние между которыми можно было менять в широких пределах ( $l = 30 \div 80$  см). Формирование плазмы в источнике осуществлялось в кварцевом баллоне с внутренним диаметром 2.6 и длиной 10 см, помещенном в прямоугольный волновод сечением  $7.2 \times 3.4$  см. Разрядная камера через диагностическую секцию подсоединялась к исследуемому объему 2, в которой и происходит инжекция плазмы. Исследуемый объем представляет собой стеклянный баллон с внутренним диаметром 4 и длиной 115 см, который размещается на оси соленоида 3. Соленоид состоит из 12 идентичных катушек, расположенных на двух каретках. Изменением расстояния между ними и соответствующими подключениями обмоток катушек можно было получать магнитное поле пробочной геометрии с регулируемым пробочным отношением в пределах от 1.07 до 2 и более. В данной работе приводятся результаты экспериментов, проведенных в основном при пробочном отношении, равном 1.7.

В описываемых экспериментах рабочим газом служил аргон при давлении  $10^{-4} - 5 \cdot 10^{-3}$  Тор. В этих условиях из СВЧ источника можно было получить плазму с регулируемой концентрацией от  $10^9$  до  $10^{12}$  см $^{-3}$  и температурой 3–8 эВ [2].

Для измерения концентрации и температуры плазмы в ловушке использовались двойные электрические зонды 4, введенные по оси в различные сечения баллона 2. Кроме того, в центральной области в трех сечениях введены по четыре двойных электрических зонда, размещенных на разном радиусе баллона, для определения распределения параметров плазмы.

На рис. 2 приведены характерные картины распределения концентрации плазмы вдоль ловушки для сравнительно низких давлений в случае однородного поля (кривая 1) и поля пробочной конфигурации (кривая 2). Как показывают оценки, в условиях наших экспериментов в ловушке при

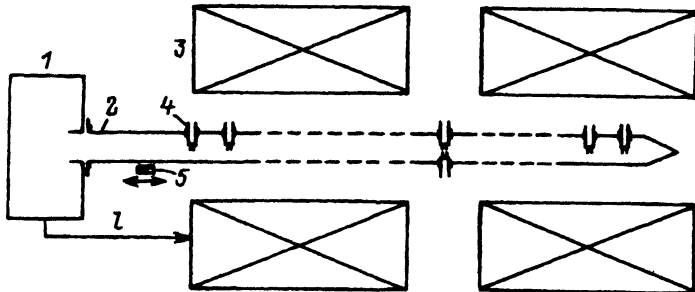


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — СВЧ источник плазмы, 2 — исследуемый объем, 3 — соленоид, 4 — двойные электрические зонды, 5 — полупроводниковый датчик света.

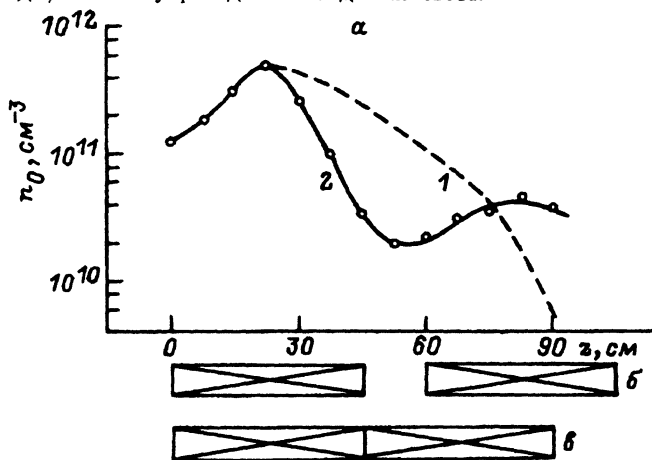


Рис. 2. Распределение концентрации плазмы вдоль ловушки в однородном магнитном поле (1) и в поле пробочной конфигурации (2) при  $p = 7 \cdot 10^{-4}$  Тор и  $H_{\text{max}} = 400 \text{ Э}$  (а) и положение катушек соленоида в случаях пробочной (б) и однородной полей (в).

давлении рабочего газа  $p < 10^{-3}$  Тор длина свободного пробега заряженных частиц больше длины неоднородности и пробки оказывают существенное влияние на удержание заряженных частиц, что хорошо видно из этого рисунка. В начальной части ловушки продольное распределение концентрации плазмы как в однородном поле, так и в поле пробочной конфигурации одинаковое. Это естественно, так как в этой части ловушки в обоих случаях распределение магнитного поля одинаковое, а величины поля в пробке и в однородной части (при однородном поле) равны. При увеличении расстояния концентрация плазмы в случае пробочной конфигурации падает быстрее, чем в однородном поле, что, очевидно, связано с уменьшением магнитного поля к центру ловушки, приводящим к увеличению поперечной диффузии частиц и диаметра плазмы. Далее, в области второй пробки уменьшение концентрации плазмы прекращается и даже наблюдается некоторое ее увеличение. В свою очередь это связано с эффективным удержанием плазмы пробками и сжатием плазменного шнура. Сжатие плазменного шнура в

