

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Ордена Ленина Сибирское отделение
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера

А.А. Иванов, А.А. Подыминогин, И.В. Шиховцев

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ИОННЫЙ ИСТОЧНИК
С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ
ПРОТОНОВ В ПУЧКЕ

ИЯФ 2006-1

Новосибирск
2006

**Высокочастотный ионный источник
с повышенным содержанием протонов в пучке**

А.А. Иванов, А.А. Подыминогин, И.В. Шиховцев
Институт ядерной физики им. Будкера СО РАН
630090, Новосибирск, Россия

Аннотация

В ИЯФ СО РАН (Новосибирск) разработан инжектор атомов водорода, предназначенный для диагностики плазмы в современных токамаках. Ионный источник инжектора формирует пучок протонов с током до 3 А, энергией до 55 кэВ и длительностью до 4 сек. В конструкцию газоразрядной камеры ионного источника было внесено несколько изменений, которые позволили увеличить содержание в пучке протонов с полной энергией с ~60÷65% до ~80%. В данной модификации увеличена плотность ВЧ мощности в разряде под антенной в результате уменьшения ее ширины и установки на антенне сердечника из высокочастотных ферритов. Вблизи плазменной сетки был установлен магнитный фильтр, который создавал область слабого поперечного магнитного поля. Дополнительно для предотвращения наблюдавшейся ранее деградации состава пучка вследствие восстановления металлического алюминия на внутренней поверхности керамической разрядной камеры и выделения воды в разряд камера была покрыта пластинами из пиролитического нитрида бора.

**Radio frequency ion source with increased contents
of protons in the beam**

A.A. Ivanov, A.A. Podyminogin, I.V. Shikhovtsev

Abstract

An injector of hydrogen atoms has been developed in the Budker INP (Novosibirsk) for plasma diagnostic in the modern tokamaks. The ion source of the diagnostic injector provides a proton beam with a current of up to 3A, energy up to 55 keV and pulse duration up to 4 s. This paper describes the improved version of the plasma box of this ion source. Some changes were made in design of the source. The density of the RF power in the discharge under the antenna was increased as a result of reduction of the antenna width and installation over the antenna the core of the high-frequency ferrite. The magnetic filter was installed near to the plasma grid. It creates an area of a weak transverse magnetic field. The plasma box was covered by the plates of a pyrolitic boron nitride to prevent the degradation of beam composition owing to restoration of metal aluminium on an internal surface of the ceramic box and allocation of water in the discharge. These changes allowed to raise the percentage of protons with full energy in the beam from ~60÷65% up to ~80%.

©Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

1. Введение

В ИЯФ им.Г.И.Будкера ранее был разработан высокочастотный (ВЧ) ионный источник для диагностических инжекторов атомов водорода, предназначенных для использования в спектроскопических диагностиках на крупных современных токамаках [1, 2, 3]. Ионный источник позволяет формировать пучок протонов с током до 3 А, энергией до 55 кэВ, угловой расходимостью ~ 0.6 градуса и длительностью до 4 сек. В первой версии ионного источника содержание в пучке протонов с полной энергией было относительно небольшим, около 60 – 65%, и заметным было содержание протонов с энергией $\sim 1/18$, образующихся в результате диссоциации ускоренных ионов воды.

Для улучшения массового состава пучка нами были внесены несколько изменений в конструкцию источника.

Во-первых, увеличена плотность ВЧ мощности в разряде под антенной за счет уменьшения ее ширины и установки на антенне сердечника из высокочастотных ферритов. Кроме того, вблизи плазменной сетки был установлен магнитный фильтр для предотвращения попадания в эту область энергичных электронов из разряда. Вследствие этого была уменьшена плотность молекулярных ионов, возникающих из-за ионизации рабочего газа электронами большой энергии [4, 5]. Магнитная система фильтра создавала вблизи плазменной сетки слабое поперечное магнитное поле, отсекавшее энергичные электроны.

В первоначальной версии ионного источника наблюдалось относительное увеличение со временем доли молекулярных ионов в пучке, что по-видимому было связано с изменениями свойств поверхностного слоя разрядной камеры, изготовленной из миналунда (Al_2O_3). Изменения свойств поверхности связано с образованием на ней пленки восстановленного металлического алюминия. Заметное улучшение стабильности состава пучка было достигнуто после установки пластин из пиролитического нитрида бора (ПНБ). По-видимому, определенную роль в этом случае играла большая химическая инертность этого материала по сравнению с окисью алюминия. Введение указанных изменений позволило повысить содержание протонов в пучке до $\sim 80\%$. При этом плотность ионного тока вблизи плазменной сетки осталась прежней – 120 mA/cm^2 .

