

УДК 621.039

ИЗМЕРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПЛАЗМЕННОМ ИСТОЧНИКЕ С ЕХН ПОЛЯМИ

В. И. Волосов, В. В. Деменев, И. Н. Чуркин

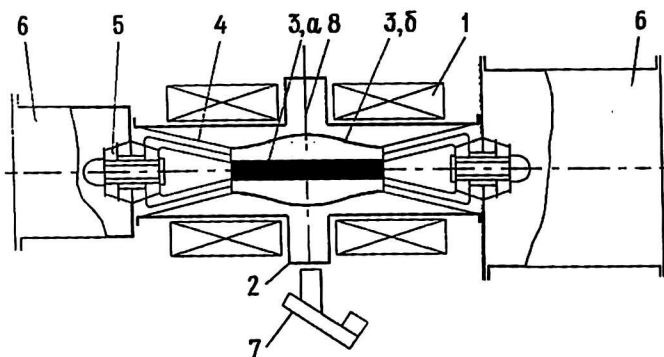
Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск-90, Россия

Рассмотрены корпускулярный и зондовый методы измерения радиального распределения электрического поля в плазме "Источника в скрещенных полях". Подробно обсуждаются методы восстановления радиальных электрических полей. Приведены результаты измерения, проведенного в одном из режимов работы ИСП.

В 90-е гг. в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН был разработан принципиально новый универсальный плазменный источник на основе магнитной ловушки с аксиальным магнитным и радиальным электрическим полями "Источник в скрещенных полях ИСП" (рис. 1) [1, 2]. Магнитное поле создается соленоидальными катушками, а радиальное электрическое поле формируется с помощью коаксиальных торцевых электродов.

Рис. 1. Установка ИСП:

- 1 — катушки электромагнита; 2 — вакуумная камера; 3,а,б — внутренний лайнер — катод, внешний — анод, соответственно;
- 4 — торцевые электроды;
- 5 — изолятор; 6 — система высоковольтного питания;
- 7 — диагностическая система; 8 — одиночный электрический зонд



В источнике реализуется режим S -разряда с холодным катодом. S -разряд (Self-Sputtering discharge) — разряд с тяжелыми ионами в скрещенных электрических и магнитных полях, поддерживающийся за счет самораспыления катода быстрыми тяжелыми ионами и последующей ионизации распыленных атомов в плазме.

Помимо ионов, вещества катода (тяжелые), 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), замагниченность тяжелых ионов ($A \gg 1$) и вращение плазмы вокруг оси источника.

В настоящее время разрабатываются три перспективных проекта с использованием различных модификаций ИСП:

источник интенсивных атомарных потоков в установке по обработке поверхностей различных материалов: нанесение тонких пленок, имплантация и их сочетание;

источник плазменного потока для установки по разделению изотопов методом ИЦР-нагрева;

электрореактивный движитель для использования в космических программах, например для вывода спутников на геостационарную орбиту, для систем коррекции космических летательных аппаратов.

В зависимости от применения модификации ИСП отличаются величиной магнитного поля, материалом катода, сортом стабилизирующего газа, распределением электрического поля, напряжением на разряде и разрядным током.

Наиболее существенное отличие заключено в радиальном распределении электрического поля, поэтому для оптимизации работы ИСП в различных режимах работы необходимо знать форму распределения радиальных электрических полей. Для этого созданы системы диагностики, которые работоспособны в различных режимах работы ИСП.

В работе описаны два диагностических метода, использующихся для исследования радиального распределения электрического поля в плазме ИСП: корпускулярный и зондовый.

Корпускулярный метод основан на хордовых измерениях энергетических спектров атомов перезарядки.

Зондовый метод — традиционный метод [3, 4], применяется как самостоятельно, так и в сочетании с корпускулярными измерениями.

Методы диагностики

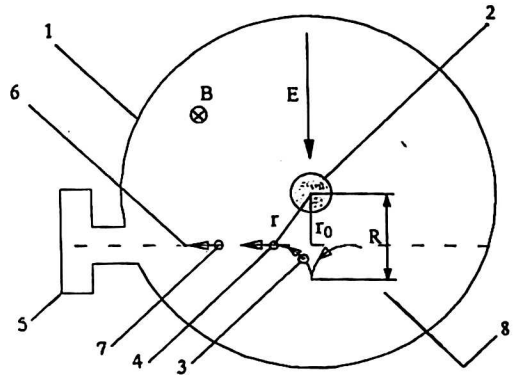
Корпускулярный метод использует особенности ИСП — замагниченность ионов и вращение плазмы вокруг оси источника в межэлектродном пространстве. Метод основан на измерении энергетических спектров перезарядки.

