

УДК 621.039

Структура электрических полей в ловушке с вращающейся плазмой

В. И. Волосов, В. В. Деменев, А. Г. Стешов, И. Н. Чуркин
Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Изложена методика измерения распределения радиальных электрических полей в установках с вращающейся плазмой. Показано, что распределение электрических полей в плазме совпадает с распределением, задаваемым на торцевых электродах при различных значениях ларморовского радиуса ионов.

В настоящее время возрастающий практический интерес представляет исследование вращающейся в скрещенных $E \times H$ полях плазмы. Открытые магнитные ловушки со скрещенными полями являются наиболее подходящими объектами для исследования процессов, происходящих в подобной плазме. Одной из ключевых проблем при исследовании процессов в таких системах является возможность управления структурой радиальных электрических полей и их контроля. Раньше уже рассматривались вопросы управления радиальным распределением электрического потенциала в плазме с ионами, ларморовский радиус которых много меньше поперечных размеров плазмы [1], однако в ряде задач представляют интерес свойства плазмы при произвольном ларморовском радиусе ионов.

В работе рассматривается приложение метода пассивной корпускулярной диагностики плазмы для изучения структуры радиальных электрических полей во вращающейся плазме с ионами, ларморовский радиус которых может быть как порядка поперечных размеров системы, так и значительно меньше его. Данная методика была опробована при исследовании радиальной структуры разряда в экспериментальной установке ИСП. Методика основана на хордовых измерениях энергетических спектров атомов перезарядки. С ее по-

мощью была исследована структура полей в различных режимах работы ИСП и возможность управления полями в этой установке.

Описание экспериментальной установки

Эксперименты по изучению распределения электрических полей с помощью предложенной методики проводились на экспериментальной установке ИСП (рис. 1) [2], разработанной на основе магнитной ловушки с аксиальным магнитным и радиальным электрическими полями.

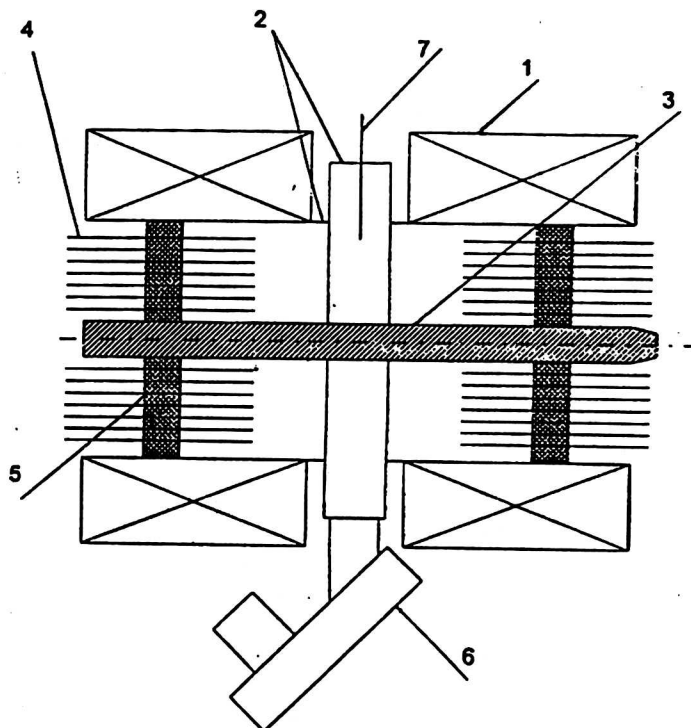


Рис. 1. Схема экспериментальной установки ИСП:

1 — катушки электромагнита; 2 — вакуумная камера — анод; 3 — катод; 4 — торцевые электроды; 5 — изолятор; 6 — диагностическая система; 7 — одиночный электрический зонд

Магнитное поле пробочной конфигурации создается соленоидальными катушками, а радиальное электрическое поле вводится при помощи коаксиальных торцевых электродов, центральным стержневым электродом является катод, а внешним цилиндрическим электродом — вакуумная камера (анод). Установка имеет следующие конструктивные размеры: расстояние между торцевыми электродами 300 мм, диаметр катода (меняется в зависимости от режима работы) 10÷60 мм, диаметр анода 280 мм.

