

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

ПЛАЗМЕННЫЙ ЭМИТТЕР НА ОСНОВЕ  
ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА

ИЯФ 2001-40

Новосибирск  
2001

Плазменный эмиттер  
на основе высокочастотного разряда

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. 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 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 сек. Данная работа посвящена описанию одной из основных частей ионного источника – плазменному эмиттеру на основе высокочастотного разряда. Диаметр эмиттера 72 мм, эмиссионная плотность ионного тока составляет 120 мА/см<sup>2</sup> с неоднородностью ±6%. Пучок формируется четырех-электродной ионно-оптической системой с 163 круглыми отверстиями. Состав ионного пучка при токе 2 А: 74% протонов, 13% ионов H<sub>2</sub><sup>+</sup> и 13% ионов H<sub>3</sub><sup>+</sup>, общий выход более тяжелых ионов в пучке не превышает 2–3%.

**Plasma emitter based on radio frequency discharge**

A.A.Ivanov, I.V.Shikhovtsev, A.A.Podminogin, I.I.Averbukh,  
A.D.Akhmetov, V.I.Davydenko, P.P.Deichuli

**Abstract**

An injector of hydrogen atoms was developed in the Budker INP (Novosibirsk) for plasma diagnostic in the modern tokamaks. The ion source of the diagnostic injector provides a proton (helium ion) beam with a current of up to 2A (1A), energy up to 55 keV, beam divergence ~0.6 degree and pulse duration up to 10 s. This work is devoted to the main part of the ion source – the plasma emitter based on a radio frequency discharge. The emitter diameter is 72 mm, the ion current density is 120 mA/cm<sup>2</sup> with homogeneity ±6%. The beam is formed by making use of four electrode ion optical system with 163 round holes. The beam species for the ion current 2 A: 74% protons, 13% H<sub>2</sub><sup>+</sup> and 13% H<sub>3</sub><sup>+</sup>, total abundance of heavy ions in the beam does not exceed 2–3%.

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

## 1. Введение

Для активной корпускулярной диагностики примесей в крупных термоядерных установках широкое применение нашла инжекция пучков атомов водорода (дейтерия). Оптимальная энергия частиц диагностического пучка зависит от конкретного используемого механизма его взаимодействия с плазмой. Так, для диагностики, основанной на регистрации излучения водородоподобных ионов углерода, образующихся в плазме из-за перезарядки атомов пучка на ионах  $C^{6+}$ , оптимальная энергия около 50 кэВ. Эта энергия также достаточно высока, чтобы обеспечить хорошее проникновение пучка в плазму с поперечным размером 0,5 – 1 м и средней плотностью  $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Именно такие параметры плазмы характерны для современных токамаков.

Следует отметить, что требуемые параметры диагностического пучка, такие как угловая расходимость, поперечный размер, плотность тока, разброс по энергии во многом являются специфическими, отличными, скажем, от требований, предъявляемым к пучкам для нагрева плазмы [1, 2]. Так, например, ток пучка и плотность тока, должны быть достаточно большими, чтобы обеспечить нужный уровень сигнала в регистрирующей системе, и, вместе с тем, диагностический пучок не должен возмущать плазму заметным образом. Эти требования удовлетворяются при токе атомарного пучка  $\sim 1 - 5 \text{ экв. А}$  и его поперечном размере в плазме  $\sim 10 \text{ см}$  [3].

Для формирования ионных пучков с током до 2,5 А и длительностью до 10 сек нами разработан плазменный эмиттер на основе высокочастотного (ВЧ) разряда.

Общая схема ионного источника и конструкция эмиттера описаны в разделе 1. Более детальное описание ионного источника представлено в работах [4–9]. В разделе 2 приведены результаты исследования генерации плазмы в ВЧ-эмиттере и оптимизации его параметров для прецизионного формирования ионного пучка. В разделе 3 описаны результаты зондовых измерений температуры и плотности плазмы. Раздел 4 содержит данные по массовому составу пучка. Раздел 5 посвящен обсуждению полученных результатов в сравнении с численной моделью плазменного эмиттера.

## 1. Плазменный ВЧ-эмиттер

Ионный источник [9] состоит из газоразрядной камеры, в которой создается плазменный эмиттер, и четырех-электродной ионно-оптической системы (ИОС), обеспечивающей формирование ионного пучка. Общий вид ионного источника на основе плазменного ВЧ-эмиттера схематически показан на рис.1. Цилиндрическая часть газоразрядной камеры (1) изготовлена из керамики ( $Al_2O_3$ ) 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 (2) 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  $\leq 0,5 \text{ атм}$ . В качестве импульсного клапана использовался контроллер фирмы MKS (Япония), который позволял устанавливать поток до 2,5 л-Торр/с с точностью 0,5%. Измеренное время установления потока с учетом задержки из-за течения через капилляр  $\sim 0,5 - 1 \text{ с}$ .