Ионы двигаются в скрещенных полях по циклоидам (рис. 2) и, перезарядившись на нейтральных частицах в объеме плазмы, покидают источник вдоль касательной к траектории движения первоначального иона в месте перезарядки с энергией, близкой к его энергии. Измерения энергетических спектров атомов перезарядки проводятся на различных хордах наблюдения с соответствующими прицельными параметрами l_0 . При условии, что 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, соответ-

ствующей прицельному параметру хорды r_0 , иначе интерпретация результатов измерения затрудняется [5, 6].

Рис. 2. Схема расположения электрического зонда и диагностической системы для измерения энергетических спектров атомов перезарядки (центральная плоскость ИСП):

- 1 — анод; 2 — катод; 3 — траектория движения иона; 4 — место перезарядки иона в атом; 5 — диагностическая система; 6 — хорда наблюдения; 7 — атом перезарядки; 8 — электрический зонд



При восстановлении распределения радиального электрического поля по измеряемым максимальным энергиям атомов перезарядки необходимо учитывать процесс двойной перезарядки, когда быстрый атом ионизуется, набирает энергию и вновь перезарядается [7]. Для большинства задач этот процесс несущественен из-за низких сечений перезарядки (по оценкам, таких атомов перезарядки в плазменном источнике не более 0,1 %).

Продольные энергии атомов перезарядки, возникающие в основном за счет ионных взаимодействий и определяющиеся продольными энергиями распыленных атомов в ИСП, много меньше максимальных поперечных энергий, поэтому угловые измерения не проводились.

Метод измерения радиальных электрических полей и профиля радиального потенциала в объеме плазмы по структуре энергетического спектра атомов перезарядки уходящих из объема плазмы был предложен в экспериментах с вращающейся водородной плазмой на установках ПСП-2 и ПСП-02 [5, 6].

Особенность экспериментов состояла в том, что ларморовский радиус ионов плазмы r был много меньше радиальных размеров плазмы ΔR , $\Delta R \sim (10 \div 15)r$. Это условие существенно упрощало интерпретацию результатов эксперимента. В этом случае можно считать электрическое поле равномерным на размере двойного ларморовского радиуса, траекторию ионов — классической циклоидой, а энергию иона на данной хорде — максимальной при $r = r_0$: $W(r_0)_{\max} \approx 4W_E(r_0)$,

где $W_E(r_0) = (M V_E^2(r_0)) / 2$, где M — масса иона; V_E — скорость электрического дрейфа.

Тогда электрическое поле в точке r_0 будет:

$$E(r_0) = B(r_0) \sqrt{\frac{W(r_0)}{2M}}. \quad (1)$$

В установке ИСП радиальные размеры ионных траекторий близки к радиальному размеру плазмы (но несколько меньше его), поэтому описанный выше метод определения $E(R)$ нельзя использовать в этом случае. Для определения радиального распределения потенциала плазмы был предложен новый метод его восстановления по виду энергетических спектров тяжелых атомов перезарядки, радиальные размеры траекторий которых близки к радиальному размеру плазмы.

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) [8]:

$$W_{\max} = \frac{q^2 B^2 (R^2 - r_0^2)^2}{8Mr_0^2}, \quad (2)$$

где M — масса иона.

Зная величину магнитного поля B , массу иона M , 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. Затем, используя результаты измерения $U(r)$ другими методами (например зондового) или, в некоторых случаях, используя особенности распределения электрического потенциала на торцевых электродах (в ИСП начальное распределение электрического потенциала задается внешними торцевыми электродами), можно найти потенциал на радиусе r_0 . Применяя результаты измерений для нескольких точек с различными прицельными параметрами r_0 , можно восстановить распределение $U(r)$ на всем расстоянии от катода до анода.

Для измерения энергетических спектров атомов перезарядки используется диагностическая система, состоящая из обдирочной камеры, электростатического анализатора энергий, масс-сепаратора и детектора (рис. 3).



