

## ИОННЫЕ И ПЛАЗМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ

УДК 333.9.004.14, 537.525.9

### ПЛАЗМЕННЫЙ ЭМИТТЕР НА ОСНОВЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА

© 2002 г. А. А. Иванов, И. В. Шиховцев, А. А. Подыминогин, И. И. Авербух, Т. Д. Ахметов,  
В. И. Давыденко, П. П. Дейчули

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

Поступила в редакцию 31.08.2001 г.

В ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск) разработан инжектор атомов водорода, предназначенный для диагностики плазмы в современных термоядерных установках. Ионный источник диагностического инжектора обеспечивает формирование пучка протонов (ионов гелия) с током до 2 А (1 А), энергией до 55 кэВ, угловой расходимостью ~0.6 градуса и длительностью до 10 с. Данная работа посвящена описанию одной из основных частей ионного источника – плазменному эмиттеру на основе высокочастотного разряда. Диаметр эмиттера – 72 мм, плотность ионного тока эмиттера составляет 120 мА/см<sup>2</sup> с неоднородностью ±6%. Пучок формируется четырехэлектродной ионно-оптической системой со 163 круглыми отверстиями. Состав ионного пучка (по току) при 2 А: 67% протонов, 18% ионов Н<sub>2</sub><sup>+</sup> и 15% ионов Н<sub>3</sub><sup>+</sup>, общий выход более тяжелых ионов в пучке не превышает 2–3%.

#### ВВЕДЕНИЕ

Для активной корпускулярной диагностики примесей в крупных термоядерных установках широкое применение нашла инъекция пучков атомов водорода (дейтерия). Требуемая величина тока пучка зависит от конкретной диагностики и параметров плазмы. В большинстве случаев достаточно иметь эквивалентный ток атомов в несколько ампер при энергии частиц ~50 кэВ [1–3]. Для получения ионных пучков с током до 2.5 А и длительностью до 10 с нами разработан плазменный эмиттер на основе высокочастотного (ВЧ) разряда.

Конструкция плазменного эмиттера описана в разд. 1. Детальное описание ионного источника представлено в работах [4–7]. В разд. 2 приведены результаты исследования генерации плазмы в ВЧ-эмиттере и оптимизации его параметров для прецизионного формирования ионного пучка, описаны результаты зондовых измерений температуры и плотности плазмы. Разд. 3 содержит данные по относительному содержанию ионов в пучке извлекаемом из эмиттера пучка ионов. Разд. 4 посвящен обсуждению полученных результатов в сравнении с численной моделью плазменного эмиттера.

#### 1. ПЛАЗМЕННЫЙ ВЧ-ЭМИТТЕР

Общий вид газоразрядной камеры, в которой создается плазменный эмиттер, схематически показан на рис. 1. Цилиндрическая часть газоразрядной камеры / изготовлена из керамики (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и имеет толщину стенок 4 мм. Рабочий газ (водород или гелий) подается в камеру через отверстие

в охлаждаемом водой торцевом медном фланце. Подача газа производится через гибкий диэлектрический капилляр с внутренним диаметром 0.6–0.8 мм, что позволяет изолировать импульсный клапан для напуска газа от газоразрядной камеры, находящейся под высоким (до 55 кВ) потенциалом. Для поддержания достаточно большого давления в капилляре во время рабочего импульса на выходе из него располагалась диафрагма с отверстием 0.05 мм в диаметре, что предотвращает высоковольтный пробой, который происходит при давлении в капилляре ≤0.5 атм. В качестве импульсного клапана использовался контроллер фирмы MKS (Япония), который позволял устанавливать поток до 2.5 л Тор/с с точностью 0.5%. Измеренное время установления потока с учетом задержки из-за течения через капилляр ~0.5–1 с.

Высокочастотный разряд возбуждался на частоте 4.65 МГц при помощи внешней антенны 3. Антенна представляет собой катушку, намотанную на фторопластовом каркасе проводом ПЭВ-1 в пять параллельных нитей. Высокочастотная мощность подавалась к антенне через масляный разделительный трансформатор.

Разряд зажигался в камере при подаче ВЧ-напряжения на антенну и срабатывании поджига. Поджиговое устройство располагалось на заднем фланце и состояло из двух коаксиальных электродов, разделенных керамическим изолятором. Для надежного иницирования ВЧ-разряда в широкой области давлений и напряжений на антенне между ними прикладывалось напряжение ~6 кВ, что приводило к пробую по поверхности изолятора.