В данной работе представлены результаты испытания ионного источника с улучшенной версией плазменного эмиттера, приведены данные измерения массового состава пучка.

2. Источник плазмы

Первоначальная версия конструкции ионного источника подробно описана в [1, 2]. Общий вид плазменной камеры ионного источника с указанными выше изменениями схематически показан на рис. 1а. Фотография плазменной камеры представлена на рис. 1б. Цилиндрическая часть газоразрядной камеры (1) изготовлена из керамики (Al_2O_3) и имеет внутренний диаметр 112 мм и толщину стенки 4 мм. Рабочий газ (водород) подается в камеру через узел (2), установленный на торцевом дюралево-фланце. Этот узел осуществляет одновременно ввод газа в камеру и поджиг разряда. Поджиговое устройство состоит из двух коаксиальных электродов, разделенных керамическим изолятором. Для инициации ВЧ разряда между электродами прикладывался короткий импульс напряжения амплитудой около 6 кВ, что приводит к пробое по поверхности изолятора. Высокочастотный разряд возбуждался на частоте 4,65 МГц при помощи внешней антенны (3). В предыдущей версии источника антенна представляла собой шестивитковую катушку шириной 4 см, намотанную на фторопластовом каркасе. В новой версии газоразрядной камеры источника антенна изготовлена из медной трубки диаметром 3 мм и имеет 4 витка. Изоляция витков осуществляется с помощью термоусаживаемой полиэтиленовой трубки, так что ширина антенны составляет ~ 2 см. По периметру антенны снаружи расположен сердечник из ферритовых полуколец (4), закрепленных во фторопластовом каркасе. На заднем фланце газоразрядной камеры установлен набор постоянных магнитов (5). Их роль состоит, с одной стороны, в рассеивании потока обратных электронов, поступающих из ИОС и, тем самым, в уменьшении плотности тепловых нагрузок на задний фланец. Кроме того, поле этих магнитов увеличивает энергетическую эффективность разряда и снижает поток плазмы на задний фланец.

Внутренняя керамическая поверхность камеры покрыта пластинами (6) из пиролитического нитрида бора размером 90×10 мм² и толщиной 1 мм. Крепление пластин и теплоотвод с них осуществляется на краях. Для этого вблизи заднего торцевого фланца пластины вставлены в специальные ламели, закрепленные на торцевом водоохлаждаемом фланце. На противоположном конце, вблизи плазменной сетки, пластины поджаты с помощью разрезного дюралевого кольца (7). Используемый ПНБ имеет высокую теплопроводность (~ 100 Вт/м*К), что позволяет осуществить теплоотвод с пластин в паузах ~ 2 мин между выстрелами.

Магнитный фильтр (8) был установлен между керамической камерой и торцевым фланцем вблизи плазменного электрода (9). Конструкция магнитного фильтра показана на рис. 2.

Он состоит из четырех постоянных магнитов (1) и магнитопроводов (2). Магнитопроводы представляют собой железные стержни диаметром 6 мм, сваренные в кольцо из нержавеющей стали (3), и железные пластины сечением 4×1 мм². Между пластинами (4) создается магнитное поле. Внутри

плазменной камеры железные поверхности фильтра покрыты алюминием для уменьшения коэффициента рекомбинации на них [6].

