

Сибирское Отделение Российской Академии Наук
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера

П.П. Дейчули, С.А. Корепанов, А.А. Иванов,
В.И. Давыденко, В.В. Мишагин, Р. Улеманн,
Н.В. Ступишин, Г.И.Шульженко

ИНЖЕКТОР АТОМОВ ВОДОРОДА
ДЛЯ АКТИВНОЙ ШТАРКОВСКОЙ
СПЕКТРОСКОПИИ ПЛАЗМЫ

ИЯФ 2003-37

Новосибирск
2003

Инжектор атомов водорода для активной штарковской спектроскопии плазмы

П.П. Дейчули, С.А. Корепанов, А.А. Иванов,
В.И. Давыденко, В.В. Мишагин, Р. Улеманн,
Н.В. Ступишин, Г.И. Шульженко

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера,
630090, Новосибирск, Россия

Аннотация

В данной работе описана конструкция и приведены параметры инжектора атомов водорода для активной корпускулярной диагностики плазмы. Параметры инжектора: энергия частиц 50 кэВ, ток (в ионах) 5 А, длительность импульса 50 мс, содержание ионов полной энергии ~80%, угловая расходимость пучка $\leq 0.5^\circ$. Для формирования пучка используется дуговой генератор плазмы и 4-электродная многоапертурная ионно-оптическая система.

Введение

Активная корпускулярная диагностика, основанная на инъекции в плазму пучков ионов и атомов, получила широкое распространение на крупных термоядерных установках. С ее помощью можно определять широкий набор параметров, таких как локальные плотность и ионная температура плазмы, электрический потенциал, концентрация и температура примесей, величина и направление магнитного поля и т.д. Для этих целей на современных установках требуются пучки быстрых атомов водорода с потоком несколько эквивалентных ампер и энергией частиц около 50 кэВ.

Обычно источник ионов располагается на достаточно большом удалении от плазменного шнура (несколько метров). При этом поперечный размер пучка в плазме должен быть достаточно мал, так как именно он определяет пространственное разрешение. Вследствие этого возникает требование к угловой расходимости пучка, которая не должна превышать 1° .

Другим важнейшим параметром пучка является его состав. Наличие в водородной плазме – эмиттере заряженных частиц в ионном источнике, молекулярных ионов приводит к появлению в пучке наряду с основной компонентой, имеющей полную энергию E , частиц с энергией $E/2$ и $E/3$. Содержание частиц с полной энергией в пучке зависит от типа генераторы плазмы. Для диагностических целей обычно требуется иметь в пучке как можно больше частиц с полной энергией.

В Институте ядерной физики с начала 70х годов ведутся работы по созданию диагностических инжекторов на основе дугового разряда с холодным катодом с высокой плотностью тока [1,2]. Особенность этих генераторов заключается в высоком, до 90%, содержании протонов в плазме. Разработанные источники позволяли получать протонные пучки с током до 4 А, энергией до 40 кэВ и максимальной длительностью 20 мс [3,4]. Для активной шарковой спектроскопии плазмы на установке RFX (Падуа, Италия) нами разработан диагностический инжектор на основе дугового генератора плазмы с большей длительностью импульса и энергией частиц. Длительность импульса пучка составляет 50 мс, энергия частиц 50 кэВ. Угловая расходимость пучка $\sim 0.5^\circ$ при токе ионов до 5 А. Особенности конструкция инжектора и результаты его испытаний описаны ниже. В

разделах 1-2 приведено описание конструкции инжектора и ионного источника. Раздел 3 посвящен результатам измерений параметров пучка и испытаний инжектора.

1. Общее описание инжектора

Диагностический инжектор (рис.1) включает в себя ионный источник и вакуумный объем, в котором размещены нейтрализатор, сепарирующий магнит, приемник ионов, прицельное устройство и подвижный калориметр-поглотитель пучка. Необходимый для работы инжектора вакуум поддерживается с помощью двух крионасосов, вертикально пристыкованных к вакуумному объему инжектора.

Ускоренный пучок нейтрализуется на вытекающем из ионного источника газе (водороде) с эффективностью около 51% при энергии 50 кэВ. Камера нейтрализатора представляет собой трубу из магнитомягкой стали для экранирования от внешнего магнитного поля. Для удаления из пучка оставшейся ионной компоненты используется магнитный сепаратор. Магнитное поле в зазоре электромагнита имеет напряженность 600 Э. Ионы отклоняются на охлаждаемый водой приемник.