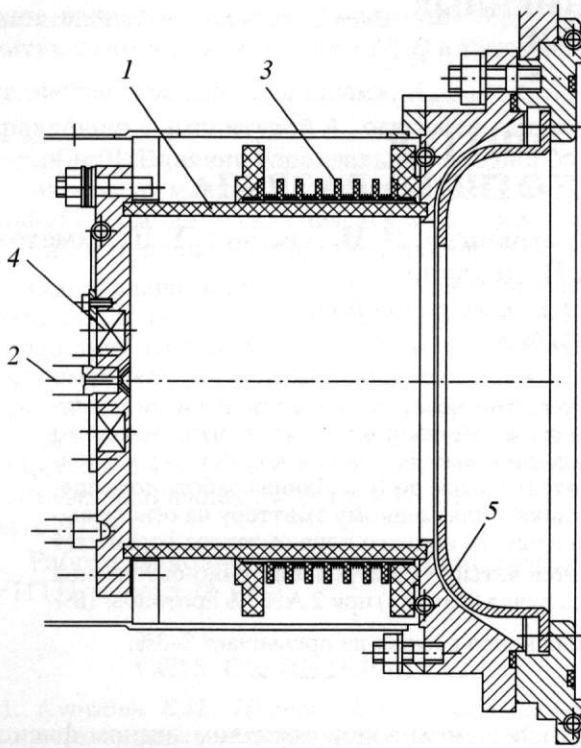


Рис. 1. Ионный источник: 1 – керамическая разрядная камера; 2 – подвод газа; 3 – антенна; 4 – постоянные магниты; 5 – плазменная сетка.

На заднем фланце газоразрядной камеры устанавливался набор постоянных магнитов 4. Их роль состоит, с одной стороны, в рассеивании потока обратных электронов, поступающих из ионно-оптической системы (ИОС) и тем самым в уменьшении плотности тепловых нагрузок на задний фланец, с другой – поле этих магнитов снижает поток плазмы на него, увеличивая энергетическую эффективность разряда. Обнаружено, что установка магнитов приводит к появлению определенной асимметрии профиля потока плазмы в плоскости плазменной сетки. Для снижения наблюдавшейся асимметрии были исследованы различные конфигурации магнитов. Ре-

зультаты этих исследований обсуждаются ниже в разд. 2.

На рис. 2 представлена схема подвода ВЧ-мощности к антенне, индуктивность которой составляла  $L_a = 4.8$  мкГн. Плазменная нагрузка для ВЧ-генератора может быть представлена пересчитанными к подводам антенны эквивалентными активным сопротивлением  $R_p$  и индуктивностью  $L_p$ . Согласно измерениям, нагрузка представляла собой в основном активное сопротивление, так как в режиме холостого хода генератора и с ВЧ-разрядом резонансная частота анодного контура изменялась незначительно – на 0.1–0.2 МГц. Характерное значение  $R_p \sim 900$  Ом. При работе эмиттера с номинальной плотностью тока 120 мА/см<sup>2</sup> амплитуда ВЧ-напряжения на антенне равна 2.4 кВ, а поглощаемая в разряде мощность составляла  $\sim 3$  кВт. Реактивный ток в антенне примерно равен 20 А.

Поглощаемая в разряде ВЧ-мощность определялась по напряжению на антенне и эквивалентному сопротивлению плазмы по формуле  $P = U^2/2R_p$ , где  $U$  – амплитуда напряжения на антенне,  $R_p$  – эквивалентное сопротивление плазмы. Эквивалентное сопротивление плазмы определялось в два этапа при работе ВЧ-генератора в режиме с внешним возбуждением. Настройка антенного контура в резонанс с частотой возбуждения устанавливалась по максимальному значению тока эмиттера. Первоначально измерялись ВЧ-напряжение на антенне с плазменной нагрузкой и амплитуда ВЧ-напряжения на входе оконечного каскада, настроенного в резонанс с частотой генератора. После этого в режиме без плазмы параллельно антенне подключалось активное сопротивление такой величины, при которой напряжение на антенне равнялось измеренному в режиме с плазмой. При этом амплитуда ВЧ-напряжения на входе оконечного каскада поддерживалась равной ранее измеренной, а частота возбуждения генератора устанавливалась равной резонансной частоте антенного контура. Настройка в резонанс определялась по максимальному значению ВЧ-напряжения на антенне. Подобранный таким образом сопротивление соответствовало эквивалентному сопротивлению плазмы.

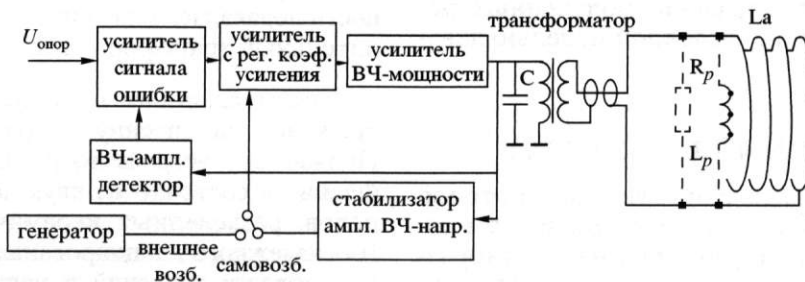


Рис. 2. Схема ВЧ-генератора.

Высокочастотный генератор для возбуждения тока в антенне представлял собой многокаскадный резонансный усилитель с выходной мощностью до 10 кВт. Устройство ВЧ-генератора позволяет работать в режиме с внешним возбуждением или с самовозбуждением. Режим с самовозбуждением оказался более предпочтителен, так как в этом случае при работе с плазмой автоматически происходила настройка генератора в резонанс, и в антенну передавалась максимальная мощность.