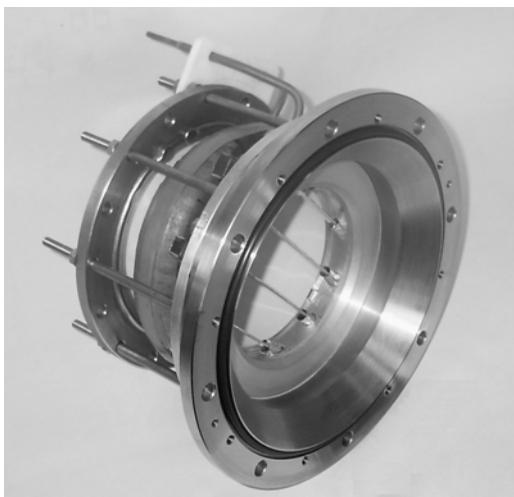
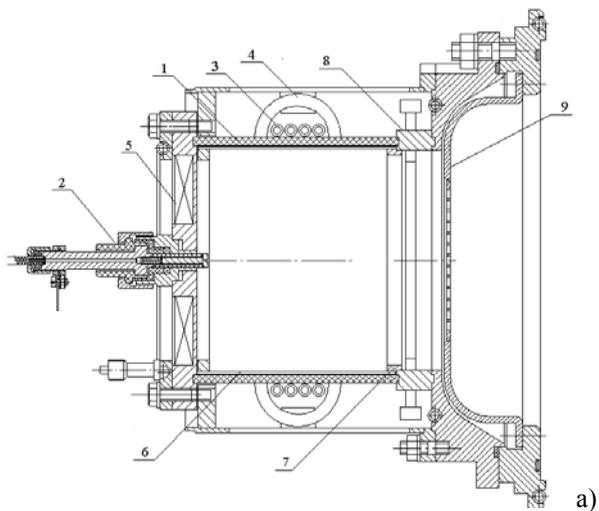


Рис. 1.

а) Плазменная камера ионного источника: 1 – керамическая разрядная камера; 2 – подвод газа и поджиг; 3 – антенна; 4 – ферриты; 5 – постоянные магниты; 6 – пластины из ПНБ; 7 – дюралевое кольцо; 8 – магнитный фильтр; 9 – плазменный электрод. б) Фотография плазменной камеры.

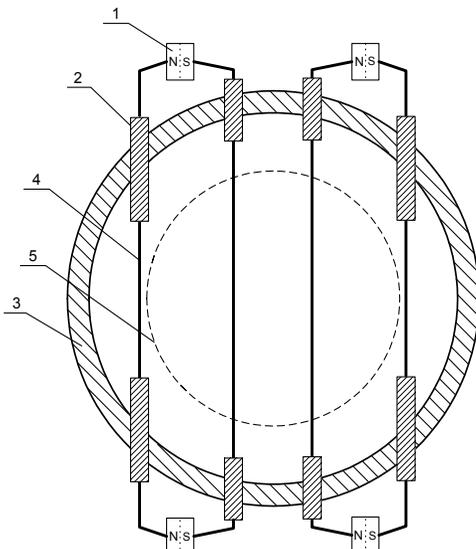


Рис. 2. Магнитный фильтр: 1 – постоянные магниты; 2 – магнитопроводы; 3 – кольцо из нержавеющей стали; 4 – железные пластины; 5 – апертура ИОС.

3. Параметры плазменного эмиттера

Исследование характеристик плазменного эмиттера проводилось без формирования пучка ионов. Плазменный эмиттер был установлен на специальный стенд, где вместо ионно-оптической системы была установлена только

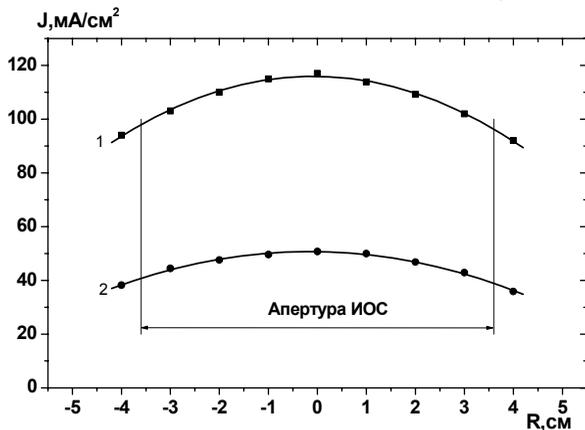


Рис. 3. Распределение плотности ионного тока по радиусу плазменного эмиттера: 1 – с магнитами на задней стенке, 2 – без магнитов на задней стенке.

плазменная сетка. Сетка имела по диаметру щель, вдоль которой перемещался сеточный зонд для измерения профиля плотности ионного тока.

