

04

## Распределение потенциала плазмы в тандемном поверхностно-плазменном источнике отрицательных ионов

© Г.И. Димов, И.С. Емелёв

Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет  
E-mail: dimov@inp.nsk.su

Поступило в Редакцию 27 октября 2009 г.

Проведены экспериментальное исследование распределения потенциала водородной плазмы и измерения ее плотности и электронной температуры в тандеме кольцевой мультипольной магнитной ловушки с конвертором положительных ионов в отрицательные. Подтверждено, что потенциал плазмы в кольцевой ловушке ниже потенциала стенок камеры. Установлено, что в рабочем диапазоне потенциал плазмы в конверторе практически не зависит от его потенциала.

В [1] был предложен тандемный поверхностно-плазменный (ПП) источник отрицательных ионов водорода. Отрицательные ионы в таком источнике образуются на внутренних стенах полого конвертора, на которые напыляется цезий. Стенки бомбардируются положительными атомарными ионами  $H^+$ , положительными 2- и 3-атомными молекулярными ионами  $_2H^+$  и  $_3H^+$  и атомами  $H^0$ . Максимальный выход отрицательных ионов при поверхностно-плазменном механизме происходит при энергии 20 eV на атом, т.е. 20, 40, 60 eV соответственно. Таким образом, для максимальной концентрации отрицательных ионов в конверторе необходимо обеспечить разность потенциалов между плазмой в конверторе и его стенками от 20 до 60 eV (в зависимости от состава водородной плазмы).

В полость конвертора вводится плазменная струя из генератора плазмы (драйвера), в качестве которого предложено применить мультипольную магнитную ловушку низкотемпературной плазмы в кольцевой геометрии. Плазма в ловушке производится ионизацией водорода ускоренными в дебаевском слое электронами из плоского подогретого  $LaV_6$ -катода (таблетки), расположенного нормально в расходящемся

магнитном поле (для предотвращения образования виртуального катода). В такой кольцевой ловушке из-за отсутствия нормального к стенкам глобального дрейфа в скрещенных полях, благодаря исключению МГД неустойчивости плазмы и ограничению двухпучковой неустойчивости (одиночный плоский катод в расширяющемся магнитном поле) электроны хорошо удерживаются и нагреваются.

В мультипольных генераторах плазмы обычно электронная температура не превышала  $3\text{ eV}$  и плазма имела положительный потенциал из-за быстрого ухода электронов на стенки.

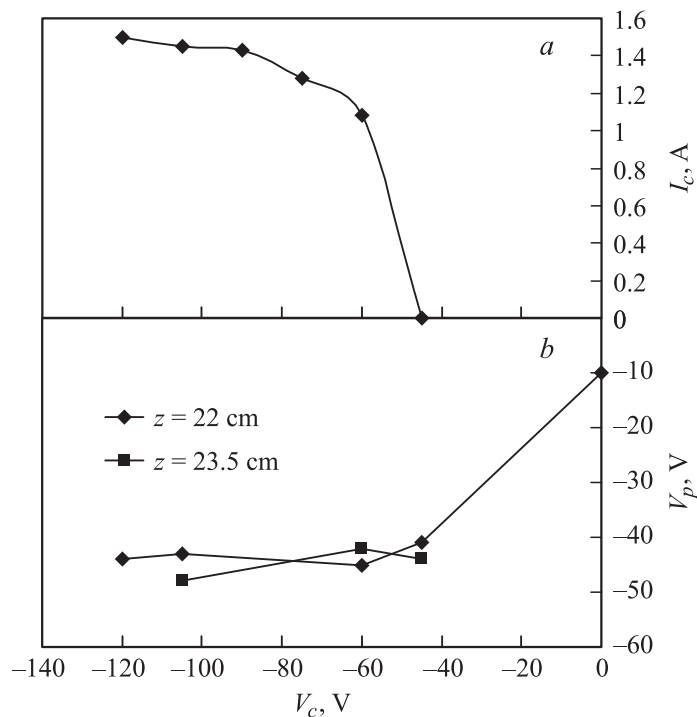
В экспериментах на кольцевой мультипольной ловушке [2,3] (с участием В.В. Разоренова) был обнаружен значительный отрицательный потенциал плазмы, образующейся при достаточно высокой температуре электронов. Это указывало на хорошее удержание электронов в магнитном поле кольцевой геометрии.