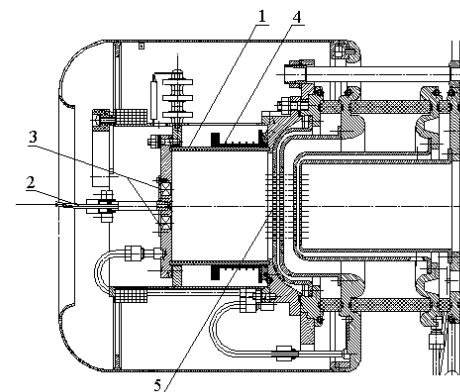


Рис. 1. Ионный источник: 1 – керамическая разрядная камера; 2 – подвод газа; 3 – постоянные магниты; 4 – антенна; 5 – сеточная система.

Высокочастотный разряд возбуждался на частоте 4,65 МГц при помощи внешней антенны (4). Антенна представляет собой шестивитковую 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 инициирования ВЧ-разряда в широкой области давлений и напряжений на антенне между ними прикладывалось напряжение около 6 кВ, что приводило к пробою по поверхности изолятора.

На заднем фланце газоразрядной камеры устанавливался набор постоянных магнитов. 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 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. Результаты этих исследований обсуждаются ниже в разделе 2.

Извлечение из плазмы и ускорение положительных ионов осуществлялось с помощью 4-х электродной ионно-оптической системы с 163 отверстиями диаметром 4 мм [5, 6]. Геометрия электродов ИОС и зазоры между ними оптимизированы для плотности тока  $120 \pm 12$  мА/см<sup>2</sup>.

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 эквивалентными активным сопротивлением  $R_p$  и индуктивностью  $L_p$  (здесь  $R_p$  и  $L_p$  пересчитаны к подводам антенны). 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 высокочастотного напряжения на антенне равна 2,4 кВ, а поглощаемая в разряде мощность составляла около 3 кВт. Реактивный ток в антенне примерно равен 20 А.

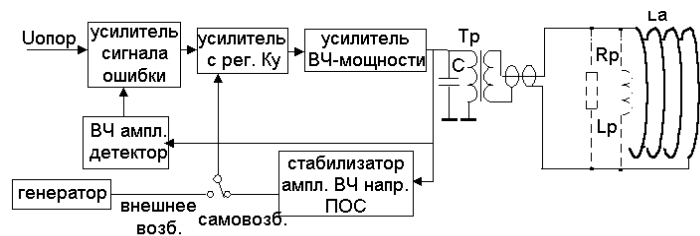


Рис. 2. Схема ВЧ-генератора.

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 котором 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. Подобранное таким образом сопротивление соответствовало эквивалентному сопротивлению плазмы.

ВЧ-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 эмиссионного 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 характерная осциллограмма тока пучка. Ступенька на переднем фронте сигнала соответствует току пучка при работе ВЧ-генератора на минимальном уровне мощности.

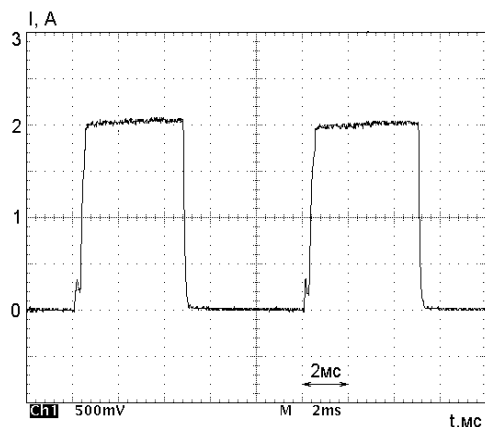


Рис. 3. Оциллограмма тока ионного пучка в режиме с модуляцией (0,5 А/дел; 2 мс/дел).

## 2. Профиль плотности тока 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. Были исследованы 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

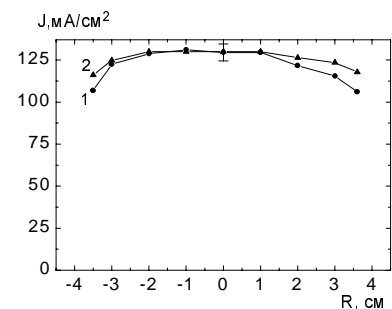


Рис. 4. Профили плотности ионного тока эмиттера: 1 – без магнитной стенки; 2 – с магнитной стенкой из четырех магнитов.