Профиль плотности тока и эффективность разряда зависели от расположения, формы и количества магнитов, расположенных на торце газоразрядной камеры. Постановка магнитов увеличивала эффективность разряда примерно в два раза. На рис. 3 показано распределение плотности ионного тока по радиусу плазменного эмиттера в двух вариантах: на задней стенке установлены радиально 8 самарий-кобальтовых магнитов размером $32 \times 12 \times 10 \text{ мм}^3$ (кривая 1) и без магнитов (кривая 2). Эти измерения проводились без магнитного фильтра. Как видно из рисунка, средняя плотность тока по эмиттеру около 110 мА/см^2 , а неоднородность в пределах диаметра 72 мм составляет $\pm 9\%$. В этом режиме в разряде поглощается мощность около 6.5 кВт.

Измерения плотности ионного тока при увеличении поглощаемой в разряде мощности показывают, что плотность тока эмиттера растет линейно (рис. 4).

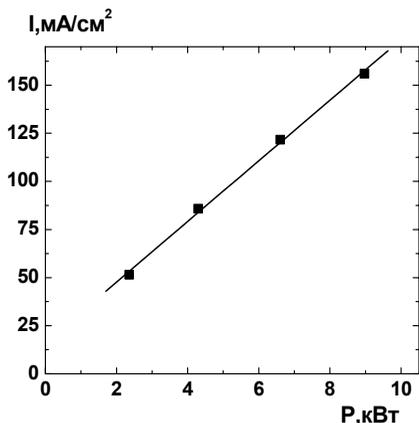


Рис. 4. Зависимость плотности тока в центре эмиттера от мощности, поглощаемой в разряде.

Также были измерены профили плотности ионного тока в различных вариантах с магнитным фильтром (рис. 5). Кривая 1 получена с газоразрядной камерой без магнитов на задней стенке и без магнитов фильтра; кривая 2 – без магнитов на задней стенке и с магнитами фильтра; кривая 3 – с магнитами на задней стенке и с магнитами фильтра; кривая 4 – с магнитами на задней стенке и без магнитов фильтра. Наличие магнитного поля в разряде вблизи плазменной сетки (без магнитов на задней стенке) увеличивало плотность ионного тока (кривая 2). По-видимому, это связано с лучшим удержанием ионизирующих электронов в объеме и соответствующем повышении степени ионизации плазмы. Вблизи пластин и посередине между ними магнитное поле составляло 70 Гс и 30 Гс, соответственно. При установке магни-

тов на задней стенке разрядной камеры плотность ионного тока (кривая 4) существенно возрастает, а установка магнитов фильтра несколько увеличивает неоднородность профиля (кривая 3).

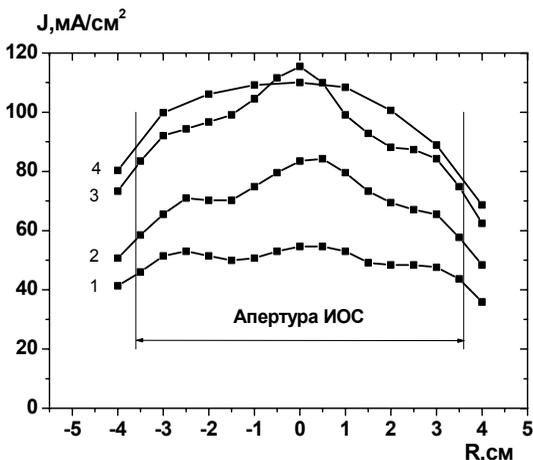


Рис. 5. Профили плотности ионного тока по радиусу в плоскости плазменной стенки в различных вариантах расположения магнитов:

1 – без магнитов на задней стенке и без магнитов фильтра; 2 – без магнитов на задней стенке и с магнитами фильтра; 3 – с магнитами на задней стенке и с магнитами фильтра; 4 – с магнитами на задней стенке и без магнитов фильтра.

4. Массовый состав пучка

Для определения массового состава пучка описанная выше газоразрядная камера была установлена на 4-х электродную ионно-оптическую систему (ИОС), аналогичную системе ионного источника диагностического инжектора, используемого на установке TEXTOR [1]. Используемая ИОС, имела 163 отверстия диаметром 4 мм, расположенных в круге диаметром 72 мм. Геометрическая прозрачность сеточной системы около 50%. Данная ИОС позволяет формировать без пробоев пучок с энергией 50 кэВ и током до 2.6 А, при этом минимальная расходимость пучка ($\sim 0.6^\circ$) соответствует току 1.8 А. Длительность пучка в данных экспериментах составляла 60 мс.