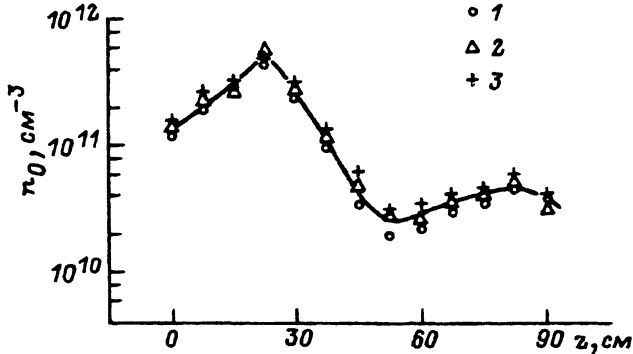


Рис. 3. Распределение концентрации плазмы вдоль ловушки при значениях магнитного поля в пробке, равных 400 (1), 1000 (2), 1600 Э (3) и  $p = 7 \cdot 10^{-4}$  Тор.

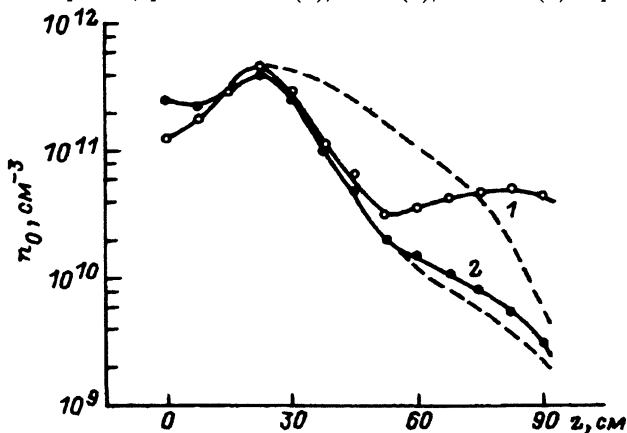


Рис. 4. Распределение концентрации плазмы вдоль ловушки в однородном магнитном поле (штриховые кривые) и в поле пробочной конфигурации (сплошные кривые) при давлениях нейтрального газа, равных  $7 \cdot 10^{-4}$  (1),  $2 \cdot 10^{-3}$  Тор (2) и  $H_{\max} = 1000$  Э.

области пробок хорошо регистрируется по световому излучению плазмы.

При низких давлениях увеличение магнитного поля в пробках, так же как и в случае однородного поля [1], практически не влияет на характер распределения концентрации вдоль ловушки, оно приводит лишь к его незначительному увеличению. Это хорошо показано на рис. 3. К аналогичному эффекту приводит и увеличение вводимой в плазму СВЧ мощности.

Что касается изменения давления рабочего газа, то в области давлений порядка  $10^{-3}$  Тор происходит качественное изменение распределения концентрации вдоль ловушки. Как указывалось выше, из оценок следует, что при давлениях  $p > 10^{-3}$  Тор длина свободного пробега заряженных частиц меньше длины области неоднородности и пробки не должны влиять на удержание частиц, тогда как при низких давлениях ( $p < 10^{-3}$  Тор) длина свободного пробега заряженных частиц становится больше длины области неоднородности и пробки должны эффективно удерживать плазму в ловушке. Действительно, как видно из рис. 4, при давлении ра-

бочого газа  $p = 2 \cdot 10^{-3}$  Тор (кривая 2) Тор (кривая 2) распределения вдоль ловушки как в случае пробочного поля, так и в однородном поле практически одинаковое, тогда как при давлении  $p = 7 \cdot 10^{-4}$  Тор (кривая 1) они существенно различаются, а именно пробки по сравнению с однородным полем эффективно удерживают плазму в ловушке.

Измерения в различных условиях экспериментов как продольного, так и радиального распределений концентрации плазмы в ловушке дали возможность определить среднюю по объему баллона концентрацию плазмы. Оказалось, что она практически не зависит от пробочного отношения при его изменении в пределах 1.07–1.7, что находится в согласии с данными работы [3].

Что касается измерения с помощью двойных зондов флуктуации плотности плазмы в ловушке, то оказалось, что, как и в однородном магнитном поле [1], практически во всем исследовавшемся диапазоне условий наблюдались колебания концентрации на довольно низком уровне с частотой 50–100 кГц.

Приведенные выше результаты получены для расстояния между СВЧ источником плазмы и ловушкой  $l = 30$  см. Как показали эксперименты, увеличение этого расстояния вплоть до 80 см, как и в случае однородного поля [1], практически не влияет на эффективность заполнения ловушки плазмой.

Таким образом, совокупность экспериментальных данных дает возможность заключить, что независимый СВЧ источник плазмы успешно можно использовать для заполнения спокойной плазмой открытой магнитной ловушки пробочной конфигурации.

#### Список литературы

- [1] Берия З.Р., Гогиашвили Г.Е., Нанобашвили С.И. // ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 7. С. 000.
- [2] Гогиашвили Г.Е., Нанобашвили С.И., Ростомашвили Г.И. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 9. С. 1746–1750.
- [3] Будников В.Н., Виноградов Н.И., Голант В.Е. // ЖТФ. 1967. Т. 37. Вып. 5. С. 861–867.

Институт физики  
Тбилиси

Поступило в Редакцию  
11 декабря 1991 г.