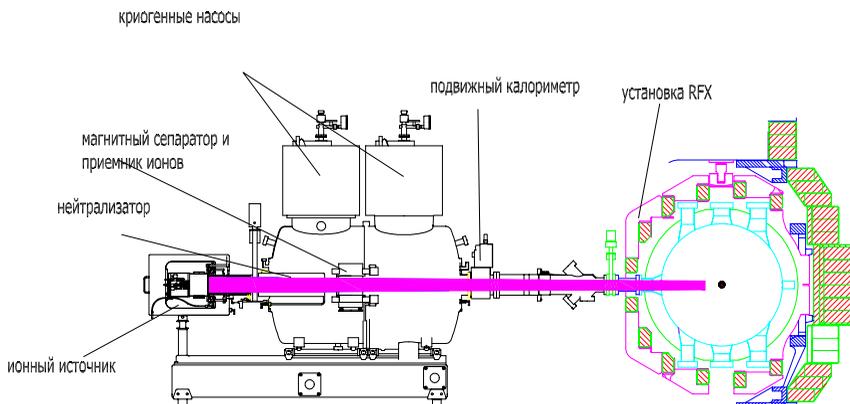


Рис. 1. Общий вид диагностического инжектора.

Для снижения ионизационных потерь пучка в тракте применяется дифференциальная откачка. Для этого с помощью диафрагмы с отверстием для пучка вакуумный объем поделен на две секции. Каждая секция откачивается отдельным криогенным насосом со скоростью откачки около $24 \text{ м}^3/\text{с}$ (по водороду). В первой секции, соседней с ионным источником, давление поддерживается на уровне 10^{-1} Па , на выходе из второй секции давление при работе не превышает 10^{-3} Па .

2. Ионный источник

Ионный источник состоит из генератора плазмы на основе дугового разряда и 4-сеточной многоапертурной ионно-оптической системы (ИОС). Плазма, из которой извлекается ионный пучок, генерируется дуговым разрядом в источнике, схема которого показана на рис.2. Подача газа производится двумя импульсными клапанами в катодную полость и вблизи анода. Поджиг дуги происходит при подаче короткого высоковольтного импульса между катодом и поджиговым электродом, расположенным в катодной полости. Длительность напуска в катодную область составляет несколько миллисекунд. Анодный клапан напускает газ в течение всего рабочего импульса. Дуговой канал имеет длину ~ 4 см и диафрагмирован металлическими шайбами с отверстиями, диаметр которых уменьшается к аноду. Ток дуги, требуемый для извлечения пучка с током 5А, около 500 А.

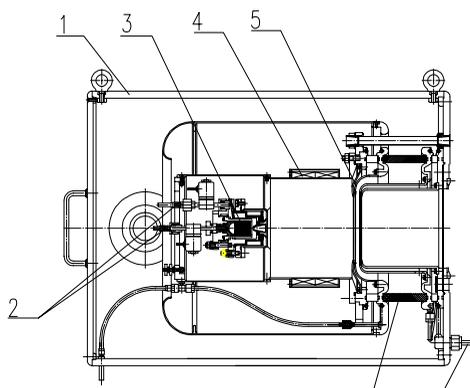


Рис. 2. Ионный источник на основе дугового генератора плазмы:

1 – магнитный экран, 2 – газовые клапаны, 3 – камера дугового разряда, 4 – постоянные магниты, 5 – сетки, 6 – узел ИОС, 7 – подача воды.

На выходе из анодного отверстия плазма свободно расширяется в камеру с периферийным магнитным полем. Расстояние между анодным отверстием и первой (плазменной) сеткой 160 мм. Периферийное мультипольное магнитное поле уменьшает потери плазмы на стенках камеры и увеличивает однородность плазменного эмиттера. Оно создается набором из 16 постоянных магнитов из $\text{Nd}_{13}\text{Fe}_{77}\text{B}_8$ длиной 80 мм и сечением 9×12 мм, расположенных на внешней стенке расширительной камеры. Магнитное поле у внутренней поверхности камеры направлено по радиусу и имеет величину около 2.5 кГс. Поле спадает до ~ 100 Гс при удалении внутрь от магнитов на 2 см.

Согласно данным измерений с помощью многосеточных зондов полный поток ионов из генератора плазмы составляет ~ 28 А. Из них около 5 А вытягивается из плазмы и ускоряется в сеточной системе. Однородность плазменного эмиттера в плоскости плазменной сетки $\pm 10\%$.

Сетки ИОС изготовлены из молибденовых пластин толщиной 0.7 мм и имеют 421 отверстие диаметром 4 мм, расположенные в гексагональном порядке с шагом 5 мм. Рабочая поверхность сеток представляет собой круг диаметром 110 мм, а суммарная площадь отверстий ~ 53 см². Сетки крепятся на медных держателях с фланцами, имеющими водяное охлаждение. Охлаждение электродов ИОС осуществляется в паузах между импульсами. В режиме работы 1 выстрел каждые 2 минуты и длительности импульса пучка 50мс увеличение температуры сеток не превышает 40°.