Основная рабочая компонента разряда, тяжелые ионы, образуется и поддерживается за счет распыления катода и последующей ионизации в плазме распыленных атомов. Помимо ионов вещества катода в состав плазмы ИСП входят легкие ионы, образующиеся в результате ионизации стабилизирующего газа, на котором зажигается разряд. Основные особенности ИСП: универсальность, т. е. возможность получения плазмы с ионами практически любого вещества (состав плазмы определяется веществом катода и стабилизирующего газа), и вращение плазмы вокруг оси источника. Эта установка

может работать в разных режимах работы, которые отличаются величиной магнитного поля, материалом катода, сортом стабилизирующего газа, напряжением на разряде и разрядным током. Эти режимы можно объединить в две большие группы в зависимости от радиальных размеров траекторий ионов: когда замагничены тяжелые ионы, при этом радиальные размеры их траекторий меньше радиальных размеров плазмы (режим *S*-разряда), и когда замагничены, в основном, только легкие ионы, а радиальные размеры траекторий тяжелых ионов таковы, что, за исключением небольшого числа частиц, родившихся непосредственно у анода, эти ионы всегда попадают на катод (особенностью этого типа разряда является наличие высоких энергий у легких ионов) (режим *H*-разряда).

В настоящее время на основе ИСП разрабатывается несколько проектов промышленных приложений [2—4], принципиальное различие которых заключено в радиальном распределении электрического потенциала. Весьма удобным способом формирования необходимых профилей распределения потенциала в разряде может явиться их соответствие с распределением потенциала на торцевых электродах источника. Для проверки этого соответствия была использована специальная методика, представленная ниже [5].

Методика восстановления радиального распределения электрического потенциала

Метод измерения профиля радиального распределения потенциала в объеме плазмы по структуре энергетического спектра атомов перезарядки, уходящих из объема плазмы, впервые был предложен в экспериментах с вращающейся водородной плазмой на установках ПСП-2 и ПСП-02 [6]. Особенность этих экспериментов состояла в том, что ларморовский радиус ионов плазмы ρ был много меньше радиальных размеров плазмы. Если электрическое поле $E(r)$ монотонно и растет к аноду медленнее, чем r , максимальной энергией на данной хорде наблюдения будет обладать атом, который перезарядается в точке, соответствующей прицельному параметру хорды r_0 , иначе интерпретация результатов измерения затрудняется. Тогда можно считать электрическое поле равномерным на размере двойного ларморовского радиуса, траекторию ионов — классической циклоидой, а энергию атома перезарядки на данной хорде максимальной при $r = r_0$: $W(r_0)_{\max} \approx 4W_E(r_0)$,

здесь

$$W_E(r_0) = (M_i V_E^2(r_0))/2,$$

где M_i — масса иона;

V_E — скорость электрического дрейфа.

Тогда электрическое поле на радиусе r_0 :

$$E(r_0) = \frac{H(r_0)}{c} \sqrt{\frac{W(r_0)}{2M_i}}. \quad (1)$$

В установке ИСП радиальные размеры ионных траекторий близки к радиальному размеру плазмы, поэтому описанный выше метод определения $E(R)$ нельзя использовать в этом случае, хотя условия на зависимость $E(r)$ и соответствие максимальной энергии атомов перезарядки на данной хорде ее принципиальному параметру сохраняются. Для определения радиального распределения потенциала плазмы была предложена новая методика его восстановления [5].