В генераторе была предусмотрена возможность работы в режиме с амплитудной модуляцией выходного ВЧ-напряжения. Это необходимо для увеличения и уменьшения плотности плазмы в эмиттере в течение рабочего импульса для восстановления работы источника после возможных электрических пробоев в ИОС или при модуляции пучка. Для исключения пробоев в ИОС во время нарастания высокого напряжения плотность ионного тока устанавливается на минимальном уровне, определяемом лишь условиями поддержания ВЧ-разряда. После установления напряжений на сетках ИОС плотность ионного тока увеличивается до номинального уровня. Время нарастания ВЧ-напряжения на антенне – меньше 100 мкс, что обеспечивает длительность фронта при формировании пучка из плазменного эмиттера менее 200 мкс. На рис. 3 приведена характеристическая осциллограмма тока пучка. Ступенька на переднем фронте сигнала соответствует току пучка при работе ВЧ-генератора на минимальном уровне мощности.

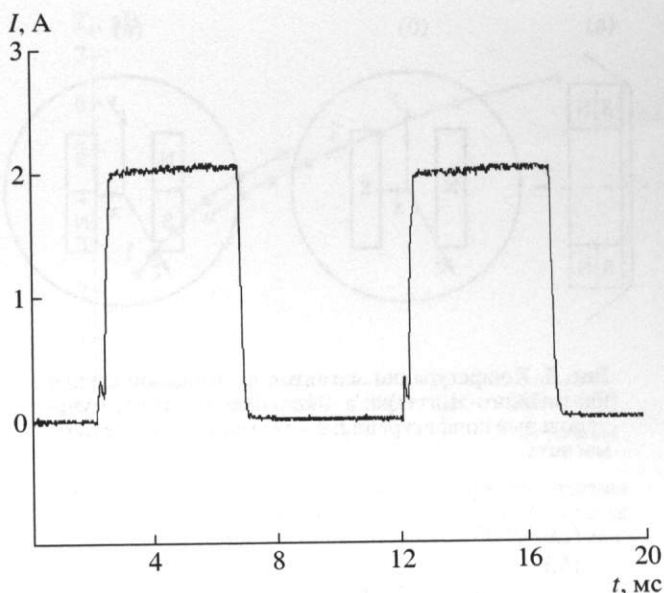


Рис. 3. Осциллограмма тока ионного пучка в режиме с модуляцией (0.5 А/дел; 2 мс/дел).

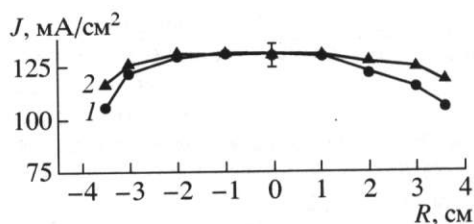


Рис. 4. Профили плотности ионного тока эмиттера: 1 – без магнитной стенки; 2 – с магнитной стенкой из четырех магнитов.

## 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЕННОГО ЭМИТТЕРА

Оптимизация характеристик плазменного эмиттера проводилась без формирования пучка ионов большой энергии. Для моделирования газовых условий, соответствующих работе эмиттера в ионном источнике, на его торце вместо плазменной сетки был установлен диск с отверстиями для ввода зондов. Суммарная площадь отверстий была близка к площади отверстий для извлечения пучка в плазменной сетке ИОС.

Профиль плотности ионного тока измерялся сеточным зондом, перемещавшимся в плоскости, где располагалась плазменная сетка. Профиль плотности тока и эффективность разряда существенно зависели от количества и формы магнитов, расположенных на торце газоразрядной камеры, а также их относительной ориентации и расстояния между ними. Было исследовано несколько вариантов конфигурации этих магнитов: кольцевой магнит с ярмом различной формы и мультипольные конфигурации из отдельных магнитов прямоугольной формы. Полученные профили тока сравнивались с реперным, измеренным в случае эмиттера без магнитов на задней стенке.

Профиль плотности тока в варианте без магнитов представлен рис. 4 (кривая 1) для поглощаемой в разряде мощности 6.2 кВт. Как видно из рисунка, средняя плотность тока по эмиттеру равна 120 мА/см<sup>2</sup> (полный ток 4.8 А), а неоднородность в пределах диаметра 72 мм составляет ±10%. Однородность эмиттера заметно улучшилась при установке на задний фланец газоразрядной камеры кольцевого магнита с железной накладкой (рис. 5а). В этом случае магнитное поле на поверхности магнита равно 850 Гс и спадает к плазменной сетке до ~20 Гс. Профиль плотности тока при этом имеет неоднородность около ±4%. В этом варианте при том же полном токе эмиттера поглощаемая в разряде мощность заметно меньше – 4.8 кВт.