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 около 3 кГс были установлены, как показано на рис.5б. Во втором варианте четыре магнита с такой же напряженностью поля на поверхности и размером 12×9×20 мм были установлены, как показано на рис.5в.

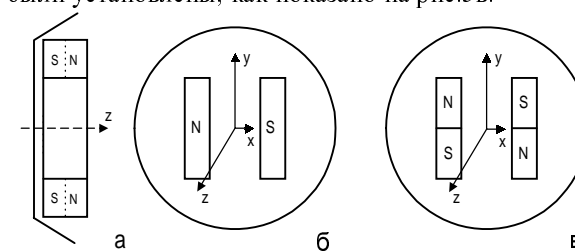


Рис. 5. Конфигурации магнитов на торцевой стенке плазменного эмиттера: а) кольцевой магнит; мультипольные конфигурации; б) два магнита; в) четыре магнита.

Расчетные профили модуля магнитного поля в газоразрядной камере для различных конфигураций магнитов показаны на рис.6–8. В варианте с двумя магнитами магнитное поле спадает от торца ( $Z = 0$ ) до 30 Гс в центре камеры, а далее вблизи плазменной сетки до ~5 Гс (рис.6, кривая 1). В случае четырех магнитов поле спадает вблизи сетки до ≤1 Гс (кривая 2).

На рис.7 и рис.8 приведены зависимости модуля магнитного поля от  $x$  и  $y$  в плоскости плазменной сетки в варианте, когда на торце плазменной камеры 2 и 4 магнита, соответственно. Видно, что в варианте с четырьмя

магнитами имеется достаточно хорошая аксиальная симметрия. Магнитное поле в центре на оси равно нулю и увеличивается к периферии плазменной камеры, где магнитное поле удерживает электроны плазмы. В этом случае спад плотности ионного тока к периферии меньше, чем в варианте без магнитного поля.

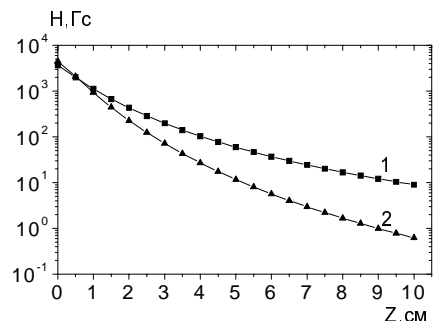


Рис. 6. Профиль магнитного поля вдоль оси эмиттера с двумя магнитами (1) и с четырьмя магнитами (2) на торце.

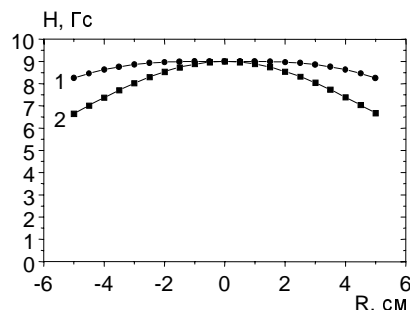


Рис. 7. Профиль магнитного поля в плоскости плазменной сетки (на торце плазменной камеры 2 магнита): 1 –  $H(x)$ , 2 –  $H(y)$ .

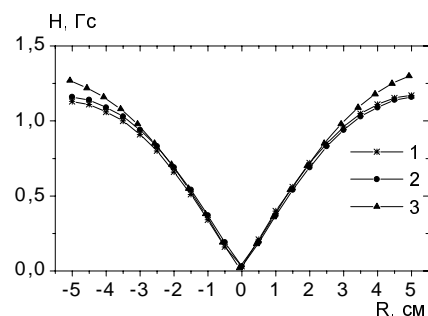


Рис. 8. Профиль модуля магнитного поля в плоскости плазменной сетки (на торце плазменной камеры 4 магнита): 1 –  $H(x)$ , 2 –  $H(y)$ , 3 – по диагонали  $H((x+y)/\sqrt{2})$ .

Вариант эмиттера с двумя магнитами на торце оказался несколько эффективнее (полный ток 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 А (четыре магнита) до 2 А (для двух магнитов).

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.9). 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).

При работе эмиттера с плотностью тока  $100 - 120 \text{ mA/cm}^2$  относительная величина неоднородности профиля остается практически постоянной (около  $\pm 6\%$ ) при изменении потока газа в разрядную камеру от 0,5 до 2,5 л·Торр/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·Торр/с).