Известно соотношение между радиусом точки рождения иона (ионизации атома) R и радиусом точки его перезарядки, соответствующим прицельному

параметру данной хорды наблюдения r_0 (т. е. для атома перезарядки с максимальной энергией для данной хорды наблюдения) [7] (рис. 2):

$$W_{\max} = \frac{e^2 H^2 (R^2 - r_0^2)^2}{8 M_i c^2 r_0^2}, \quad (2)$$

где M_i — масса иона.

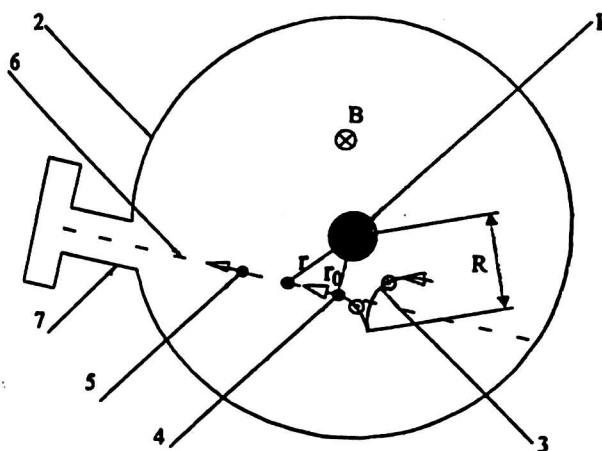


Рис. 2. Схема измерения энергетических спектров атомов перезарядки с помощью диагностической системы (центральной плоскости ИСП):
 1 — катод; 2 — анод;
 3 — траектория движения иона;
 4 — место перезарядки иона в атом; 5 — атом перезарядки;
 6 — хорда наблюдения;
 7 — диагностическая система

Тогда, зная величину магнитного поля B , массу иона M_i , прицельный параметр хорды наблюдения r_0 и измеряя максимальную энергию W_{\max} соответствующего атома перезарядки, выходящего вдоль данной хорды, можно из уравнения (2) рассчитать радиус точки рождения R иона. Предполагая распределение потенциала $U(r)$ монотонным, по методу наименьших квадратов можно найти такую зависимость $U = U(r)$ (типа $U(r) \sim r^m$), при которой на этой кривой будут находиться одновременно радиус точки рождения и радиус точки перезарядки (прицельный параметр хорды наблюдения) иона с W_{\max} на данной хорде, и эта зависимость будет удовлетворяться для всевозможных хорд.

Для измерения энергетических спектров атомов перезарядки использовалась диагностическая система (рис. 3), которая позволяла с помощью входных коллимирующих отверстий выбирать определенную хорду наблюдений. Система состояла из обдирочной камеры типа импульсной газовой мишени, электростатического анализатора энергий, электромагнитного масс-сепаратора для выделения частиц определенной массы (в ИСП энергетические спектры тяжелых и легких атомов перезарядки в области промежуточных энергий могут пересекаться), детектора частиц, выполненного на основе МКП.

Продольные энергии атомов перезарядки, возникающие в основном за счет ион-ионных взаимодействий и определяющиеся продольными энергиями расплывенных атомов в ИСП, много меньше максимальными поперечными энергиями, поэтому угловые измерения не проводились.

При восстановлении распределения потенциала по измеряемым максимальным энергиям атомов перезарядки необходимо учитывать процесс двойной перезарядки, когда быстрый атом ионизуется, набирает энергию и вновь перезарядается, а также наличие многозарядных ионов. Для большинства

задач подобные процессы несущественны из-за их низких сечений, но в общем случае необходим дополнительный анализ энергетических спектров атомов перезарядки.

