

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ВЧ-ИСТОЧНИКОВ ИОНОВ

**В.И.Возный<sup>1</sup>, В.И. Мирошниченко<sup>1</sup>, С.Н.Мордик<sup>1</sup>, В.Е.Сторижко<sup>1</sup>, Д.П.Шульга<sup>1</sup>, Б.Сулкио-Клефф<sup>2</sup>**

<sup>1) Институт прикладной физики НАН Украины, Сумы, Украина, [voznu@ipflab.sumy.ua](mailto:voznu@ipflab.sumy.ua)  
<sup>2) Institute of Nuclear Physics, University of Münster, Münster, Germany</sup></sup>

Разработана экспериментальная установка, позволяющая производить экспрессные измерения полного тока, профиля, массового состава и эмиттанса пучка ВЧ-источников ионов. Реализован индуктивный ВЧ-разряд с внешним магнитным полем (~60 Гс) при 80 Вт вводимой в плазму ВЧ-мощности ( $f_{\text{ВЧ}}=27.12$  МГц). Плотность ионного тока составляла величину  $20 \text{ мА/см}^2$  при диаметре эмиссионного отверстия 0.6 мм. Для реализации режимов работы ВЧ-источника с плотностью плазмы на уровне  $6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$  разработана и изготовлена компактная магнитная система с постоянными магнитами (NdFeB) и ферритами кольцевой формы. Реализованы высокояркоостные режимы ВЧ-источника аргонового пучка  $B_n = 5 \cdot 10^{12} \text{ А м}^{-2} \cdot \text{рад}^{-2}$ .

### ВВЕДЕНИЕ

Для повышения разрешающей способности сканирующего ядерного микронзонда (ЯМЗ) следует использовать источники ионов с наибольшей яркостью. ВЧ-источник ионов является одним из наиболее перспективных для использования в ЯМЗ. Данный тип источника ионов имеет целый ряд достоинств: значительный срок службы (более 1000 часов), стабильность ионно-оптических параметров, высокую степень ионизации газа, компактность, достаточно большой ионный ток (1...100 мкА) и высокую яркость ( $B_n \sim 10^9 - 2 \cdot 10^{10} \text{ Ам}^{-2} \cdot \text{рад}^{-2}$ ).

Теоретический предел яркости плазменных ионных источников при известных  $T_e, T_i$  и  $n_i$  приводится в работе [1]:

$$B_n = \frac{I}{(\pi \varepsilon n)^2} = A n_i \frac{\sqrt{T_e}}{T_i}, \quad (1)$$

где  $B_n$  - нормализованная яркость плазменного источника ионов,  $n_i$  - плотность плазмы;  $T_e$  - температура электронов,  $T_i$  - температура ионов,  $A$  - нормировочный коэффициент.

Таким образом, высокояркоостные плазменные ионные источники должны иметь плазму с высокой ионной плотностью и высокой электронной температурой. В то же время ионная температура должна быть низкой, чтобы получать ионные пучки с малым разбросом по импульсу, и малым эмиттансом.

ВЧ-источники ионов, работающие в E - режиме (емкостной ВЧ-разряд) имеют плотность плазмы  $n \sim 10^9 \dots 10^{10} \text{ см}^{-3}$ , в H - режиме (индуктивный ВЧ-разряд) - плотность  $n \sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$ . Для сравнения ВЧ-источники плазмы с магнитным полем, работающие в W - режиме (индуктивный ВЧ-разряд с магнитным полем), имеют плотность плазмы  $n \sim 10^{12} \dots 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  [2-4].

Теоретический предел яркости аргонового пучка при плотности плазмы  $n \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , температурах электронов  $T_e \sim 5 \text{ эВ}$  и ионов  $T_i \sim 0.1 \text{ эВ}$  будет равен  $B_n \sim 0.8 \cdot 10^{14} \text{ Ам}^{-2} \cdot \text{рад}^{-2}$  [5].