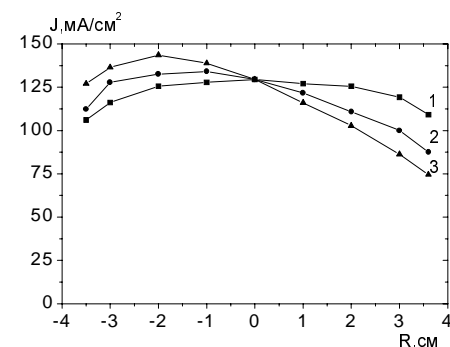


Рис. 9. Профили плотности ионного тока эмиттера с двумя магнитами на задней стенке: 1 –  $J(x)$ , 2 – по диагонали, 3 –  $J(y)$ .

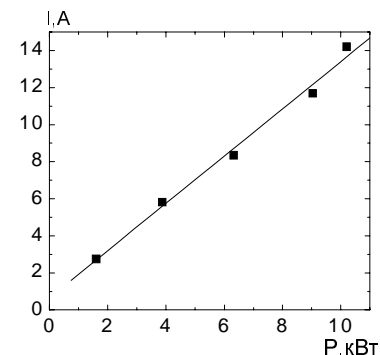


Рис. 10. Зависимость полного тока эмиттера от мощности, поглощаемой в разряде.

Измеренная зависимость полного тока эмиттера от мощности, поглощаемой в разряде, оказалась практически линейной вплоть до 10 кВт (рис.10). Активное эквивалентное сопротивление плазмы при этом незначительно изменяется (от 850 Ом 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 около 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  $\sim 0,7 \text{ A/kW}$ . Полученная эффективность плазменного эмиттера близка к эффективности эмиттеров на основе диффузионного дугового разряда [11, 12, 13]. Газовая эффективность (отношение тока ионного пучка к потоку молекул газа, подаваемого в газоразрядную камеру) в этом режиме составляла около 9%.

### 3. Зондовые измерения электронной температуры и плотности плазмы

Одновременные измерения плотности и электронной температуры плазмы в газоразрядной камере производились тройным ленгмюровским зондом [14]. Зонд имел три одинаковых близко расположенных электрода в виде петель высотой 2 мм и шириной 1 мм из вольфрамовой проволоки диаметром 0,1 мм. Очистка рабочей поверхности зонда производилась перед каждым измерением с помощью прогрева зондовых петель током 330 мА до температуры около 1000°C в течение 1 минуты.

При номинальных параметрах ВЧ-разряда, соответствовавших плотности тока эмиттера 120 мА/см<sup>2</sup>, 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 мА/см<sup>2</sup> и плотность плазмы составляла  $1,3 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup>. Плотность ионного тока насыщения измерялась также подвижными ленгмюровским и сеточным зондами. Для сравнения на рис.11 показаны радиальные профили плотности ионного тока, измеренные этими двумя зондами в плоскости плазменной сетки. Профиль (3) измерен под антенной возбуждения на расстоянии 23 мм от плазменной сетки с помощью ленгмюровского зонда. Как видно, показания обоих зондов в плоскости плазменной сетки совпадают с точностью ~20%.

С помощью баратрона, установленного на задней стенке разрядной камеры, измерялось давление газа в течение разряда. При потоке водорода в разряд 2 л·Торр/с оно составляло 0,6 мТорр. Данные этих измерений позволяют сделать грубую оценку степени ионизации плазмы, если принять, что температура газа и плазмы одинакова и постоянна по объему. Принимая температуру ~6 эВ, получим, что плотность нейтральных частиц  $\sim 7 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>. Соответственно, если принять  $n_i \sim 10^{12}$  см<sup>-3</sup>, степень ионизации в разряде может быть оценена как ~1,5%.

На рис.12 представлен радиальный профиль электронной температуры, измеренный в плоскости плазменной сетки и под антенной. Измерения проводились при тех же условиях, в которых измерялись профили ионного тока насыщения, представленные на рис.11.

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

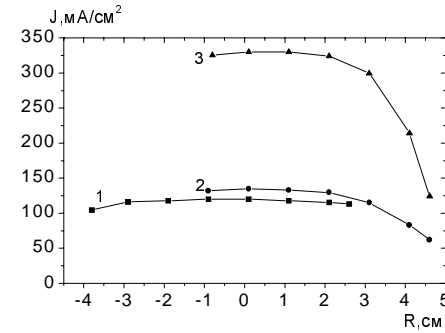


Рис. 11. Радиальные профили плотности ионного тока: (1) – сеточный зонд и (2) – ленгмюровский зонд в плоскости плазменной сетки; (3) – ленгмюровский зонд на расстоянии 23 мм от плазменной сетки .