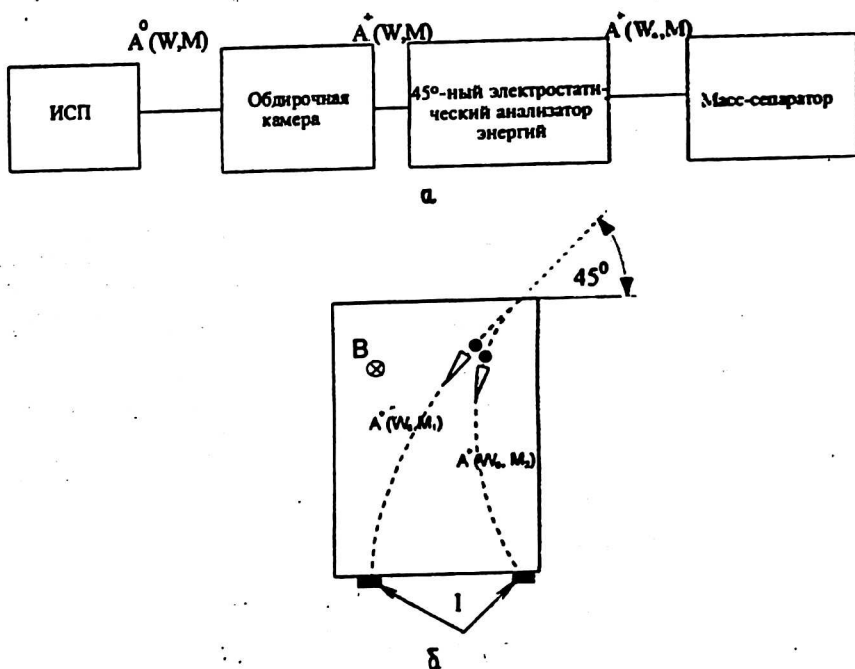


Рис. 3. Диагностическая система:
 а — принципиальная схема диагностической системы;
 б — масс-сепаратор: 1 — детекторы частиц, выполненные на основе МКП

Эффективность описанного подхода к исследованию распределения радиального электрического поля существенно повышается при использовании улучшенной методики, с помощью которой становится возможным восстанавливать практически любое распределение $U(r)$ (это необходимо для оптимизации работы ИСП в различных приложениях). В области вблизи анода ход потенциала $U(r)$ достаточно точно определяется зондовым методом. Далее методом корпускулярной диагностики измеряется максимальная энергия W_{\max} атома перезарядки, выходящего вдоль хорды наблюдения с прицельным параметром r_0 . Рассчитав радиус точки рождения иона R (потенциал в этой точке известен из зондовых измерений плавающего потенциала), можно вычислить потенциал на радиусе r_0 . Прделав аналогичные операции для всех других хорд наблюдения, можно найти радиальное распределение электрического потенциала на всем промежутке — от анода до катода.

Результаты измерений и обсуждения

Были проведены исследования ИСП в качестве источника атомарных потоков в установке для высокоэффективной обработки различных поверхностей [4]. Особенностью этого приложения является равномерное распределение потенциала на торцевых электродах, которые, для эффективной работы источника, должно хорошо повторяться в разряде.

Исследования проводились в двух режимах работы ИСП: режиме *S*-разряда (напряжение на разряде — 1,4 кВ, магнитное поле в центральной плоскости ИСП — 0,25 Т) и *H*-разряда (напряжение на разряде — 600 В, магнитное поле в центральной плоскости ИСП — 0,04 Т). В обоих режимах использовался водород в качестве стабилизирующего газа и медный катод. На рис. 4 представлены распределения потенциала, полученные из вольт-амперных характеристик электрического зонда в прианодной области и восстановленные с помощью описанной методики из энергетических спектров атомов перезарядки по методу наименьших квадратов.