Для фокусировки пучка на заданном расстоянии от ионного источника сетки имеют сферическую форму с радиусом кривизны 5 м. Плазменный электрод находится под потенциалом +50 кВ, следующий фокусирующий электрод под потенциалом 45 кВ, третий – под небольшим отрицательным потенциалом, последний электрод заземлен.

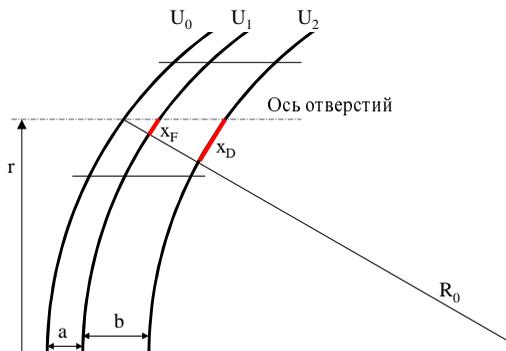


Рис. 3. Схема периферийной ячейки ИОС.

В целях упрощения все сетки были изготовлены с одинаковым радиусом кривизны и с одинаковым шагом отверстий. Поэтому, условия формирования пучка в приосевой и в периферийной ячейках различаются (рис.3) из-за дополнительного радиального смещения осей отверстий. Оценим влияние этих смещений на фокусировку пучка. Будем пренебрегать пространственным зарядом пучка, границу плазменного эмиттера считаем плоской.

Рассмотрим действие на ион двух тонких электростатических линз: фокусирующей, локализованной в плоскости вытягивающего электрода, и дефокусирующей, локализованной в плоскости ускоряющего электрода (рис.3). Поперечный импульс, получаемый частицей в фокусирующей и дефокусирующей линзах равен:

$$P_F = -\frac{x_F}{4} \cdot \frac{\frac{U_1 - U_2}{b} - \frac{U_0 - U_1}{a}}{\sqrt{1 - \frac{U_1}{U_0}}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot M}{U_0}} ; P_D = -\frac{x_D}{4} \cdot \frac{U_1 - U_2}{b} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot M}{U_0}},$$

где x_F , x_D – смещение траектории иона от оси ячейки при пролете через фокусирующую и дефокусирующую линзы.

В рассматриваемом случае в качестве x_F , x_D берутся величины смещения осей отверстий в фокусирующей и дефокусирующей сетках относительно оси отверстия в плазменной сетке, рис.3. Соответствующие смещения равны

$$x_F = \frac{r \cdot a}{R}, \quad x_D = \frac{r \cdot (a + b)}{R},$$

где r – радиус, на котором находится рассматриваемая ячейка, R – радиус кривизны сеток.

Учитывая, что вблизи оптимума действие рассеивающей и фокусирующей линз взаимно компенсируется, получим следующую оценку для угла вылета иона из элементарной ячейки $\alpha \approx \frac{r}{4 \cdot R} \cdot \frac{U_1 - U_2}{U_0} \approx \frac{r}{4 \cdot R}$. Этот

угол соответствует фокусному расстоянию $F' = 4 \cdot R$, а эффективное фокусное расстояние сеточной системы, определяемое из соотношения $\frac{1}{F} = \frac{1}{R} + \frac{1}{F'}$, будет равно $F = 0.8 \cdot R$.

Таким образом, использование электродов с одинаковым шагом отверстий приводит к уменьшению фокусного расстояния на величину $\sim 20\%$ по сравнению с радиусом кривизны сетки. В данном случае, при радиусе кривизны сеток 5 м, фокусное расстояние должно быть равно ~ 4 м, что хорошо согласуется с данными измерений.

Численные расчеты с использованием программного комплекса AXCEL [5] позволили оптимизировать величину зазоров между электродами и их форму для получения пучка с достаточно малой расходимостью и требуемым фокусным расстоянием (4 м). Траектории ионов в элементарной ячейке показаны на рис.4. Расчетный угловой разброс пучка в элементарной ячейке ИОС составляет около 0.3° для потенциалов на электродах 50 кВ, 45 кВ, -0.4 кВ, -0.4 кВ и 0 кВ. Диаметр отверстий в сетках 4мм/4.3мм/3.9мм/3.9мм/3.9мм соответственно для плазменной, вытягивающей, 3-ей и заземленной сеток. Зазоры между электродами на рис.4 слева направо 4.2 мм, 11.2 мм, 2.6 мм, 1.5 мм.