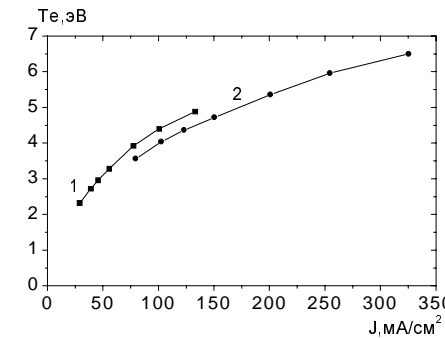


Рис. 13. Зависимость электронной температуры плазмы от плотности ионного тока (на оси камеры): 1 – вблизи плазменной сетки; 2 – на расстоянии 23 мм от плазменной сетки..

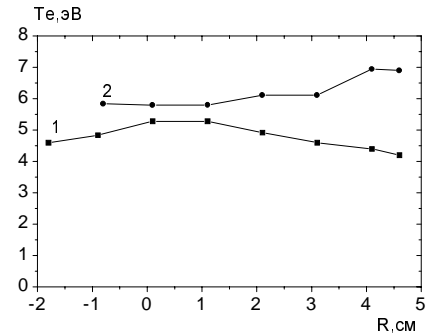


Рис. 12. Радиальные профили электронной температуры плазмы: 1 – вблизи плазменной сетки; 2 – на расстоянии 23 мм от плазменной сетки.

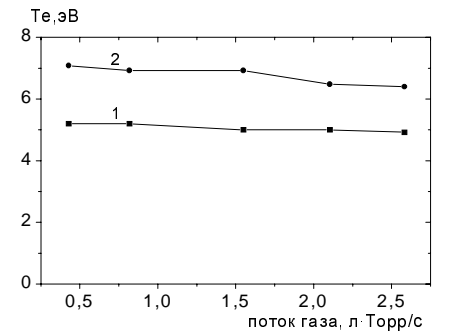


Рис. 14. Зависимость электронной температуры плазмы (на оси камеры) от потока газа: 1 – вблизи плазменной сетки; 2 – на расстоянии 23 мм от плазменной сетки.

Было отмечено, что электронная температура плазмы растет при увеличении поглощаемой в разряде ВЧ-мощности. В качестве иллюстрации, на рис.13 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 мА/см<sup>2</sup> электронная температура увеличивается от

2,5 эВ до 4,5 эВ. В этих же условиях увеличение потока газа в разрядную камеру от 0,5 до 2,5 л·Торр/с не приводит к заметному изменению электронной температуры (рис.14).

О степени диссоциации газа в газоразрядной камере можно было судить по измерениям интенсивности линии  $H_{\alpha}$ . Для этого через заднюю стенку в ВЧ-камеру на радиусе 30 мм вводился оптический световод, по которому свет поступал в монохроматор МДР. Характерная зависимость интенсивности излучения от поглощаемой мощности показана на рис.15. Как видно, измеренная таким образом интенсивность излучения  $H_{\alpha}$  как и полный ток эмиттера, прямо пропорциональна поглощаемой мощности.

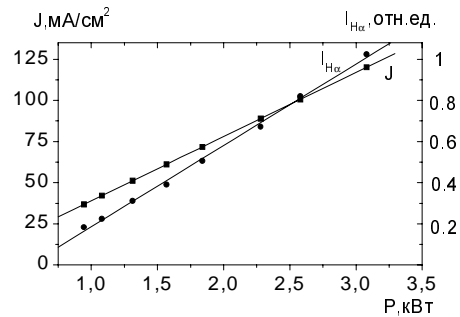


Рис. 15. Зависимость интенсивности излучения линии  $H_{\alpha}$  и плотности тока от поглощаемой в разряде мощности.

#### 4. Массовый состав ионного пучка

Для измерений массового состава ионного пучка, извлекаемого из плазменного эмиттера, использовался магнитный масс-анализатор (рис.16). Масс-анализатор был установлен на оси на расстоянии 5 м от ионного источника. Небольшая часть пучка вырезалась в нем диафрагмой (1) и проходила далее через равновесную гелиевую мишень (2). В газовой мишени происходил развал молекулярных ионов  $H_2^+$  и  $H_3^+$  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 водовода, образующимися в результате диссоциации водородосодержащих ионов примесей ( $OH^+$ ,  $H_2O^+$ ,  $H_3O^+$ ).

На рис.17 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

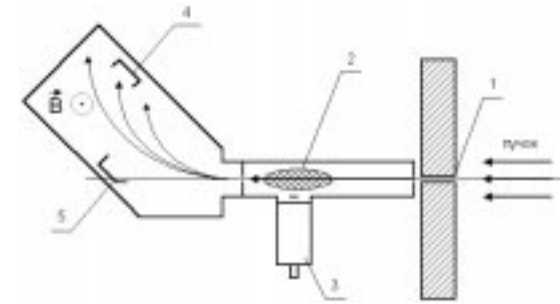


Рис. 16. Схема магнитного масс-анализатора: 1 – диафрагма, 2 – гелиевая мишень, 3 – импульсный клапан газовой мишени, 4–5 – коллекторы.