Данная величина яркости может быть сравнима с величиной яркости жидкометаллических источников ионов  $B_n \sim 10^{14} \text{ Ам}^{-2} \cdot \text{рад}^{-2}$  [6].

Для исследования различных режимов ВЧ-источников с целью повышения яркости возникает необходимость в создании специализированной установки. В ИПФ НАН Украины разработана и изготовлена экспериментальная установка, позволяющая производить экспрессные измерения тока, профиля тока, массового состава пучка и эмиттанса пучка ионов, извлекаемого из ВЧ-источника. В данной работе приведено описание установки и представлены некоторые результаты измерений основных параметров ВЧ-источника ионов.

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Установка тестирования ВЧ-источников ионов (рис.1) состоит из следующих основных частей и систем:

- ВЧ-источник ионов: газоразрядная колба (1), вытягивающий (3) и фокусирующий (4) электроды;
- высоковольтные блоки питания (5) на 3.0 кВ и 20 кВ;
- система напуска газа (6);
- ВЧ-система: генератор синусоидальных колебаний (8) с частотой 27.12 МГц и мощностью 50 Вт, ВЧ-усилитель (25) с выходной мощностью до 800 Вт, измеритель прямой и отраженной мощности (10), система согласования (9), ВЧ-антенна (7);
- диагностические вакуумные камеры (12, 13); вакуумная система: турбомолекулярный (15), диффузионный (16) и форвакуумные насосы;
- масс-сепаратор: фильтр Вина (14);
- система диагностики пучка: объектная диафрагма (17), цилиндры Фарадея (18, 22);
- эмиттансометр (19-21);
- система сбора и обработки данных (23, 24).

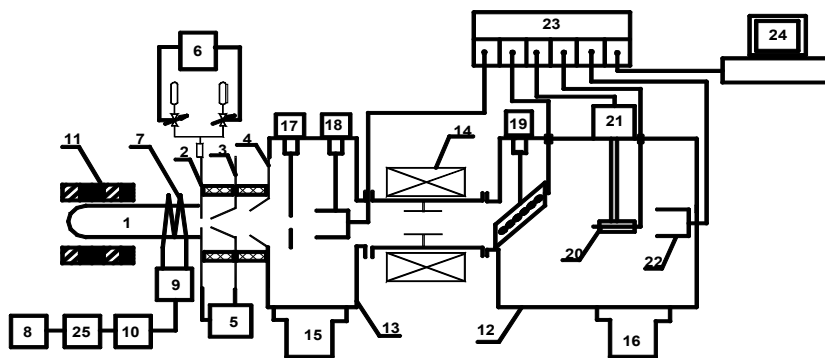


Рис.1. Схема экспериментальной установки

## ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА И СИСТЕМА НАПУСКА ГАЗА

Диагностические вакуумные камеры (12,13) установлены на горизонтальной металлической подставке и соединены между собой ионопроводом. Ионный источник присоединяется к диагностической камере (13), имеющей размеры 200×200×200 мм. Камера откачивается турбомолекулярным насосом (Leybold-350, скорость откачки 350 л/с), работающем в паре с ротационным насосом. Предельный вакуум в камере – около  $5 \cdot 10^{-6}$  Торр. В камере производится визуализация пучка на кварцевую пластину и измеряется полный ток пучка с помощью цилиндра Фарадея (18) на расстоянии 140 мм от системы вытягивания источника.

Диагностическая камера (12), в которой производится измерение профиля и эмиттанса пучка откачивается диффузионным насосом (Varian, скорость откачки 900 л/сек), обеспечивающим предельный вакуум порядка  $3 \cdot 10^{-6}$  Торр. Предварительный вакуум в камере создается форвакуумным насосом.

Система напуска газа (6) в ионный источник состоит из трех баллонов с рабочим газом (водород,

гелий, аргон), соединенных с общей газовой емкостью. Скорость напуска газа регулируется в широких пределах ( $0.1 \dots 50$  атм·см<sup>3</sup>/ч) с помощью системы напуска газа СНА-2 («Selmi»).