Рис. 3. Схема диагностической системы для измерения энергетических спектров атомов перезарядки

Атомы перезарядки покидают плазменный источник вдоль хорд наблюдения перпендикулярно оси плазменного источника. Далее поток атомов проходит через систему коллимирующих отверстий, выделяющую атомы, идущие вдоль хорды с определенным прицельным параметром. В дальнейшем в обдирочной камере атомы перезарядки превращаются в ионы. В данной работе применяется обдирка атомов в импульсной газовой мишени (рабочий газ — азот или водород).

Из обдирочной камеры ионы попадают под углом 45° в электростатический энергоанализатор типа плоского конденсатора [9]. В применяемом энергоанализаторе выполняется соотношение между напряжением на обкладках $U_{\text{за}}$ и энергией выделяемых частиц $W_0: W_0 = 1,25 U_{\text{за}}$.

Далее ионы с выделенной в энергоанализаторе энергией попадают в электромагнитный масс-сепаратор, где, двигаясь в однородном магнитном поле, разделяются по массам. Несмотря на то, что в источнике максимальные энергии тяжелых ионов (5 КэВ) намного больше максимальных энергий легких (300 эВ), в области низких энергий их спектры перекрываются. Поэтому при измерении

энергетических спектров легких атомов дополнительно применяется масс-сепаратор, который дает возможность отделять легкие частицы от тяжелых при использовании практически любых материалов катода и легкого стабилизирующего газа.

Регистрация частиц осуществляется детекторами, выполненными на основе микроканальных пластин (МКП) [10].

Для повышения эффективности регистрации ионов в области энергии регистрируемых частиц < 1000 эВ в системе предусмотрена возможность их доускорения. Доускорение частиц производится как за счет доускорения ионов непосредственно перед МКП (это компенсирует падение эффективности МКП при энергии частиц < 500 эВ) [10], так и за счет разности потенциалов между обдирочной камерой и заземленной сеткой, установленной на входе анализатора энергии.

Зондовый метод основан на непосредственном измерении плавающего потенциала одиночным электрическим зондом [3].

Электрический зонд, применяющийся в данной работе, представляет собой вольфрамовый стержень диаметром 0,5 мм и длиной открытой рабочей области 2 мм. На изолирующем вольфрамовом стержне керамической трубки находятся металлические кольца, которые поддерживают локальное распределение электрического потенциала в плазме и защищают трубку от напыления проводящего слоя.

Результаты измерений и обсуждения

Измерялось распределение радиального электрического поля в экспериментальной установке ИСП по спектрам тяжелых атомов перезарядки с использованием диагностической системы (рис. 4). Основные конструктивные размеры экспериментальной установки ИСП и условия эксперимента следующие: расстояние между торцевыми электродами 300 мм, диаметр катода 30 мм, диаметр анода (вакуумная камера) 280 мм, материал катода — титан, стабилизирующий газ — водород, магнитное поле 0,25 Тл, напряжение между катодом и анодом 2,1 кВ.

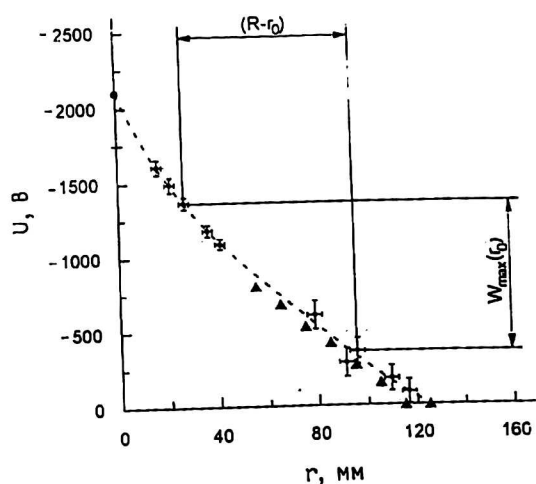


Рис. 4. Распределение потенциала в плазме как функция расстояния от катода (напряжение на катоде $U = -2,1$ эВ, материал катода — титан, стабилизирующий газ — водород):

- — по энергетическим спектрам атомов перезарядки титана; Δ — по зондовым измерениям

Используя уравнение (2), можно рассчитать радиус точки рождения R иона, зная величину магнитного поля B , массу иона M , прицельный параметр хорды наблюдения r_0 и измеряя максимальную энергию W_{\max} атома перезарядки, выходящего вдоль данной хорды. Считая распределение потенциала $U(r)$ достаточно монотонным, методом наименьших квадратов находится такая зависимость $U = U(r)$ (например типа $U(r) \sim r^m$), при которой на этой кривой будут находиться одновременно радиус точки рождения этого иона и прицельный параметр хорды наблюдения, и эта зависимость будет удовлетворять ионам с других хорд.