этих измерениях составляла 50 кэВ, ток – 1,7 А, поток водорода в источник 1 л·Торр/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%, 40%, 43%) и количества частиц в молекуле. Приведенному графику соответствует следующий состав пучка: протонов – 66,4%, ионов  $H_2^+$  – 26,9%, ионов  $H_3^+$  – 5,3%, воды – 1,4%.

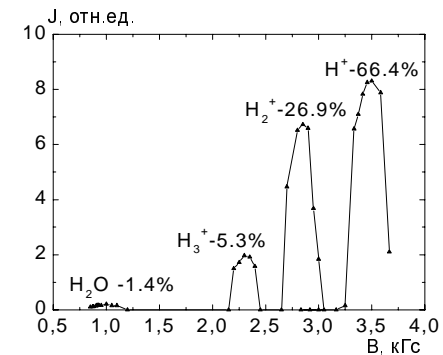


Рис. 17. Зависимость тока на коллектор масс-анализатора от магнитного поля.

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, включение и работа плазменного эмиттера в течение некоторого времени до формирования пучка (т.н. режим с предплазмой) эффективно уменьшает содержание примесей, содержащих кислород. Так, содержание воды уменьшалось с  $\sim 3\%$  до

~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 [15], приводящий к генерации молекул воды на ее поверхности.

Интересно отметить, что состояние поверхности и концентрация воды оказывает также влияние на количество молекулярных ионов водорода в разряде. А именно, при работе источника с предплазмой доля протонной компоненты с полной энергией уменьшается с 74% до 70% при токе пучка 2 А и потоке газа в источник 2 л·Торр/с. По-видимому это свидетельствует об увеличении рекомбинации на стенках при уменьшении количества воды на них [16].

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

Для ионного пучка с током 1,7 А и 2 А при энергии 50 кВ был измерен состав в зависимости от потока газа в газоразрядную камеру (рис.18). При увеличении потока газа в источник с 1 л·Торр/с до 2 л·Торр/с количество  $H_1^+$  увеличивалось с 60% до 70%. 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 [17]. При использовании керамической камеры из  $Al_2O_3$  в исследованных режимах работы эмиттера максимальное содержание протонов было ~74%. Высокочастотные плазменные источники с кварцевыми камерами позволяют получать пучки с содержанием ионов  $H_1^+$  85–90% [18]. 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 [19], возможно, что заметную роль для данной геометрии газоразрядной камеры играет рекомбинация на металлических поверхностях сеток и медного торцевого фланца.

На рис.19 показана типичная зависимость содержания  $H_1^+$  от тока пучка. Как видно, с увеличением тока для протонов возрастает и заметно убывает доля  $H_3^+$ .

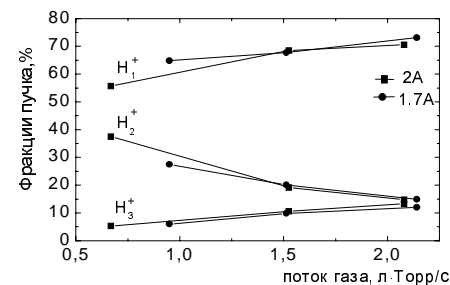


Рис. 18. Массовый состав водородного пучка в зависимости от потока газа.

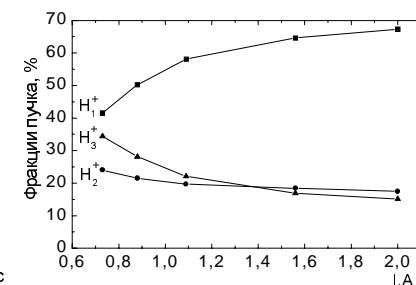


Рис. 19. Массовый состав водородного пучка в зависимости от тока при фиксированном потоке газа 2 л·Торр/с.

Для предотвращения распыления керамической плазменной камеры и снижения тепловых нагрузок на нее были испытаны два типа фарадеевских экранов. Первый представляет собой цилиндр из меди толщиной 2 мм с 16 продольными щелями шириной также 2 мм. Измерения показали, что при установке такого экрана эффективность разряда уменьшается примерно в два раза по сравнению с плазменной камерой без экрана. В другой версии экрана внутренняя стенка камеры была частично закрыта изолированными медными пластинами толщиной 0,2 мм, размером  $15 \times 15$  мм<sup>2</sup> с зазором между ними 5 мм. Пластины экрана либо приклеивались к керамике, либо наносились на поверхность керамики через специальную маску с помощью распыления медного электрода в дуговом разряде [20]. Такой экран снижает энергетическую эффективность разряда в 1,5 раза. Для этого варианта экрана в пределах точности измерений не было замечено изменения массового состава по сравнению с вариантом без экрана, при тех же значениях плотности тока ионов.