Заметим, что ускоряющий электрод сделан составным. Для запираения встречного электронного тока в ИОС на него подается отрицательный потенциал. В случае одинарной сетки, из-за ее малой толщины (0.7 мм) и близости электрода с большим положительным потенциалом, для создания

запирающего электроны барьера требуется прикладывать большой отрицательный потенциал.

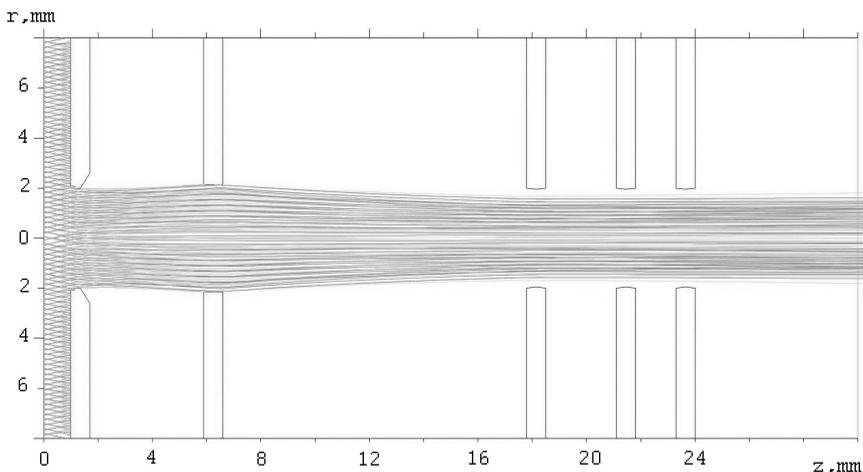


Рис. 4. Формирование пучка в элементарной ячейке.

Это обстоятельство и послужило причиной использования комбинированного электрода, состоящего из двух относительно тонких сеток установленных с зазором. В такой конструкции требуемая величина напряжения существенно уменьшается и, как следствие, значительно увеличивается электрическая прочность сеточной системы. Эффективная толщина сдвоенной третьей сетки с учетом межсеточного зазора – 3.5 мм. При потенциале на ней 200 В высота барьера для электронов на оси канала достигает 90 В, что достаточно для их надежного запираения (см. рис.5). Для сравнения, на рис.6 показаны расчетные зависимости величины минимального потенциала на оси элементарной ускоряющей ячейки от потенциала на третьей сетке для двух типов электродов.

Особенностью работы используемого дугового генератора плазмы является высокая плотность выделения энергии на электродах. При этом происходит нагрев и эрозия катода, анода и металлических диафрагм. Так как импульс тока в дуговом генераторе относительно короткий (50 – 100 мс), то предусмотрено охлаждение водой только катодного и анодного электродов. Как показали испытания, в этом случае ресурс определяется эрозией катода и составляет более 10^4 импульсов, что соответствует работе инжектора на плазменной установке в течение нескольких лет. В настоящее время такой источник проработал без замены узлов более двух лет без заметных изменений характеристик.

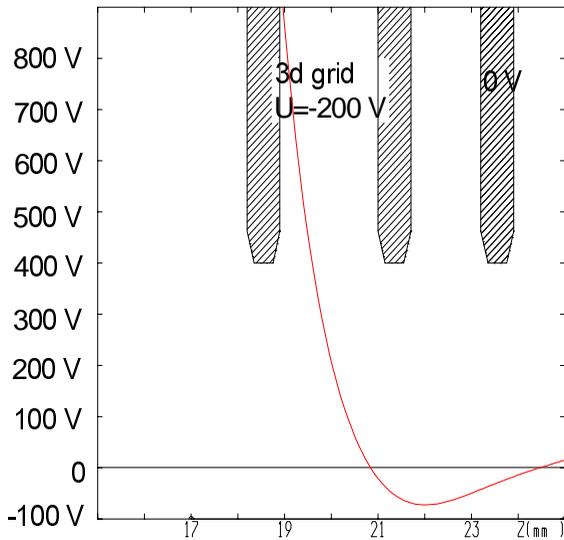


Рис. 5. Расчетный профиль потенциала на оси ячейки вблизи третьей сетки.

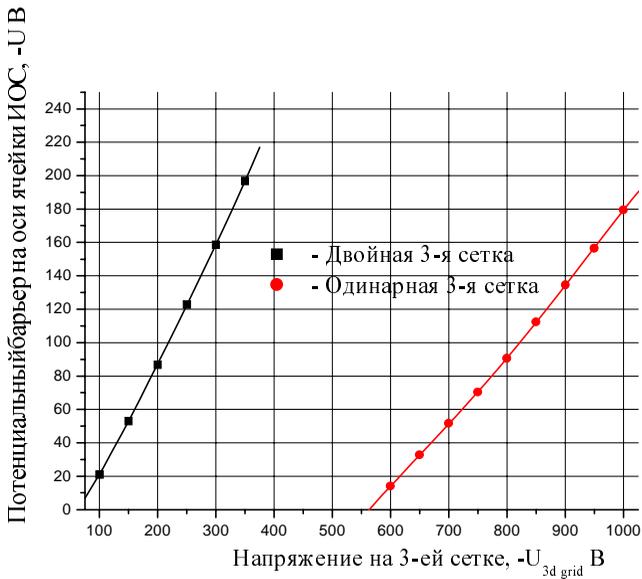


Рис. 6. Зависимость потенциального барьера для электронов в ИОС от величины отрицательного потенциала на запирающем электроде.