Дальнейшее увеличение эффективности разряда (в полтора–два раза по сравнению с вариантом без магнитного поля) было достигнуто с магнитами мультипольной конфигурации. В первом варианте два магнита из SmCo<sub>5</sub> размером 12 × 9 × 40 мм с напряженностью магнитного поля на поверхности

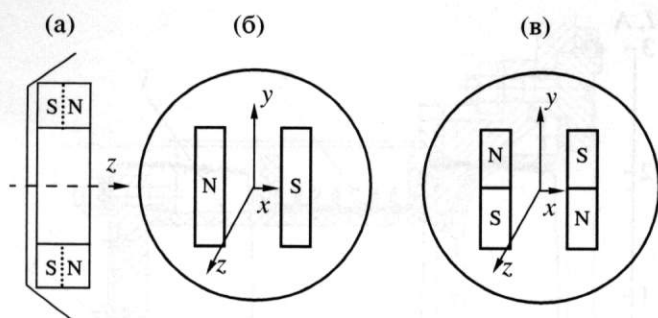


Рис. 5. Конфигурации магнитов на торцевой стенке плазменного эмиттера: а – кольцевой магнит; мультипольные конфигурации: б – два магнита, в – четыре магнита.

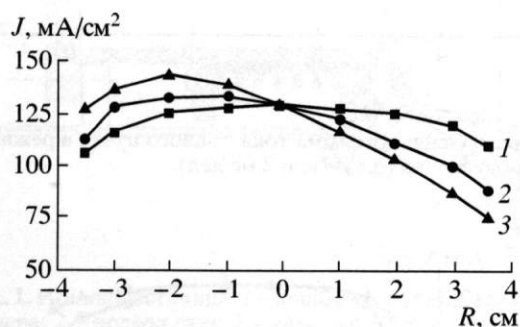


Рис. 6. Профили плотности ионного тока эмиттера с двумя магнитами на задней стенке: 1 –  $J(x)$ , 2 – по диагонали  $J((x+y)/\sqrt{2})$ ; 3 –  $J(y)$ .

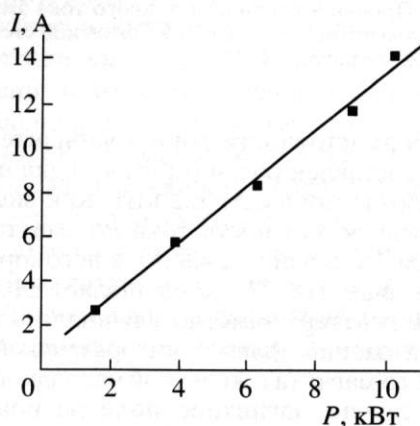


Рис. 7. Зависимость полного тока эмиттера от мощности, поглощаемой в разряде.

эмиттера увеличивается примерно на  $\sim 10\%$  при фиксированном напряжении на антенне). Соответственно, при напряжении на антенне 2.4 кВ ток ионного пучка увеличивается с 1.8 (четыре магнита) до 2 А (два магнита).

Хотя в варианте с двумя магнитами эффективность разряда несколько выше, чем с четырьмя, но при этом проявляется азимутальная асимметрия профиля плотности тока, а именно профиль плотности тока существенно различается в двух взаимно перпендикулярных направлениях – вдоль и поперек магнитов ( $x$  и  $y$  оси на рис. 5). Форма профиля вдоль оси  $y$  соответствует сдвигу плазмы как целого, что приводит к существенной неоднородности плотности тока по эмиттеру (рис. 6). Тем не менее при такой неоднородности ионный источник стабильно работает с ионным током 2 А (при энергии 50 кэВ). В варианте с четырьмя магнитами на торце профиль плотности тока эмиттера имеет заметно меньшую неоднородность –  $\pm 6\%$  (рис. 4, 2).

Численные расчеты постоянного магнитного поля показывают, что в варианте с четырьмя магнитами в плоскости плазменной сетки профиль модуля магнитного поля имеет достаточно хорошую азимутальную симметрию с провалом в центре и возрастанием к периферии плазменной камеры, где происходит удержание электронов плазмы. В этом случае спад плотности ионного тока к периферии меньше, чем в варианте без магнитного поля.

При работе эмиттера с плотностью тока 100–120  $\text{mA}/\text{cm}^2$  относительная величина неоднородности профиля остается практически постоянной (около  $\pm 6\%$ ) при изменении потока газа в разрядную камеру от 0.5 до 2.5 л Тор/с. Неоднородность также не менялась существенно при изменении мощности в довольно широком диапазоне (от 1.5 до 10 кВт и фиксированном потоке газа 2 л Тор/с).

Измеренная зависимость полного тока эмиттера от мощности, поглощаемой в разряде, оказалась практически линейной вплоть до 10 кВт (рис. 7). Активное эквивалентное сопротивление плазмы при этом изменяется незначительно (от 850 до 950 Ом при изменении потребляемой ВЧ-мощности от 1.5 до 10 кВт).

Согласно этим измерениям, в режиме с эквивалентным током атомов водорода 1 А (ток ионов  $\sim 2$  А) в разряде поглощается мощность  $\sim 3$  кВт. Для этого характерного режима работы эффективность эмиттера, определяемая как отношение полного ионного тока к мощности, поглощаемой в разряде, равна  $\sim 0.7$  А/кВт. Газовая эффективность (отношение тока ионного пучка к потоку молекул газа, подаваемого в газоразрядную камеру) в этом режиме составляла около 9%.