## ВЧ-СИСТЕМА

В традиционных индуктивных ВЧ-источниках ионов для создания разряда обычно используется ВЧ-генератор с самовозбуждением (автогенератор). При этом антенна источника является элементом LC-контура генератора и определяет частоту генерации, которая выбирается в пределах 10-100 МГц. При изменении мощности генератора изменяются параметры разряда. Так как разряд индуктивно связан с антенной, то изменяется и частота генерации. При измерениях уровня вводимой в разряд мощности необходимо, чтобы частота не зависела от уровня ВЧ-мощности. Это реализуется в ВЧ-системе, широко применяемой в ВЧ-плазменных технологических экспериментах, когда работа вводится на разрешенной и стабильной частоте (13.56 или 27.12 МГц).

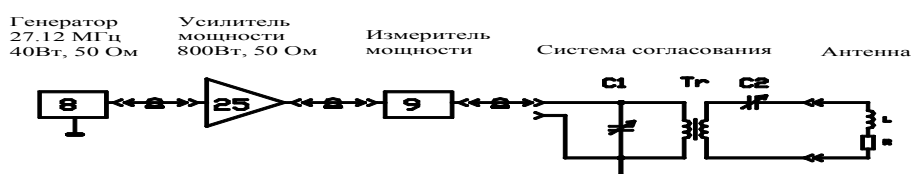


Рис.2 Блок-схема ВЧ-системы

ВЧ-система (рис.2) состоит из генератора (8) синусоидальных колебаний частотой 27.12 МГц с регулируемой мощностью до 40 Вт. Генератор соединен с усилителем мощности (25) «Аcom-1000», обеспечивающим выходную мощность до 800 Вт в непрерывном режиме. Система согласования (9)

позволяет согласовывать выходное сопротивление усилителя (50 Ом) с очень малым (порядка 1...4 Ом) активным сопротивлением антенны. Система согласования (рис. ) представляет собой  $\pi$ -схему и состоит из нагрузочного конденсатора (C1) и настроенного конденсатора (C2). Переменная емкость C1 состо-

ит из двух воздушных конденсаторов (5 кВ), соединенных параллельно, с общей максимальной емкостью 1000 пФ, а переменная емкость С2 - это два вакуумных 5 кВ конденсатора, соединенные параллельно, с общей максимальной емкостью 500 пФ. Так как антенна источника ионов может находиться под высоким напряжением вытягивания порядка 3 кВ, то необходимо обеспечить гальваническую развязку между антенной и усилителем. Для этого используется ВЧ-трансформатор с изоляцией между обмотками на напряжение до 10 кВ. Трансформатор представляет собой 50 Ом коаксиальный кабель (10 мм в диаметре и длиной около 70 см), оплетка которого используется как первичная обмотка, а внутренняя жила - как вторичная.

Конденсаторы и трансформатор системы согласования расположены внутри металлического бокса (300x250x250) с алюминиевыми стенками для экранирования от ВЧ-излучения.

Измеритель прямой и отраженной мощности включен между усилителем мощности и системой согласования. Вращением ручек конденсаторов С1 и С2 добиваются согласования сопротивлений, когда уровень отраженной от антенны мощности (реактивной) близок к нулю. В этом случае сопротивление нагрузки активно и прямая мощность является мощностью, вводимой в разряд.