При формировании ионных пучков с длительностью десятки микросекунд и более необходимо снимать тепловую нагрузку с электродов ИОС, обусловленную их бомбардировкой ионами, атомами перезарядки и вторичными электронами. В данном случае для охлаждения используется отвод тепла на периферии электрода. Расчеты показывают, что изменение температуры электродов за импульс длительностью 50 мс составляет около 40°C (рис.7). Приведенный график был получен в результате численного моделирования нагрева сеток. В соответствии с данными, приведенными в [6], считалось, что на каждом из электродов выделяется 1% мощности пучка. Далее принималось, что выделение тепла идет на внутренней поверхности отверстий. Расчетные термомеханические напряжения в сетке не превышают 300 кг/см^2 . Такие напряжения в электроде не приводят к его существенному изгибу, изменению зазоров в ИОС и, соответственно, к ухудшению характеристик пучка. Предельно допустимые температуры для данной конструкции сеток примерно на порядок выше и определяются термомеханической устойчивостью электродов [7].

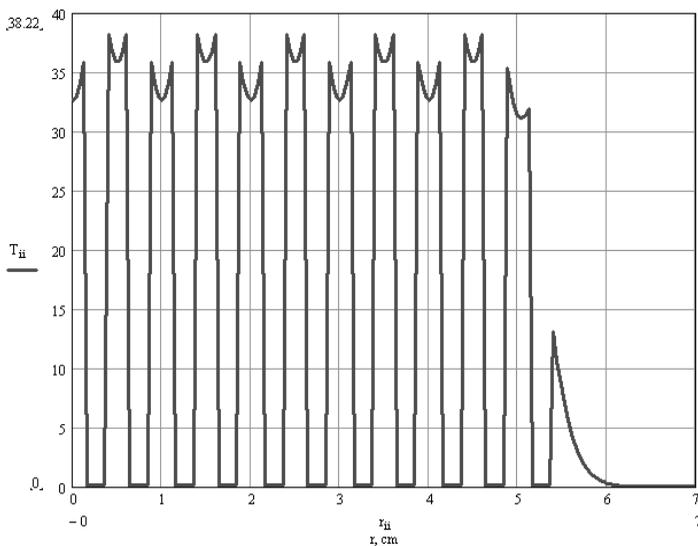


Рис. 7. Радиальный профиль температуры электрода после 50 мс импульса пучка. Провалы на графике соответствуют границам отверстий.

3. Характеристики пучка

Временная последовательность работы систем ионного источника показана на рис.8. Сначала напускается газ в прианодную область дугового генератора и в катодную полость, а также возбуждается ток в катушке, создающую продольное магнитное поле в разряде (сигнал МИ на рис.8). Это магнитное поле имеет величину ~ 1 кГс и увеличивает поток плазмы из генератора в несколько раз. Затем производится зажигание разряда на относительно невысоком, не более 250 А, токе дуги. Через 5 – 10 мс после этого, когда происходит выход потока плазмы на стационар, подается ускоряющее напряжение (сигнал ВМ, рис.8) на сетки ИОС. Затем с задерж-

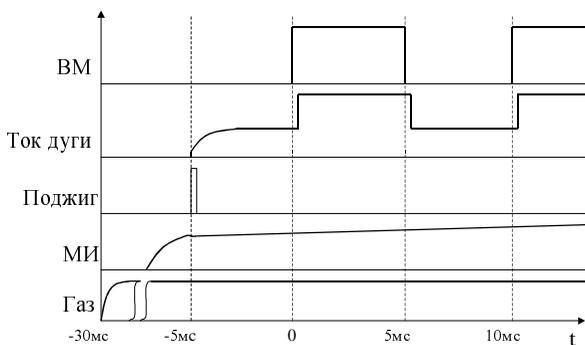


Рис.8. Временная диаграмма работы систем ионного источника.