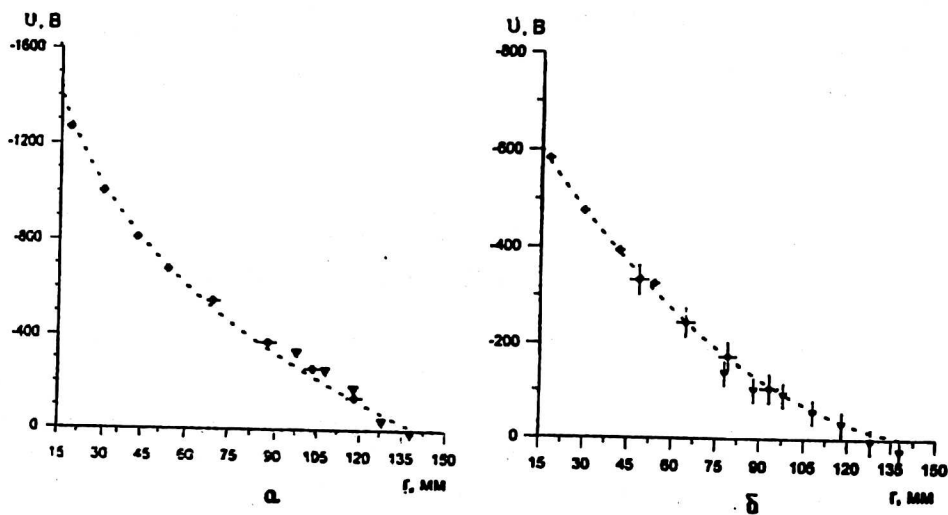


Рис. 4. Радиальные распределения электрического потенциала, полученные в разных режимах: *a* — *S*-разряд; *b* — *H*-разряд; \blacktriangledown — распределения потенциала, измеренные одиночным электрическим зондом; \blacklozenge и соответствующие им пунктирные линии — распределения, восстановленные из энергетических спектров атомов перезарядки; *r* — расстояние от оси ИСП

Распределения электрического потенциала в плазме, восстановленные из корпускулярных измерений и измеренные зондовым методом в прианодной области, хорошо согласуются между собой (см. рис. 4) и соответствуют распределению на внешних торцевых электродах.

Выводы

- Разработана методика измерения распределения радиальных электрических полей в установках с вращающейся плазмой, основанная на хордовых измерениях энергетических спектров атомов перезарядки. Методика применима для исследования плазмы с ионами, ларморовский радиус которых может находиться в широком интервале значений (от случая, когда ларморовский радиус много меньше поперечных размеров экспериментальной установки, до случая, когда он порядка или больше этих размеров).
- Показано, что структура электрических полей в магнитной ловушке с $E \times H$ полями соответствует структуре полей на торцевых электродах и практически не зависит от отношения ларморовского радиуса ионов к поперечному размеру установки.

- Планируется использование улучшенной методики, объединяющей корпускулярный и зондовый методы, для оптимизации работы ИСП и других приложений плазмы с $E \times H$ полями.

Литература

1. Абдрашитов Г. Ф., Байбородин С. И., Бехтеев А. А. и др. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 1988. Вып. 1. С. 54.
2. Churkin I. N., Volosov V. I., Steshov A. G. Transaction of fusion technology, 1999. V. 35. № 1T. P. 308.
3. Churkin I. N., Volosov V. I., Steshov A. G. Source of accelerated atoms for surface modification// Review of Scientific Instruments. 1998. V. 69. Is. 2. P. 856—858.
4. Churkin I. N., Volosov V. I., Steshov A. G. Universal metal ion source//Ibid. P. 822—824.
5. Демеев В. В., Чуркин И. Н. Измерение распределения радиального электрического поля в плазменном источнике с $E \times H$ полями: Тезисы докладов XXVI Всероссийской конф. по физике плазмы и УТС, Звенигород, 1999. С. 191.
6. Abdrashitov G. F., Beloborodov A. V., Volosov V. I., Kubarev V. V., Popov Yu. S., Yudin Yu. N.//Nuclear Fusion, 1991. V. 31. № 7. P. 445.
7. Шимони К. Физическая электроника. — М.: Энергия, 1977. — 606 с.

Structure of electric fields in magnetic trap with rotating plasma

V. I. Volosov, V. V. Demenev, A. G. Steshov, I. N. Churkin
Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

The method for a measurement of radial electric field in installation with rotating plasma is described. It is shown that the distribution of the electric field within the plasma agrees with one on the end electrodes for different values of ion larmor radii.