### МАСС-СЕПАРАТОР

Измерение массового состава пучка ионов осуществляется с помощью фильтра Вина (ЕхВ анализатор). Фильтр Вина выполняет две основные функции: масс-сепарация и фильтрация по энергии. Фильтр Вина установлен между двумя диагностиче-

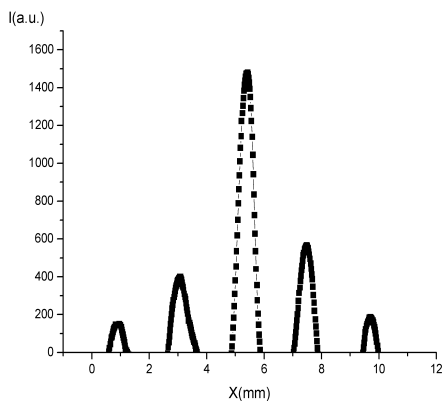


Рис. 3 Сигнал с эмиттансометра ВЧ-источника ионов

На установке была выполнена серия экспериментов по измерению параметров ВЧ-источника ионов ЭСУ. Общий вид источника показан на рис.4. Система вытягивания имеет следующие размеры: длина канала катода - 3 мм, диаметр канала - 0.6 мм. Разрядная колба изготовлена из стекла "Duran" и имеет наружный диаметр 30 мм и длину 260 мм. Длина колбы увеличена для возможности реализации геликонового разряда в сильном внешнем магнитном поле. Рабочие газы - аргон, гелий, водород.

скими камерами. Разрешающая способность данного устройства имеет величину  $M_i/\Delta M = 100$ . Данный прибор является классическим фильтром Вина с параллельными полюсами электромагнита. Расстояние между полюсами магнита равно 8 мм, между пластинами конденсатора - 3 мм. Эффективная длина электрического и магнитного поля - 100 мм.

### ЭМИТТАНСОМЕТР

Эмиттансометр состоит из металлической пластины, размером 50x30x0.5мм, и подвижного вертикального проволочного зонда. Пластина из нержавеющей стали имеет ряд горизонтальных отверстий диаметром 1 мм с расстояниями 2 мм между ними. Диаметр проволочного вольфрамового зонда равен 0.1мм. Расстояние между пластиной и зондом - 140мм. Зонд перемещается поперек пучка с определенной стабильной скоростью посредством управляемого электрического двигателя. Пластина с отверстиями может выводиться из зоны измерений, что позволяет производить измерения профиля тока пучка. Расстояние от ионного источника до зонда равно 1000 мм. Ток пучка в этой области измеряется цилиндром Фарадея (22). Сигнал с проволочного зонда (детектора) поступает на усилитель постоянного тока (У5-11). АЦП преобразовывает аналоговый сигнал в цифровой. Преобразованный сигнал поступает на персональный компьютер, где обрабатывается с помощью программ сбора и обработки данных. На рис.3 представлен сигнал с эмиттансометра для одного из режимов работы источника (газ - аргон, ВЧ-мощность - 20 Вт).

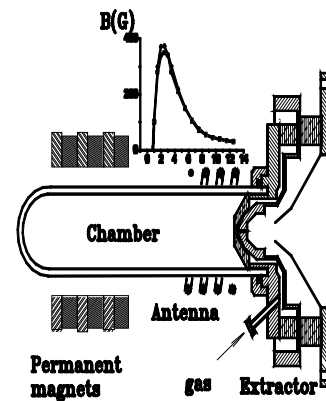


Рис. 4 ВЧ-источник ионов

В источнике использовалась винтовая антенна из 4 витков (медный провод диаметром 4 мм).

### Экспериментальные исследования ВЧ-источника ионов

В ВЧ-источнике ионов реализован индуктивный ВЧ-разряд с внешним магнитным полем (~60 Гс), с плотностью аргоновой плазмы  $6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$  при 80 Вт вводимой в плазму ВЧ-мощности ( $f_{\text{ВЧ}} = 27.12 \text{ МГц}$ ). Разработана и изготовлена компактная магнитная система с постоянными магнитами (NdFeB) и ферритами (600НН) кольцевой формы, позволяющая со-

здавать по всей длине ВЧ-антенны магнитное поле  $B_z \sim 60$  Гс. Величина магнитного поля в разрядной камере ВЧ-источника определяется позиционированием магнитной системы относительно ВЧ-антенны. Плотность плазмы оценивалась по формуле для величины эмиссионного тока. Плотность тока пучка аргона составляла величину  $20 \text{ mA/cm}^2$ . Нормализованная яркость пучка для данного оптимизированного режима работы источника ионов составляла величину  $B_n = 5 \cdot 10^{12} \text{ A m}^{-2} \text{ rad}^{-2}$ .