Одновременные измерения плотности и электронной температуры плазмы в газоразрядной

$\sim 3$  кГц были установлены, как показано на рис. 5б. Во втором варианте четыре магнита с такой же напряженностью поля на поверхности и размером  $12 \times 9 \times 20$  мм были установлены, как показано на рис. 5в.

Вариант эмиттера с двумя магнитами на торце оказался несколько эффективнее (полный ток

камере производились тройным ленгмюровским зондом [8]. Зонд имел три одинаковых близкорасположенных электрода в виде петель высотой 2 мм и шириной 1 мм из вольфрамовой проволоки  $\varnothing 0.1$  мм. Очистка рабочей поверхности зонда производилась перед каждым измерением с помощью прогрева зондовых петель током 330 мА до температуры  $\sim 1000^\circ\text{C}$  в течение 1 мин.

При номинальных параметрах ВЧ-разряда, соответствовавших плотности тока эмиттера  $120 \text{ мА/см}^2$ , вблизи плазменной сетки на оси электронная температура была 5 эВ, а в центре камеры под антенной (на расстоянии 23 мм от плазменной сетки) электронная температура равнялась 6 эВ. В этом случае в центральной части плазменной камеры под антенной плотность ионного тока насыщения была равна  $300 \text{ мА/см}^2$  и плотность плазмы составляла  $1.3 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

Измерения тройным зондом дают величину электронной температуры в центре под антенной  $\sim 6$  эВ. Заметим, что температура, полученная в тех же условиях по вольт-амперной характеристике двойного зонда, несколько выше:  $\sim 8$  эВ. Это отличие, по-видимому, может быть связано с отличием электронной функции распределения от максвелловского. Измерения зондами показывают незначительное уменьшение ( $\sim 1$  эВ) электронной температуры по радиусу от центра к периферии вблизи плазменной сетки, а под антенной, наоборот, некоторое увеличение ( $\sim 1$  эВ).

С помощью баратрона, установленного на задней стенке разрядной камеры, измерялось давление газа в течение разряда. При потоке водорода в разряд 2 л Тор/с оно составляло 0.6 мТор. Данные этих измерений позволяют сделать грубую оценку степени ионизации плазмы, если принять, что температура газа и плазмы одинакова и постоянна по объему. Принимая температуру  $\sim 6$  эВ, получим, что плотность нейтральных частиц  $\sim 7 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Соответственно, если принять плотность ионов  $n_i \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , степень ионизации в разряде может быть оценена как  $\sim 1.5\%$ .

Было отмечено, что электронная температура плазмы растет при увеличении поглощаемой в разряде ВЧ-мощности. В качестве иллюстрации на рис. 8 представлена зависимость температуры плазмы от плотности ионного тока насыщения на оси камеры вблизи плазменной сетки (кривая 1) и на расстоянии 23 мм от плазменной сетки (кривая 2). Измерения производились тройным зондом. В плоскости плазменной сетки при изменении плотности ионного тока от 40 до  $120 \text{ мА/см}^2$  электронная температура увеличивается от 2.5 до 4.5 эВ. В этих же условиях увеличение потока газа в разрядную камеру от 0.5 до 2.5 л Тор/с не приводит к заметному изменению электронной температуры.

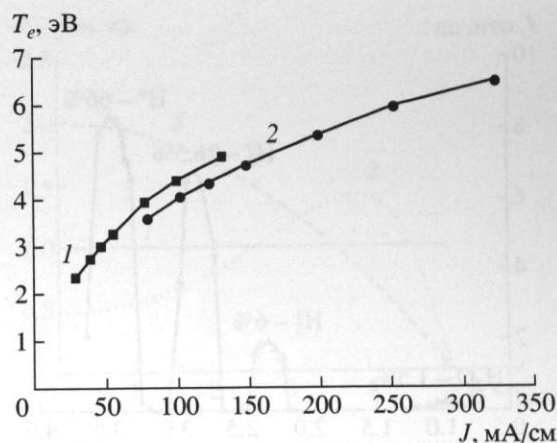


Рис. 8. Зависимость электронной температуры плазмы от плотности ионного тока (на оси камеры): 1 – вблизи плазменной сетки; 2 – на расстоянии 23 мм от плазменной сетки.

### 3. СОСТАВ ИОННОГО ПУЧКА

Для измерений состава ионного пучка, извлекаемого из плазменного эмиттера, использовался магнитный масс-анализатор. Масс-анализатор был установлен на оси на расстоянии 5 м от ионного источника. Небольшая часть пучка вырезалась в нем диафрагмой и проходила далее через равновесную гелиевую мишень. В газовой мишени происходил развал молекулярных ионов  $\text{H}_2^+$  и  $\text{H}_3^+$  на протоны и атомы водорода с энергиями соответственно  $1/2$  и  $1/3$  от полной энергии пучка  $E_b$ . После газовой мишени 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  $E_b$ ,  $E_b/2$  и  $E_b/3$ . Также наблюдался пик с энергией  $\sim (1/18)E_b$ , который обусловлен медленными ионами водорода, образующимися в результате диссоциации водородосодержащих ионов примесей ( $\text{OH}^+$ ,  $\text{H}_2\text{O}^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ ).