Из-за ненадежной системы охлаждения в ловушке [2,3] были перегреты стенки вакуумной камеры и частично размагничены перманентные магниты. После ремонта магнитное поле на поверхности камеры снизилось в  $\sim 2$  раза.

На этой ослабленной ловушке были проведены эксперименты в режиме секундных импульсов плазмы со скважностью 5. Газоразрядная плазма производилась током электронов с катода до  $24\text{ A}$ . Из-за ионизации примесей в водородной плазме и последующего внедрения ускоренных примесных ионов в поверхностный слой катода  $\text{LaV}_6$ -катод начинает отравляться, и поэтому не удается эмиссию электронов с катода поддерживать непрерывной авторегулировкой тока подогревателя катода. Ток с катода (ток разряда) удалось поддерживать в достаточно чистом вакууме авторегулировкой напряжения на разряде (обратной связью).

Приводимые ниже экспериментальные данные были получены при токе разряда  $I_{dis} = 18\text{ A}$  и длительности импульсов  $1\text{ s}$ , при этом напряжение на разряде устанавливалось  $U_{dis} = 120\text{--}160\text{ V}$ . Оптимальное давление для поддержания разряда в такой ловушке оказалось в пределах  $p = 3\text{--}5\text{ мТор}$ .

Параметры плазмы определялись по зондовой (вольт-амперной) характеристике одиночного цилиндрического зонда диаметром  $0.4\text{ mm}$  и длиной  $3\text{ mm}$ . Зонд крепился на уплотнении Вильсона и мог перемещаться вдоль оси источника для измерений параметров плазмы в плазменном драйвере и в конверторе.



**Рис. 1.** Зависимости от потенциала конвертора  $V_c$ :  $a$  — тока на конвертор  $I_c$ ;  $b$  — потенциала плазмы в конверторе  $V_p$  в 2 точках на расстоянии от катода  $z = 22$  и  $23.5$  см.

По результатам измерений в плазменном генераторе на расстояниях от катода  $z = 10$ – $16$  см электроны имеют температуру  $T_e = 3$ – $4$  eV при плотности плазмы  $n_i \sim 5 \cdot 10^{12}$  см $^{-3}$ .

При подаче на конвертор отрицательного потенциала относительно корпуса магнитной ловушки ток на конвертор из плазмы  $I_c$  имел зависимость, показанную на рис. 1,  $a$ .

Ток  $I_c$  принимал положительное значение при потенциале конвертора  $V_c$  относительно корпуса ниже значения  $V_c = -40$  В, которое соответствует плавающему потенциалу конвертора, и выходил на насыщение при потенциале  $V_c \sim -65$  В. При этом потенциале практи-

чески все электроны из плазмы не достигают стенок конвертора и весь ток обеспечивается положительными ионами. Дальнейшее слабое возрастание тока с уменьшением потенциала  $V_c$  можно объяснить усилением ионизации нейтрального газа вторичными электронами со стенок конвертора.