Для контроля полученного распределения $U(r)$ были проведены независимые измерения той же функции $U(r)$ одиночным электрическим зондом (см. рис. 4). Описанный зонд вводился на расстояние до 70 мм от анода, так как на больших расстояниях он вносил заметные искажения в плазму.

При восстановлении распределения электрического поля по зондовым измерениям плавающего потенциала принималась температура электронов $T_e \sim 50$ эВ, определенная из вольт-амперных характеристик зонда, полученных на доступных для зонда расстояниях.

Распределение электрического потенциала в плазме, восстановленное описанной методикой из корпускулярных измерений и измеренное зондовым методом, хорошо согласуются между собой.

Практически любое распределение $U(r)$ (без предположений о монотонности $U(r)$ и $E(r)/E(r_0) < r/r_0$) можно восстановить описанными выше методами, если использовать методику, несколько отличную от описанной выше. В области вблизи анода ход потенциала $U(r)$ достаточно точно определяется зондовым методом (размер этой области достигает половины размера плазмы). 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), можно вычислить потенциал на радиусе r_0 . Проведя аналогичные операции для других хорд наблюдения, находят радиальное распределение электрического поля на всем промежутке от анода до катода.

Выводы

Таким образом, в работе описан метод измерения радиального распределения электрического поля в установке ИСП, основанный на измерении энергетических спектров выходящих из источника тяжелых атомов перезарядки, радиальные размеры траекторий которых порядка расстояния между катодом и анодом.

Представлены результаты измерений, показывающие работоспособность приведенного выше метода, применительно к плазме в ИСП. В дальнейшем планируется использовать данные методы для измерения радиального распределения электрических полей в различных режимах работы источника для его оптимизации.

Литература

1. Churkin I. N., Volosov V. I., Steshov A. G. // Transaction of fusion technology. 1999. V. 35. № 1Т. P. 308.
2. Чуркин И. Н. Разряд с тяжелыми ионами в скрещенных полях, его модификации и приложения: дис. ... канд. физ.-мат. наук/Новосибирск, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера, 1997. — 98 с.
3. Лохте-Хольтгревен В. Методы исследования плазмы. — М.: Мир, 1971. — 552 с.
4. Козлов О. В. Электрический зонд в плазме. — М.: Атомиздат, 1969. — 291 с.
5. Abdrashitov G. F., Beloborodov A. V., Volosov V. I., Kubarev V. V., Poroov Yu. S., Yudin Yu. N. // Nuclear Fusion. 1991. V. 31. № 7. P. 445.

6. Абдарашитов Г. Ф., Байбородин С. И., Бехтенов А. А. и др. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 1998. Вып. 1. С. 54.
7. Рутлова М. Р. // Journal de physique, 1979. Т. 40. С. С7, supplement au № 7. Р. 503.
8. Шимони К. Физическая электроника. — М.: Энергия, 1977. — 606 с.
9. Афанасьев В. П., Явор С. Я. Электростатические энергоанализаторы для пучков заряженных частиц. — М.: Наука, 1978. — 224 с.
10. Айнбунд М. Р., Поленов Б. В. Вторично-электронные умножители открытого типа и их применение. — М.: Энергоиздат, 1981. — 140 с.

MEASUREMENT OF RADIAL ELECTRICAL FIELD WITHIN PLASMA SOURCE WITH EXH FIELDS

V. I. Volosov, V. V. Demenev, I. N. Churkin

Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS Novosibirsk, Russia

The measurement of radial electrical field within the source with crossed fields by the corpuscular and probe methods are presented. The reconstruction methods of an electrical field based on these diagnostics are discussed. The experimental results are considered.