На рис. 9 приведена характерная зависимость тока на коллектор от магнитного поля в масс-анализаторе, измеренная за серию импульсов, в которых магнитное поле изменялось от импульса к импульсу. Энергия пучка в этих измерениях составляла 50 кэВ, ток – 1.7 А, поток водорода в источник – 1 л Тор/с. Доля соответствующих фракций в ионном пучке определялась с учетом равновесного выхода для каждой энергии частиц (при энергиях 50 кэВ, 25 кэВ и 16.7 кэВ выход протонов равен, соответственно, 50%, 39%, 43%) и количества частиц в молекуле. Приведенному графику соответствует следующий состав пучка (по току): протонов – 66%, ионов  $\text{H}_2^+$  – 26,5%, ионов  $\text{H}_3^+$  – 6%, воды – 1.5%.

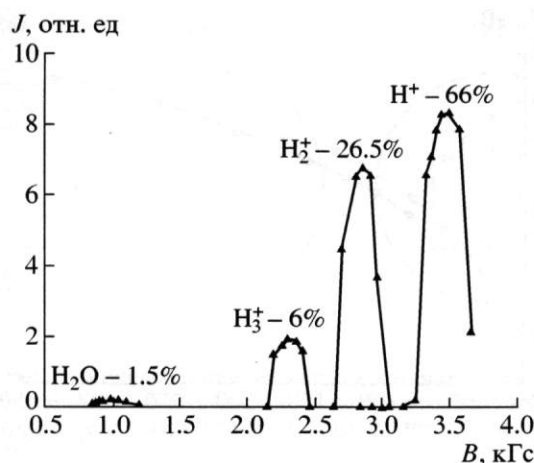


Рис. 9. Зависимость тока на коллектор масс-анализатора от магнитного поля.



Рис. 10. Относительное содержание ионов в пучке в зависимости от потока газа. 1 – 2 А, 2 – 1.7 А.

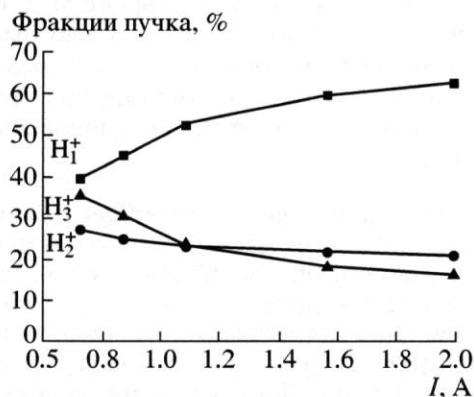


Рис. 11. Относительное содержание ионов в пучке в зависимости от тока при фиксированном потоке газа 2 л Тор/с.

Дальнейшие измерения показали, что количество тяжелых примесей (пик протонов с энергией  $\sim(1/18)E_b$  в масс-анализаторе) существенно зависит от режима работы плазменного эмиттера.

В частности, работа плазменного эмиттера в течение некоторого времени до формирования пучка (так называемый режим с предплазмой) эффективно уменьшает содержание примесей, содержащих кислород. Так, содержание воды уменьшалось с  $\sim 3$  до  $\sim 1.5\%$  при предварительном кондиционировании стенок газоразрядной камеры в разряде в течение 200 мс. Дальнейшее увеличение длительности очистки стенок камеры не приводит к заметному уменьшению содержания воды в пучке. По-видимому, в этом случае определенную роль играет процесс химического распыления керамической стенки [9], приводящий к генерации молекул воды на ее поверхности.

Интересно отметить, что состояние поверхности и концентрация воды оказывают также влияние на количество молекулярных ионов водорода в разряде, а именно при работе источника с предплазмой доля протонной компоненты с полной энергией уменьшается с 71 до 67% при токе пучка 2 А и потоке газа в источник 2 л Тор/с. По-видимому, это свидетельствует об увеличении рекомбинации на стенках при уменьшении количества воды на них [10].

Приводимые ниже результаты по измерению состава пучка получены с предварительным разрядом длительностью 200 мс. Измерения проводились через 10 мс после начала формирования пучка. Длительность пучка обычно составляла 20 мс. Для контроля была проведена серия импульсов с большей длительностью (200 мс). Состав пучка в импульсах большей длительности не изменился.

Для ионного пучка с током 1.7 и 2 А при энергии 50 кВ был измерен состав в зависимости от потока газа в газоразрядную камеру (рис. 10). При увеличении потока газа в источник с 1 до 2 л Тор/с количество  $H_1^+$  увеличивалось с 50 до 67%. Одновременно увеличивалась доля ионов  $H_3^+$  в пучке за счет уменьшения доли  $H_2^+$ . Это обстоятельство связано с увеличением вероятности процесса  $H_2^+ + H_2 \rightarrow H_3^+ + H_1$ , приводящего к гибели ионов  $H_2^+$  и генерации ионов  $H_3^+$ . Кроме того, повышение давления газа в плазменной камере ведет к понижению температуры в разряде. При этом скорость этой реакции значительно увеличивается [11].