кой 0.4 мс ток дуги увеличивается до номинального (500 А) значения. Эта последовательность переключения тока дуги с нижнего на высокий уровень предотвращает пробой в ИОС на переднем фронте высоковольтного импульса. Пучок может быть модулирован с частотой до 500 Гц. При этом синхронно производится модулирование тока дугового разряда с переключением разрядного тока на нижний уровень в паузах между импульсами, когда ускоряющее напряжение отсутствует. После появления напряжения, ток в разряде восстанавливается с задержкой 400 мкс до номинальной величины 500 А.

Типичные осциллограммы тока пучка и напряжения в режиме без модуляции и с модуляцией показаны на рис.9,10.

Для измерения профиля плотности тока пучка использовался набор вторично-эмиссионных датчиков, расположенных на определенном расстоянии от ИОС. Абсолютные величины полного тока пучка и плотности тока определялись по данным измерений энергосодержания пучка секционированным калориметром.

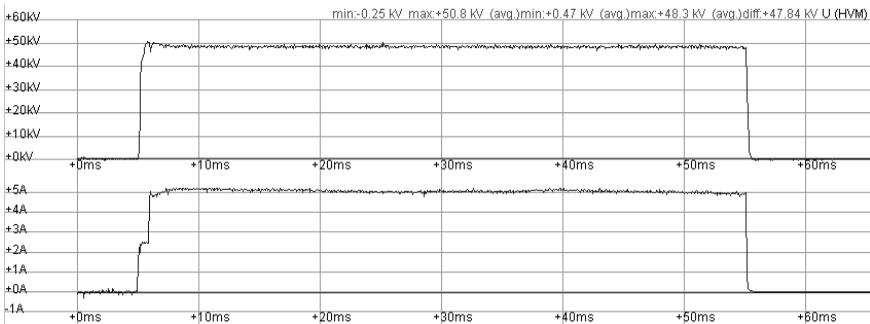


Рис. 9. Осциллограммы тока пучка (внизу) и напряжения на плазменном электроде (вверху).

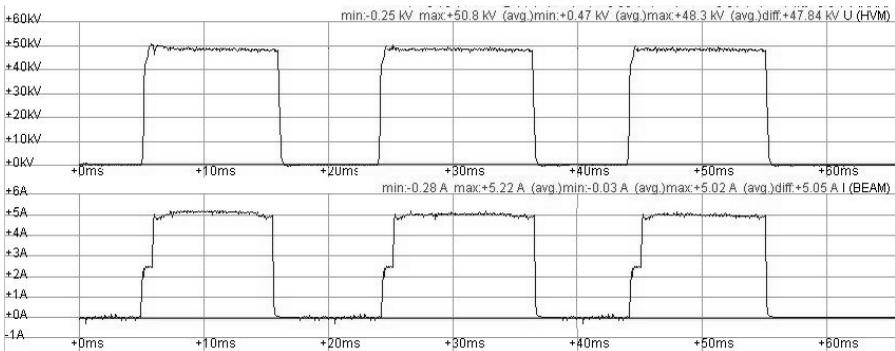


Рис. 10. Осциллограммы тока пучка (внизу) и напряжения на плазменном электроде (вверху) для режима модуляции 10×10 мс.

Для определения расходимости пучка и фокусного расстояния достаточно провести измерения профиля плотности тока в двух точках на разных расстояниях от ИОС. Фактически измерения проводились в точке расчетного фокуса пучка и на расстоянии 2.2 м от сеточной системы, где был установлен калориметр. Характерная V-образная характеристика зависимости радиального размера пучка от тока в точке фокуса, полученная с помощью набора вторично-эмиссионных датчиков, представлена рис.11. Минимальный радиальный размер пучка, соответствующий расходимости $\sim 0.5^\circ$, был получен при токе 4.6 А и напряжении между плазменной и вытягивающей сетками 5 кВ. Для измерения профиля мощности и положения оси пучка использовался подвижный секционированный калориметр. Он был расположен на расстоянии 2.2 м от ИОС. Пример полученного с помощью калориметра профиля показан на рис.12. Его ширина согласуется с данными,

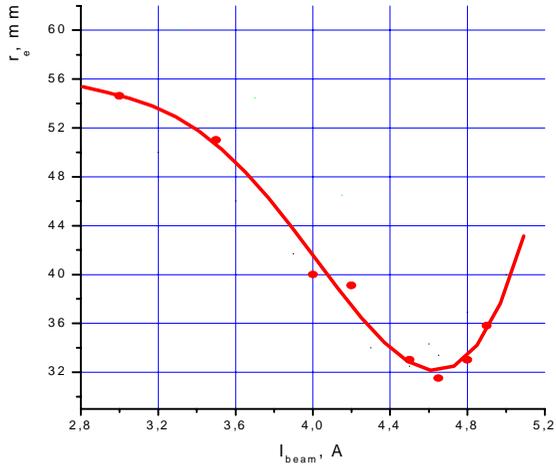


Рис. 11. Зависимость радиального размера пучка (по уровню 1/e) от тока пучка. Измерения проводились на расстоянии 4 м от ИОС (в фокусе).