Измерения массового состава ионного пучка, извлекаемого из плазменного эмиттера, проводились с помощью магнитного масс-анализатора и спектрометра HR2000 фирмы Ocean Optics, Inc. [7].

Масс-анализатор был установлен на оси на расстоянии 3.5 м от ионного источника. На входе в анализатор центральная часть пучка вырезалась диафрагмой диаметром 2 мм. Вытекающий из источника газ представлял собой

газовую мишень достаточно большой плотности, на которой происходила диссоциация молекулярных ионов H_2^+ и H_3^+ на протоны и атомы водорода с энергиями соответственно $1/2$ и $1/3$ от полной энергии пучка. Затем пучок, состоящий из протонов и атомов водорода, проходил через магнитное поле масс-анализатора, где протонная компонента пучка разделялась на три основные фракции: с полной энергией, половинной и одной третьей.

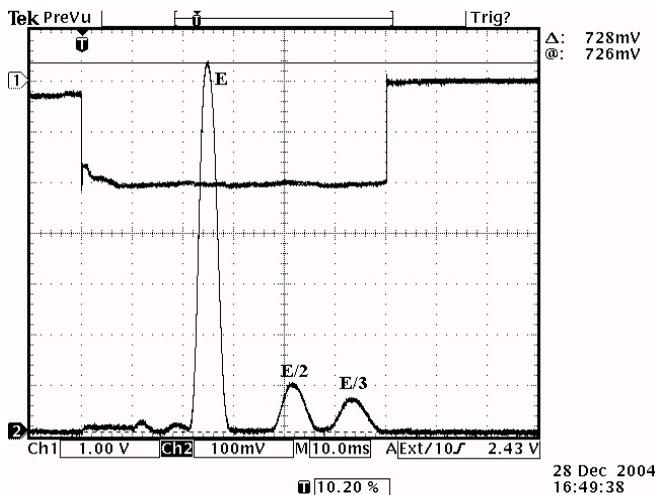


Рис. 6. Осциллограммы тока пучка (верхняя кривая) и тока на коллектор анализатора (нижняя) от времени.

Магнитное поле масс-анализатора менялось в нужных пределах в течение работы источника ионов. При этом на коллекторе анализатора наблюдались пики, соответствующие протонам с энергией E , $E/2$ и $E/3$. На рис. 6 приведены характерные осциллограммы тока пучка (верхняя кривая) и тока коллектора (нижняя кривая). Энергия пучка составляла 50 кэВ, ток – 2 А. Доля фракций ионного пучка определялась с учетом равновесного выхода для данной энергии частиц и количества частиц в молекуле. Приведенному графику соответствует следующий состав извлекаемого пучка по току: протонов – 81.5%, ионов H_2^+ – 11.5%, ионов H_3^+ – 7%.

На рис. 7 представлены измеренные спектрометром спектры излучения линии H_α пучка с энергией 50 кэВ. Угол наблюдения составлял 45° к направлению распространения пучка. Спектр включает пять линий, соответствующих частицам с различной энергией. Наиболее интенсивная линия (справа) соответствует несмещенной линии H_α атомарного водорода, возбуждаемого пучком. Три линии (слева) соответствуют свечению быстрых атомов водорода с энергиями E , $E/2$, $E/3$. Линия, ближняя к несмещенной, соответствует излучению атомов водорода с энергией $\sim E/18$, образующихся в результате

диссоциации примесных ионов воды. Анализ спектрометрических данных проводился в соответствии с методикой, описанной в [8].

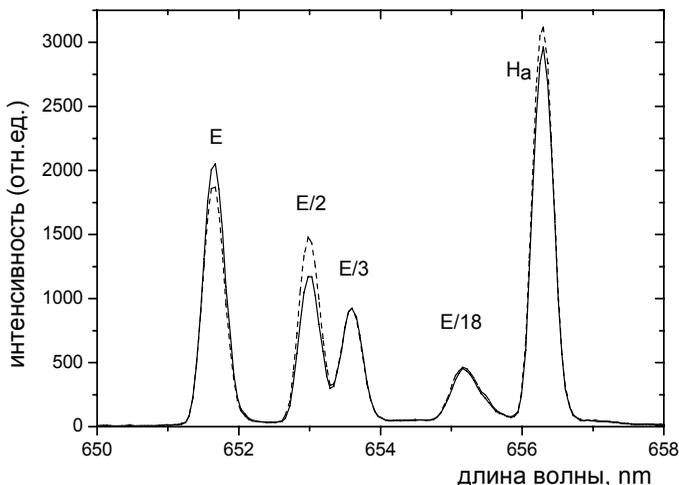


Рис. 7. Спектр излучения линии H_{α} : пунктирная линия – без магнитного фильтра, сплошная – с магнитным фильтром.