## 5. 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 было рассмотрено три модельных распределения источников (рис.20): 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.21. Цифры около кривых соответствуют различным распределениям источников ионов на рис.20. Сравнивая форму вычисленных профилей плотности тока с измеренными, качественно можно сделать вывод, что распределение источников ионов, скорее всего, постоянно по радиусу.

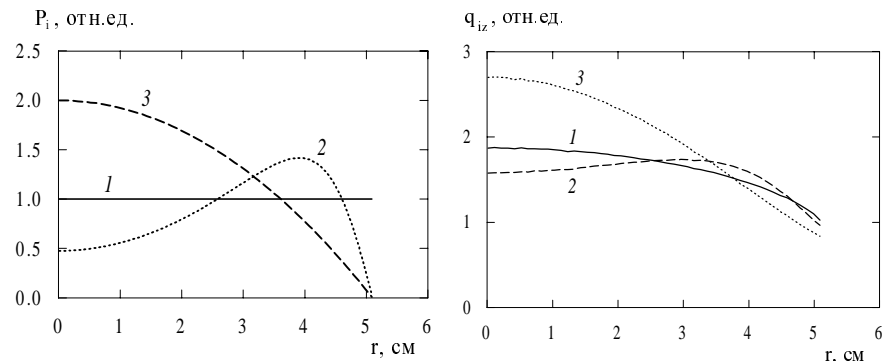


Рис. 20. Модельные распределения источников ионов ( $r = 5,1$  см – стенка).

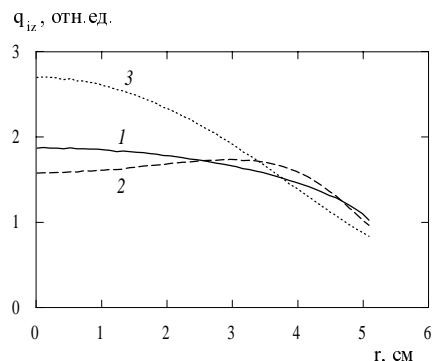


Рис. 21. Профили плотности тока ионов на эмиттере. Номера кривых соответствуют цифрам на рис.20.

Для расчета переменных ВЧ-полей в объеме плазмы использовался подход, аналогичный описанному в [21]. Использовалась модель аксиально-симметричной плазмы, помещенной в диэлектрическую камеру, окруженную многovitковой спиральной антенной. Разрядная камера и антенна были снаружи окружены цилиндрической металлической оболочкой, имеющей несколько отверстий и разрезов. ВЧ-колебания тока и заряда в антенне генерируют в объеме источника переменное магнитное и электрические поля. Это электрическое поле ускоряет электроны, что приводит к иониза-

ции 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 два раза (ср. кривые 1 и 2 на рис.22(а)), поэтому учет этого ослабления важен.

Для сравнения нормированные измеренный и вычисленный профили  $B_z(r)$  представлены на рис.22(б). Как видно, имеется хорошее согласие экспериментальных данных с модельными расчетами для антенны, окруженной сплошным металлическим кожухом с торцами.

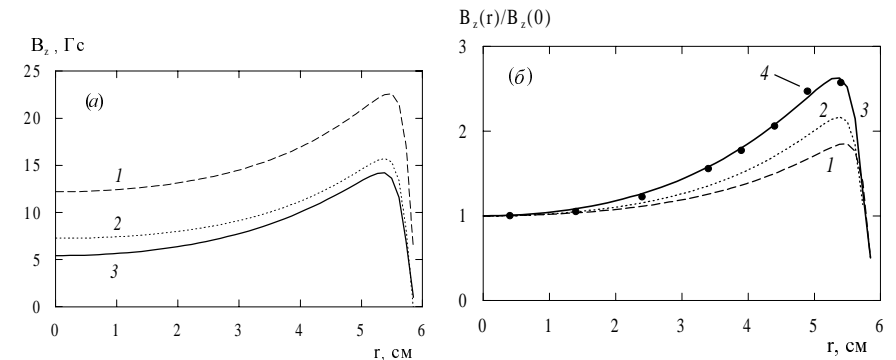


Рис. 22. (а) Профиль магнитного поля в средней плоскости антенны с током 20 А; (б) нормированные профили  $B_z(r)/B_z(0)$ .