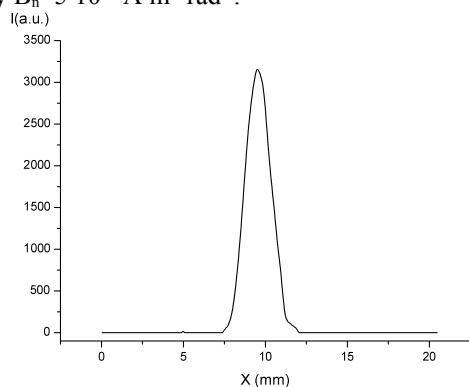


Рис.5. Профиль тока пучка ионов водорода

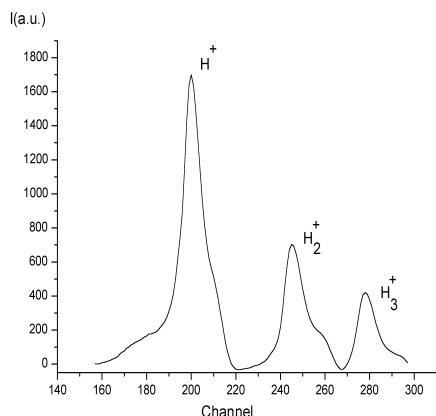


Рис.6. Массовый состав водородного пучка

На рис.5 представлен профиль тока пучка водорода, измеренный профилометром на расстоянии 1 м от эмиссионного отверстия источника при раз-

мере апертуры (17) 1 мм для 80 Вт вводимой в плазму ВЧ-мощности. Напряжение вытягивания равно 0.5 кВ, фокусирования – 14 кВ. По профилю тока пучка оценочная величина половинного угла расхождения составляла 1.6 мрад, что свидетельствует о достаточно высокой степени парааксильности пучка. Массовый спектр водородного пучка показан на рис.6.

## ВЫВОДЫ

Разработана и изготовлена экспериментальная установка, позволяющая производить экспрессные измерения полного тока, профиля, массового состава и эмиттанса пучка ВЧ-источника ионов. Проведено тестирование ВЧ-источника ионов (рабочий газ-водород, аргон) в режимах с магнитным и без магнитного поля при уровне вводимой в плазму ВЧ-мощности 80 Вт ( $f_{ВЧ} = 27.12$  МГц). Реализованы высокояркостные режимы ВЧ-источника аргонового пучка  $B_n = 5 \cdot 10^{12} \text{ A m}^{-2} \text{ rad}^{-2}$  с плотностью ионного тока  $20 \text{ mA/cm}^2$  при диаметре эмиссионного отверстия 0.6 мм.

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства образования и науки Украины (проект N2M71-2001) и BMBF (Германия), проект UKR 00/003.

## ЛИТЕРАТУРА

1. A. van Steenberg // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1965, p.745.
2. R.W. Boswell, R.K. Porteous // Appl. Phys. Lett. 1987, vol.50, p.1130.
3. F.F. Chen, I.D. Sudit, M. Light // Plasma Sources Sci. Technol. 1996, No.5 p.173.
4. K.P. Shamrai and V.B. Taranov // Plasma Phys. Control. Fusion 1994, vol.36, p.1717.
5. V.I. Miroshnichenko, S.M. Mordyk, V.V. Olshansky, K.N. Stepanov, V.E. Storizhko, B. Sulkio-Cleff and V. Voznyy // Nucl. Instr. And Meth. B201 (2003), p.630.
6. J. Swanson // Nucl. Instr. And Meth. 1983, vol.218, p.347.