Приведенному на рисунке спектру (сплошная линия, источник с магнитным фильтром, без покрытия пластинами из ПНБ) соответствует относительная плотность ионов H^+ – 70.9%, H_2^+ – 16.2%, H_3^+ – 9% и примесные ионы – 3.9% (по току 80.2%, 12.9%, 5.9%, 1%, соответственно). В эксперименте, когда магниты фильтра убраны (пунктирная линия), состав пучка был несколько хуже: H^+ – 65.7%, H_2^+ – 21%, H_3^+ – 9.3% и примесные ионы – 4% (по току 75.7%, 17.1%, 6.2%, 1%, соответственно). Из спектров видно, что магнитный фильтр уменьшает долю ионов H_2^+ в вытягиваемом пучке и повышает выход атомарных ионов. Ранее в экспериментах, описанных в [4, 5], было установлено, что относительная величина тока молекулярных ионов прямо коррелирует с плотностью быстрых электронов вблизи плазменного электрода. Для отсеечения горячих электронов в [9] также использовался магнитный фильтр между областью разряда, где расположены накаливаемые катоды, эмитирующие электроны, и плоскостью вытягивания ионов. Фильтр представлял собой линейные каспы магнитного поля между боковыми стенками и задней стенкой источника. Было установлено, что фильтр не позволял быстрым электронам доходить до электродов, формирующих пучок. Это позволило уменьшить долю ионов H_2^+ в вытягиваемом пучке и повысить выход атомарных ионов.

Механизм отсечки электронов высоких энергий поперечным магнитным полем связан с тем, что в случае, когда циклотронная частота больше частоты

ты столкновений электронов, то есть плазма «замагничена», коэффициент диффузии обратно пропорционален корню из температуры и соответственно существенно меньше для горячих электронов [10].

Для ионного пучка с током 2 А и энергией 50 кэВ был измерен состав в зависимости от тока пучка (рис. 8) и от потока газа в газоразрядную камеру (рис. 9). Как видно, с увеличением тока доля протонов возрастает и заметно убывает доля H_3^+ . При изменении давления перед клапаном, т.е. изменении потока газа в источник, в исследованных пределах количество H_1^+ менялось незначительно. В данной конструкции газовой системы, когда поток газа в источник определялся диаметром диафрагмы (~0.1 мм) на конце диэлектрической трубки, подводящей газ к источнику, давление водорода перед клапаном 1.5 Ати соответствует потоку 2.5 л·Тор/сек.

В первоначальном варианте источника после примерно года работы, когда полная длительность работы эмиттера составила несколько тысяч секунд, произошла заметная модификация поверхности керамической поверхности плазменной камеры, в частности в результате восстановления на ней металлического алюминия. В результате, протонная компонента пучка уменьшилась примерно на 10%. Для предотвращения деградации состава пучка керамическая поверхность была покрыта пластинами из пиролитического нитрида бора. Этот материал химически инертен и устойчив к воздействию водородной плазмы. После нескольких секундных импульсов с разрядом в результате прогрева пластин происходит хорошее обезгаживание и выделение газа с поверхности пластин из нитрида бора прекращается. В эксперименте без магнитного фильтра установка пластин из ПНБ увеличила содержание протонов в ионном пучке примерно на 6% и уменьшила в полтора раза долю ионов воды.

Заключение

В результате модификации конструкции плазменного эмиттера ВЧ ионного источника доля протонов с полной энергией увеличилась с 60-65% до 80%. Покрытие внутренней керамической поверхности плазменной камеры пластинами из пиролитического нитрида бора позволило стабилизировать массовый состав пучка и уменьшило примесь воды в пучке.