На рис. 11 показана типичная зависимость содержания  $H_1^+$  от тока пучка. Как видно, с увеличением тока для протонов возрастает и заметно убывает доля  $H_3^+$ .

При использовании керамической камеры из  $Al_2O_3$  в исследованных режимах работы эмиттера максимальное содержание протонов было  $\sim 71\%$ . Высокочастотные плазменные источники с кварцевыми камерами позволяют получать пучки с

содержанием ионов  $H_1^+$  85–90% [12]. Причина более низкого содержания протонов при близких плотностях ионного тока в исследованном плазменном эмиттере не вполне понятна. Поскольку коэффициент поверхностной рекомбинации на керамике  $Al_2O_3$  мал и близок к значению для кварца [13], возможно, что заметную роль для данной геометрии газоразрядной камеры играет рекомбинация на металлической поверхности плазменной сетки и медного торцевого фланца.

#### 4. МОДЕЛЬ ПЛАЗМЕННОГО ВЧ-ЭМИТТЕРА

Для анализа экспериментальных данных использовалась следующая модель генерации плазмы в плазменном эмиттере. В расчетах плотности  $n_i(r, z)$  и потока ионов  $q_{iz}(r, z)$  предполагалось, что ионы рождаются во всем объеме плазмы внутри ВЧ-источника. Далее считалось, что ионы разлетаются изотропно от точки рождения, и длина свободного пробега много больше размеров разрядной камеры. Скорости ионов считались постоянными и равными друг другу, а на стенках ионы полностью поглощаются. Рождение ионов описывается функцией источников  $P(r, z)$ , которая задает число ионов, возникающих в единицу времени в единице объема с координатами  $(r, z)$  в результате ионизации водорода в камере электронным ударом.

В используемой модели прямолинейных траекторий ионов их плотность  $n_i(r, z)$  и поток  $q_{iz}(r, z)$  определяются интегралами от  $P(r, z)$  по всему объему камеры. Для сравнения результатов численных расчетов с экспериментальными профилями были рассмотрены три модельных распределения источников (рис. 12): 1) постоянный по радиусу; 2) с максимумом, расположенным на периферии; 3) с максимумом на оси. Для удобства сравнения распределения источников нормируются таким образом, чтобы полное число ионов, рождающихся в объеме камеры, было одинаковым во всех трех вариантах.

Профили плотности тока ионов на торце камеры, где формируется плазменный эмиттер, показаны на рис. 13. Цифры около кривых соответствуют различным распределениям источников ионов на рис. 12. Сравнивая форму вычисленных профилей плотности тока с измеренными, качественно можно сделать вывод, что распределение источников ионов, скорее всего, постоянно по радиусу.

Для расчета переменных ВЧ-полей в объеме плазмы использовался подход, аналогичный описанному в [14]. Использовалась модель аксиально-симметричной плазмы, помещенной в диэлектрическую камеру, окруженную многovitковой спиральной антенной. Разрядная камера и антен-

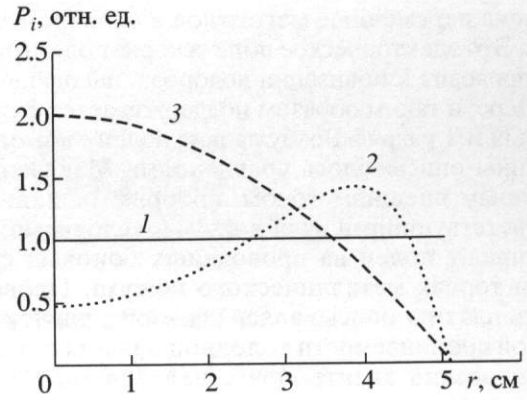


Рис. 12. Модельные распределения источников ионов ( $r = 5.1$  см — стенка).

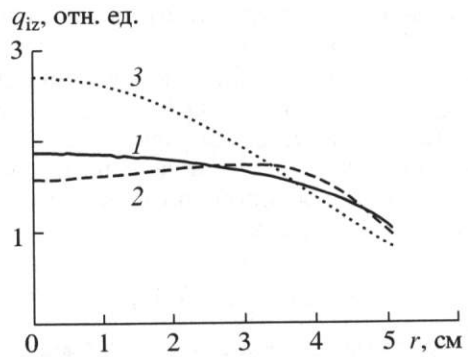


Рис. 13. Профили плотности тока ионов на эмиттере. Номера кривых соответствуют цифрам на рис. 12.