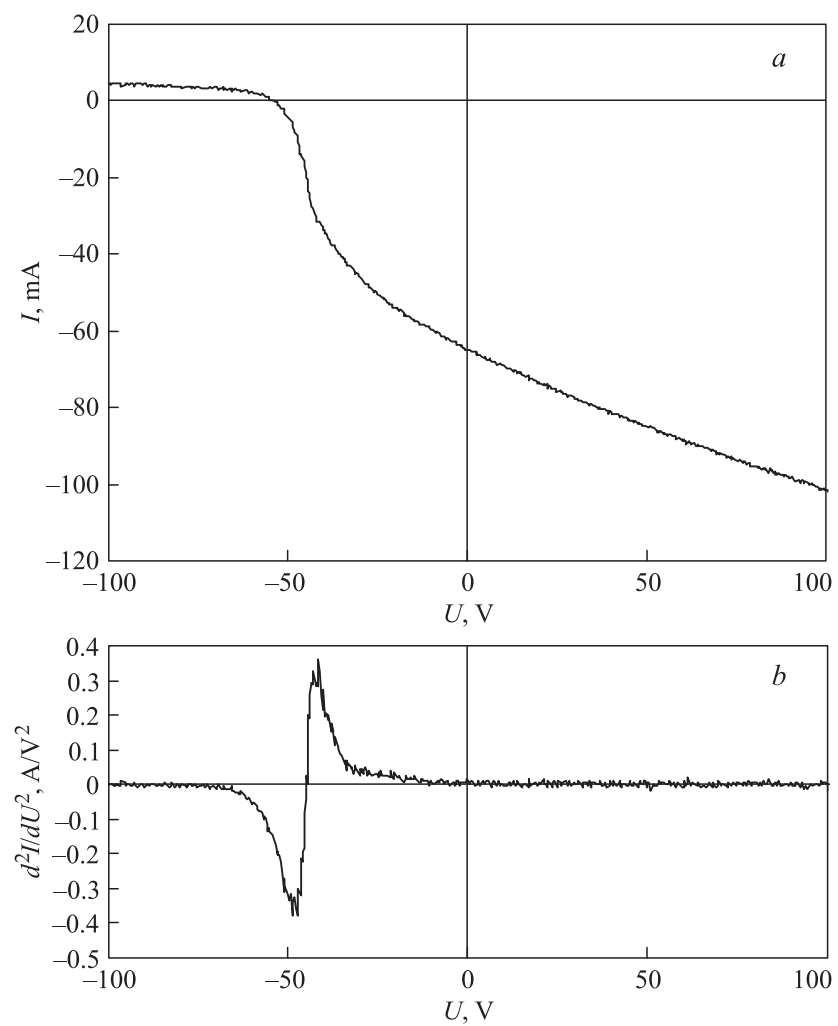
Важнейшей задачей экспериментов было определение потенциалов плазмы в конверторе и в драйвере, а также их распределения. Изучение возможности контроля потенциала плазмы в конверторе было особенно необходимым для создания тандемного ПП-источника отрицательных ионов водорода.

Потенциал плазмы определялся по перегибу зондовой характеристики в области больших отрицательных значений потенциала зонда [4,5]. На рис. 2 представлена одна из измеренных зондовых характеристик в плазме нашей ловушки с конвертором со 2-й производной, определяющей точку перегиба. Потенциал зонда в точке перегиба достаточно близок к потенциалу плазмы. Из-за близости зондовой характеристики к вертикали в точке перегиба неточность определения точки перегиба слабо влияла на точность определения потенциала плазмы. Непосредственно перед каждым измерением зонд очищался бомбардировкой ионами (при помощи двойной пилы напряжения).

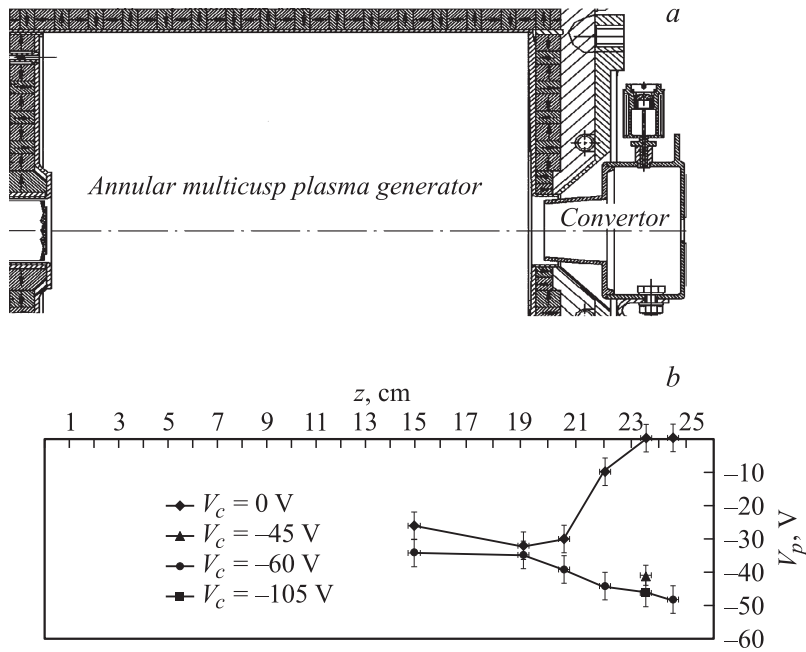
В ловушке-генераторе плазмы при  $z = 10-15$  см и  $V_c = 0$  плазма имеет отрицательный потенциал  $V_p \approx -25$  В. Это означает, что даже в ослабленной мультипольной ловушке кольцевой геометрии ионы плазмы удерживаются от ухода на стенки электрическим полем. Ионы перемещаются в осесимметричной потенциальной яме с остроконечными радиальными границами.