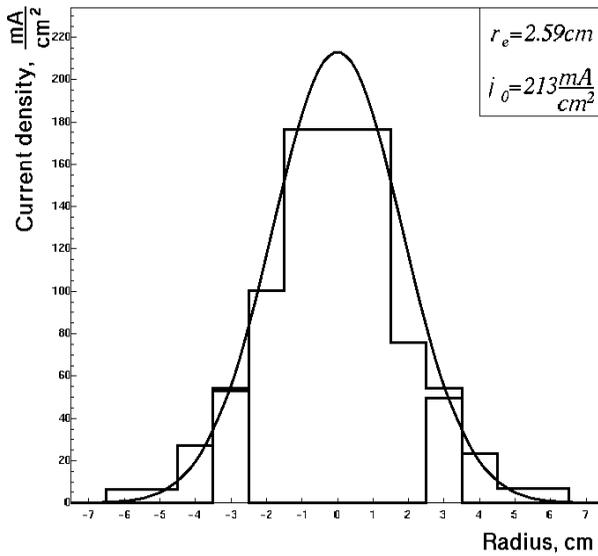


Рис. 12. Профиль плотности тока пучка по calorиметрическим измерениям.

полученными с помощью вторично-эмиссионных датчиков, и соответствует фокусному расстоянию 4 м и расходимости 0.5° .

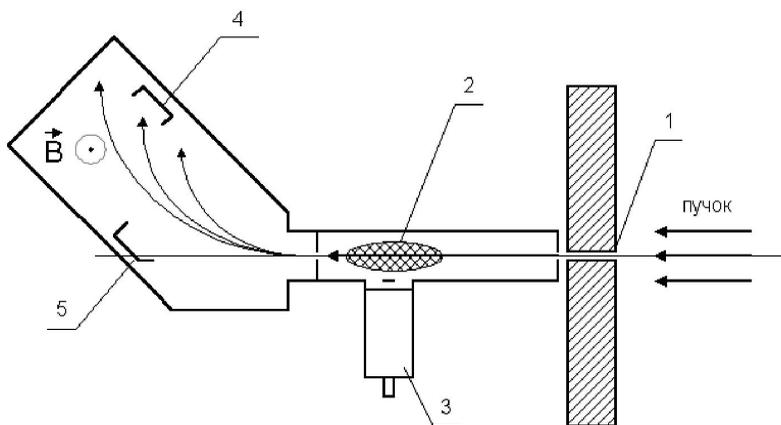


Рис. 13. Схема магнитного масс-анализатора.

1 – диафрагма, 2 – газовая мишень, 3 – клапан, 4, 5 – цилиндры Фарадея.

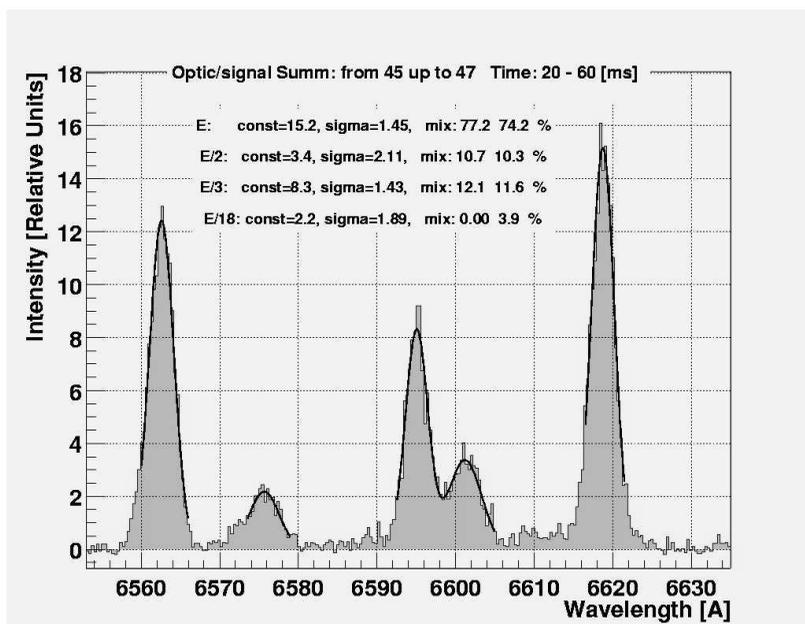


Рис. 14. Спектр линии H_α . Слева направо: несмещенный пик (свечение фоновое водорода в камере), E/18 – вода, E/3 – H_3 , E/2 – H_2 , E – H.