1 – антенна в вакууме; 2 – антенна в бесконечно длинной проводящей трубе, 3 – антенна в трубе с торцами; 4 – измеренный профиль.

## Заключение

Разработанный и исследованный плазменный эмиттер на основе ВЧ-разряда обеспечивает формирование однородной плазменной поверхности с эмиссионной плотностью 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 эмиссионных характеристик 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 ~70% при токе пучка 2 А.

Эмиттер имеет достаточно простую конструкцию и продемонстрировал высокую надежность. Достигнутый к настоящему времени ресурс работы эмиттера составляет ~50 тыс.с. В дальнейшем предполагается на основе выбранной схемы разработать серию эмиттеров с различным диаметром эмиссионной поверхности.

## Литература

- [1] *Крунник Л.И., Терёшин В.И.* Физика плазмы. 1994. Т.20. №2. С.157–170.
- [2] *Hintz E. and Schweer B.* Plasma Phys. Control. Fusion. 1995. V.37. A87–A101.
- [3] *Roslyakov G.V.* In: Proc. International School of Plasma Phys. 1982, September 6–17, Varenna, Italy, P.311–323.
- [4] *Davydenko V.I. et al.* Proc. 18th Symp. Fusion Techn. Karlsruhe. Germany. 1994. P.601.
- [5] *Davydenko V.I., Ivanov A.A., Rogozin A.I., Uhlemann R.* Rev. Sci. Instrum. 1997. V.68. №3. P.1418–1422.
- [6] *Beklemishev A., Davydenko V., Ivanov A., Podyminogin A.* Rev. Sci. Instrum. 1998. V.69. №5. P.2007–2012.
- [7] *Shikhovtsev I.V. et al.* Proc. XX Symp. On Fusion Techn. Marseille. France. September 7–11. 1998. V.1. P.605–608.
- [8] *Shikhovtsev I.V. et al.* Proc. XXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases. Warsaw. Poland. July 11–16. 1999. V.III. P.99–100.
- [9] *Ivanov A.A., Davydenko V.I., Deichuli P.P. et al.* Rev. Sci. Instrum. 2000. V.71. №10. P.3728–3735.
- [10] *Yang H.L., Yoo S.J., Hwang S.M. et al.* Rev. Sci. Instrum. 2000. V.71. №2. P.1148–1150.
- [11] *Vella M.C., Cooper W.S., Pincosy P.A., et al.* Rev. Sci. Instrum. 1988. V.59. №11. P.2357–2365.
- [12] *Tsi, Stirling and Ryan.* Rev. Sci. Instrum. 1977. V.48. №6. P.651–655.
- [13] *Fumelli M., Valckx F.P.G.* Nuclear Instruments and Methods. 1976. V.135. P.203.
- [14] *Залкинд И.М., Павличенко О.С., Тарасенко В.П.* Сб. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика плазмы и проблемы УТС. Вып.2(4). Харьков. ХФТИ. 1975. С.69.
- [15] *Gruen D.M., Siskind B., Wright R.B.* J. Chem. Phys. 1976. V.65. P.363.
- [16] *Spence D. et al.* Rev. Sci. Instrum. 1996. V.67. №4. P.1642–1645.
- [17] *Giese C.F. and Maier W.B.* J. Chem. Phys. 1963. V.39. P.739.
- [18] *Keller R., Spaudtke P., and Nouhmayer F.* Proc. Int. Ion Engineering Congr., Koyoto, Inst. Electr. Engineers of Japan. Tokyo. 1983. P.39.
- [19] *Габович М.Д.* Физика и техника плазменных источников ионов. М.: Атомиздат. 1972. С.30.
- [20] *Бендер Е.Д.* Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 1987. Вып. 4, С.41–49.
- [21] *Kamenski I.V., Borg G.G.* Comput. Phys. Commun. 1998. 113. P.1–23.

*А.А. Иванов, И.В. Шиховцев, А.А. Подыминогин,  
И.И. Авербух, Т.Д. Ахметов, В.И. Давыденко, П.П. Дейчули*

## Плазменный эмиттер на основе высокочастотного разряда

*A.A.Ivanov, I.V.Shikhovtsev, A.A.Podminogin, I.I.Averbukh,  
A.D.Akhmetov, V.I.Davydenko, P.P.Deichuli*

## Plasma emitter based on radio frequency discharge

ИЯФ 2001-40

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев  
Работа поступила 21.05. 2001 г.

---

Сдано в набор 23.05.2001 г.

Подписано в печать 24.05.2001 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 1.4 печ.л., 1.1 уч.-изд.л.

Тираж 125 экз. Бесплатно. Заказ № 40

---

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