В области конвертора параметры плазмы сильно меняются при потенциалах конвертора  $0 > V_c \geq -60$  В и практически не меняются при напряжениях ниже  $V_c = -60$  В. Плазма в конверторе имеет температуру  $T_e \sim 2.5-3$  эВ и плотность  $n_i \sim 10^{11}$  см<sup>3</sup>.

Особый интерес для получения максимальной концентрации отрицательных ионов в конверторе представляла возможность регулирования разности потенциалов между плазмой и стенками конвертора (регулирования энергии налегающих на стенку ионов водорода). Измеренная зависимость потенциала плазмы от потенциала конвертора приведена на рис. 1, *b*. Приведенные измерения были сделаны в двух близких точках в центре конвертора и около, слева. Из рис. 1, *b* видно, что при потенциале конвертора ниже  $V_c = -50 - -60$  В потенциал



**Рис. 2.** Зондовая характеристика в плазме (а) со 2-й производной  $d^2I/dU^2$ , определяющей точку ее перегиба (b).



**Рис. 3.** Измеренные аксиальные распределения потенциала плазмы при различных потенциалах конвертора (b) с привязкой к схеме плазменного генератора с конвертором (a).

плазмы меняется слабо с понижением потенциала  $V_c$ . Это должно позволить легко регулировать разность потенциалов между плазмой и стенкой конвертора, обеспечивая нужную энергию положительных ионов, бомбардирующих стенку конвертора.

Подвижным зондом было измерено аксиальное распределение потенциала плазмы в конверторе, в генераторе плазмы и в области их сопряжения. На рис. 3 показаны измеренные распределения потенциала плазмы при различных потенциалах конвертора с привязкой к схеме плазменного генератора с конвертором.

Потенциал плазмы в конверторе слабо зависит от потенциала, приложенного к конвертору при  $V_c \leq -45$  V. Плазма в конверторе имеет более отрицательный потенциал, чем плазма в магнитной ловушке. При

напылении цезия на стенки конвертора ионы цезия не могут попадать из конвертора в генератор плазмы, однако часть атомов цезия может проникать в генератор и влиять на его работу.

Спад потенциала плазмы в области сопряжения плазменного генератора и конвертора способствует выходу положительных ионов водорода из магнитной ловушки в конвертор и ограничивает поток электронов в конвертор.

В заключение отметим, что даже в ослабленной кольцевой мультипольной ловушке плазма имеет отрицательный потенциал, что существенно улучшает удержание ионов. В описанных экспериментах впервые было показано, что в почти замкнутом конверторе тандемного ПП-источника ионов  $H^-$  в рабочем диапазоне потенциал конвертора слабо влияет на потенциал плазмы в нем. Возможны поддержание и регулировка потенциала конвертора, отрицательного относительно плазмы в нем, что означает образование в конверторе электростатической ловушки для отрицательных ионов.

## Список литературы

- [1] *Dimov G.I.* // Rev. Sci. Instrum. 2002. V. 73.
- [2] *Dimov G.I. et al.* // Proc. Intern. Symposium on BNCT. 2004. Novosibirsk: Budker INP, 2004. P. 70.
- [3] *Work-SHOP on BNCT.* Novosibirsk, Russia: INP RAN, Apr. 2005.
- [4] *Лукьянов С.Ю., Ковальский Н.Г.* Горячая плазма и управляемый ядерный синтез. М.: МИФИ, 1997. Гл. 5. С. 186–193.
- [5] *Методы исследования плазмы* / Под ред. В. Лохте-Хольтгревена. М.: Мир, 1971. Гл. 10. С. 460–464 (*Plasma diagnostic.* Amsterdam: NHPC, 1968).