Состав пучка измерялся магнитным анализатором и оптическим методом по относительной интенсивности доплеровски смещенных линий H_{α} компонент пучка с различными энергиями [8]. Оптические измерения проводились на расстоянии 4 м от ИОС, магнитный анализатор располагался на расстоянии 5.1 м.

Схема магнитного анализатора показана на рис.13. Диафрагмой вырезалась центральная часть пучка, который затем проходил через гелиевую равновесную мишень. Далее образовавшиеся ионы отклонялись магнитным полем и регистрировались цилиндрами Фарадея. По соотношению равновесных зарядовых фракций пучка в гелиевой мишени и измеренным токам на цилиндры Фарадея можно восстановить молекулярный состав пучка с достаточной точностью.

Характерный спектр излучения атомов пучка показан на рис.14. Наблюдение производилось под углом 30° к оси. Измеренное отношение интенсивностей соответствует содержанию протонов в извлекаемом ионном пучке около 80% и согласуется с данными по магнитному анализу

Заключение

Разработанный инжектор продемонстрировал надежную работу в условиях стендовых испытаний и при работе на плазменной установке в течение более двух лет. Максимальный ток ионного пучка 5 А при энергии 50 кэВ и длительности импульса 50 мс. Пучок сфокусирован на расстоянии 4м от источника, где имеет поперечный размер (диаметр) $\sim 75 - 80$ мм, что соответствует расходимости $\sim 0.5^{\circ}$. Пучок может быть модулирован с частотой до 500 Гц. В таблице представлены основные характеристики пучка.

Таблица

Энергия частиц пучка	50 кэВ
Ионный ток пучка	до 5 А
Длительность импульса	50 мс
Плотность ионного тока плазменного эмиттера	100-130 мА/см ²
Фокусное расстояние	4м
Состав плазмы эмиттера (H^+ , H_2^+ , H_3^+)	77:11:12 %
Расходимость пучка	$\sim 0.5^{\circ}$
Плотность тока атомарного пучка в фокусе	~ 50 экв. мА/см ²

Инжектор с 2002 г. используется на установке Alcator C-Mod (MIT, США) для активной штарковской спектроскопии плазмы. Также предполагается использование инжектора для измерения ионной температуры и профиля плотности примесей.

Авторы благодарят за частичную поддержку данной работы через проект WTZ # RUS 01/582.

Литература

1. В.И.Давыденко, Г.И.Димов, И.И.Морозов, Г.В.Росляков, “Многоамперный импульсный источник протонов”, ЖТФ, 1983, т.53, с.258-263
2. В.И.Давыденко, И.И.Морозов, Г.В.Росляков, “Протонный источник инжектора атомов установки АМБАЛ”, ПТЭ, 1986, №6, с.39-42
3. Е.Д.Бендер, С.А.Вибе, В.И.Давыденко, Г.И.Димов, Ю.В.Коваленко, В.Я.Савкин, Г.И.Шульженко, “Диагностические инжекторы пучков быстрых атомов водорода ДИНА-6 и ДИНА-7”, ПТЭ, 1996, №6, с.78-81.
4. G.F.Abdrashitov, V.I.Davydenko, P.P.Deichuli, D.J.Den Hartog, G.Fiksel, A.A.Ivanov, S.A.Korepanov, S.V.Murakhtin, and G.I.Shulzhenko, "A diagnostic neutral beam system for the MST reversed-field pinch" Rev. Sci. Instr., 2001, v.72, N1, p. 594-597
5. P.Spaedtke, Ing. Buro fur Naturwissenschaft und Programmentwicklung, AXCEL code, Junkernstrasse 99, D-65205 Wiesbaden, Germany.
6. V.I.Davydenko, A.A.Ivanov, A.I.Rogozin, R.Uhlemann, “Optimization of an ion-optics system with “thick” electrodes for the diagnostic neutral beam injector of the TEXTOR tokamak”, Rev. Sci. Instr., 1997, v.68, N3, p. 1418-1422.
7. A.Beklemishev, V.Davydenko, A.Ivanov, A.Podyminogin, “Assessment of thermo-mechanical stresses and stability of ion-source grids with peripheral cooling”, Rev. Sci. Instr., **69**, (1998), No. 5., p.2007
8. A.A.Ivanov, P.P.Deichuli, A.Kreter, V.V.Maximov, A.A.Podmingin, B.Schweer, I.V.Shikhovtsev, N.V.Stupishin, R.Uhlemann, D.V.Usoltsev. Characterization of Ion Species Mix of the Textor Diagnostic Hydrogen Beam Injector with an RF and Arc-discharge Plasma Box. Preprint Budker INP 2002-41, Novosibirsk, 2002, 15p.