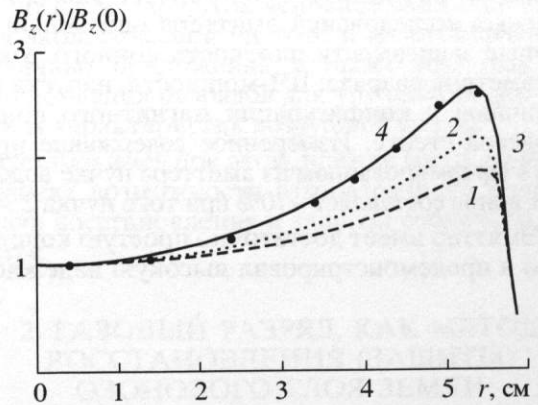


Рис. 14. Нормированные профили магнитного поля  $B_z(r)/B_z(0)$ : 1 — антенна в вакууме; 2 — антенна в бесконечно длинной проводящей трубе; 3 — антенна в трубе с торцами; 4 — измеренный профиль.

на были снаружи окружены цилиндрической металлической оболочкой, имеющей несколько отверстий и разрезов. Высокочастотные колебания тока и заряда в антенне генерируют в объеме ис-

точника переменные магнитное и электрическое поля. Это электрическое поле ускоряет электроны, что приводит к ионизации водорода, находящегося в камере, и таким образом поддерживается стационарный ВЧ-разряд. Возбуждение полей с помощью антенны описывалось уравнениями Максвелла с заданным внешним током, которые решались с соответствующими граничными условиями для компонент полей на проводящих боковых стенках и торцах металлического кожуха. Проводимость плазмы описывалась тензором диэлектрической проницаемости холодной плазмы с учетом столкновений электронов с нейтралами. Расчет проводился для реальной конфигурации с учетом внешнего проводящего металлического кожуха. Согласно расчетам, наличие этой сплошной проводящей оболочки радиусом 8 см вокруг антенны радиусом 5.8 см уменьшает переменное магнитное поле на оси примерно в 2 раза, поэтому учет этого ослабления важен.

Для сравнения нормированные измеренный и вычисленный профили  $B_z(r)$  представлены на рис. 14. Как видно, имеется хорошее согласие экспериментальных данных с модельными расчетами для антенны, окруженной сплошным металлическим кожухом с торцами.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный и исследованный плазменный эмиттер на основе ВЧ-разряда обеспечивает формирование однородной плазменной поверхности с плотностью ионного тока до  $350 \text{ mA/cm}^2$ , с неоднородностью не более  $\pm 6\%$  в круге диаметром 72 мм. В результате проведенных экспериментальных исследований эмиттера определены основные зависимости плотности ионного тока от параметров разряда: ВЧ-мощности, напуска газа, величины и конфигурации магнитного поля на торцевой стенке. Измеренное содержание протонов в сформированном из эмиттера пучке водородных ионов составляет  $\sim 70\%$  при токе пучка 2 А.

Эмиттер имеет достаточно простую конструкцию и продемонстрировал высокую надежность.

Одна из моделей проработала в течение двух лет в режиме вытягивания пучка с током 1.8 А при длительности 2 с. Всего было произведено около 20 тыс. импульсов без существенного ухудшения характеристик эмиттера. В дальнейшем предполагается на основе выбранной схемы разработать серию эмиттеров с различным диаметром.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крупник Л.И., Терёшин В.И. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. С. 157.
2. Hintz E., Schweer B. // Plasma Phys. Control. Fusion. 1995. V. 37. P. A87.
3. Roslyakov G.V. // Proc. Intern. School of Plasma Phys. 1982, September 6–17. Varenna (Italy). 1982. P. 311.
4. Shikhovtsev I.V., Abdrashitov G.F., Belkin V.S. et al. // Proc. XX Symp. on Fusion Techn. Marseille (France), September 7–11, 1998. V. 1. P. 605.
5. Shikhovtsev I.V., Abdrashitov G.F., Davydenko V.I. et al. // Proc. XXIV Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. Warsaw (Poland), July 11–16, 1999. V. III. P. 99.
6. Ivanov A.A., Davydenko V.I., Deichuli P. P. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2000. V. 71. № 10. P. 3728.
7. Shikhovtsev I.V., Abdrashitov G.F., Davydenko V.I. et al. // Proc. XXV Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. Nagoya (Japan), July 17–22, 2001. V. I. P. 329.
8. Залкин И.М., Павличенко О.С., Тарасенко В.П. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика плазмы и проблемы УТС. Вып. 2(4). Харьков: ХФТИ, 1975. С. 69.
9. Gruen D.M., Siskind B., Wright R.B. // J. Chem. Phys. 1976. V. 65. P. 363.
10. Spence D., McMichael, Lykke K.R. et al. // Rev. Sci. Instrum. 1996. V. 67. № 4. P. 1642.
11. Giese C.F., Maier W.B. // J. Chem. Phys. 1963. V. 39. P. 739.
12. Keller R., Spaudtke P., Nouhmayer F. // Proc. Intern. Ion Engineering Congr., Kyoto, Inst. Electr. Engineers of Japan. Tokyo, 1983. P. 39.
13. Габович М.Д. Физика и техника плазменных источников ионов. М.: Атомиздат, 1972. С. 30.
14. Kamenski I.V., Borg G.G. // Comput. Phys. Commun. 1998. V. 113. P. 1.