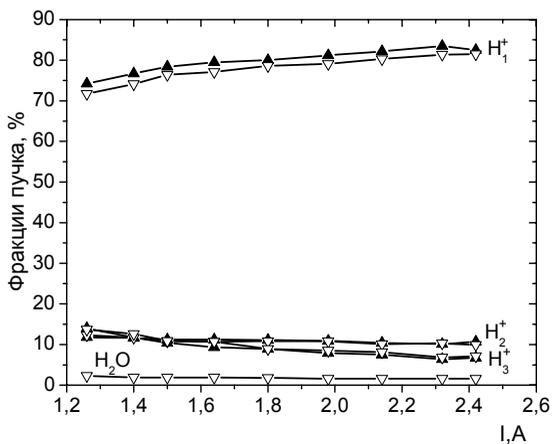


Рис. 8. Массовый состав водородного пучка в зависимости от тока при фиксированном потоке газа (давление над клапаном – 1 Атм). Треугольник вверх (сплошной) – данные магнитного анализатора, треугольник вниз (пустой) – данные спектрометра.

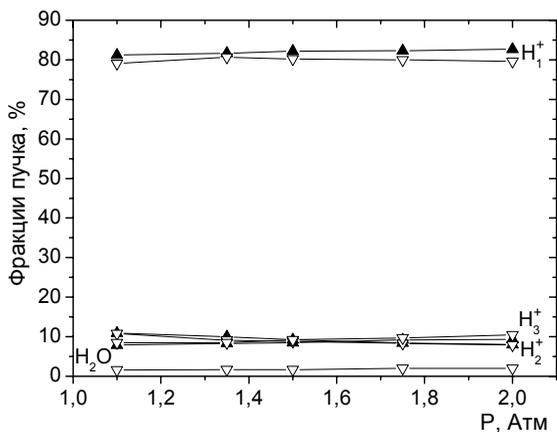


Рис. 9. Массовый состав водородного пучка в зависимости от давления газа над клапаном. Треугольник вверх (сплошной) – данные магнитного анализатора, треугольник вниз (пустой) – данные спектрометра.

Литература

1. *Ivanov A.A., Davydenko V.I., Deichuli P.P. et al. Rev. Sci. Instrum., 2000, v.71, №10, p.3728-3735.*
2. А.А. Иванов, И.В.Шиховцев, А.А. Подыминогин, И.И. Авербух, Т.Д. Ахметов, В.И.Давыденко, П.П.Дейчули. Физика плазмы, 2002, т.28, №3, с.221–228.
3. A.N. Karpushov, G.F. Abdrashitov, I.I. Averboukh, P. Bosshard, I. Con-drea, B.P. Duval, A.A. Ivanov, V.V. Kolmogorov, J. Mlynar, A. Perez, I.V. Shikhovtsev, A.N. Shukaev and H. Weisen. Fusion Engineering and Design, v.66-68, p.899-904 (September 2003) Elsevier B.V. 22nd Symposium on Fusion Technology /Edited by S. Tahtinen et al.
4. *Ehlers K.W., Leung K.N. Rev. Sci. Instrum., 1981, v.52, №10, p.1452-1458.*
5. *Ehlers K.W., Leung K.N. Rev. Sci. Instrum., 1982, v.53, №9, p.1423-1428.*
6. М.Д. Габович. Физика и техника плазменных источников ионов, М, Атомиздат, 1972, с.32.
7. www.oceanoptics.com.
8. *R. Uhlemann, R.S. Hemsworth, G. Wang et al. Rev. Sci. Instrum., 1993, v.64, №4, p.974-982.*
9. *A.J.T. Holmes, T.S. Green, A.F. Newman. Rev. Sci. Instrum., 1987, v.57, №8, p.1369-1381.*
10. *A.J.T. Holmes, R. McAdams, G. Proudfoot et al. Rev. Sci. Instrum., 1994, vol.65, №4, p.1153-1158.*

А.А. Иванов, А.А. Подыминогин, И.В. Шиховцев

Высокочастотный ионный источник
с повышенным содержанием протонов в пучке

A.A. Ivanov, A.A. Podyminogin, I.V. Shikhovtsev

**Radio frequency ion source with increased contents
of protons in the beam**

ИЯФ 2006-1

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев
Работа поступила 10.01. 2006 г.

Сдано в набор 11.01. 2006 г.

Подписано в печать 12.01.2006 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 1.0 печ.л., 0.8 уч.-изд.л.

Тираж 105 экз. Бесплатно. Заказ № 1

Обработано на IBM PC и отпечатано
на ротапинтере ГНЦ РФ "ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН",
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11