

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ПЛАЗМЫ МЕТОДОМ РАССЕЯНИЯ БЫСТРЫХ АТОМОВ НА ЗОНДИРУЮЩЕМ ИОННОМ ПУЧКЕ

А.А. Кабанцев, С.Ю. Таскаев

Предложена новая диагностическая методика измерений распределения потенциала высокотемпературной плазмы. Методика основана на анализе энергетического спектра быстрых атомов, рассеянных на зондирующем ионном пучке. Показано, что при оптимальном выборе параметров атомарного и ионного пучков можно получить величины потоков регистрируемых атомов, сравнимые с соответствующими величинами, получаемыми при измерениях ионной температуры плазмы по рассеянию быстрых атомов.

PLASMA SPACE POTENTIAL MEASUREMENTS THROUGH THE FAST ATOMS SCATTERING BY THE ION BEAM PROBE. A.A. KABANTSEV, S.Yu. TASKAEV. New scheme of the plasma space potential measurements is presented. This scheme is based on analysing the energy spectrum of the elastically scattered neutrals by the probing ion beam. Calculations show that the intensity of the scattered neutrals can be such as for the Rutherford-scattering diagnostic to ion temperature measurements.

Проблема корректных измерений локальных электрических полей и распределения потенциала высокотемпературной плазмы, когда становятся неприменимыми традиционные зондовые методики, остается актуальной до настоящего времени. В спектре разнообразных предлагавшихся и применявшихся в последние годы для этих целей методик [1 – 5] наиболее устоявшейся при определении поперечного распределения потенциала плазмы выглядит сейчас методика зондирования плазмы пучком тяжелых ионов [1 – 3]. Тем не менее использование этой методики в крупных плазменных установках сопряжено с рядом принципиальных трудностей. Во-первых, это необходимость знания точной картины распределения квазистационарного магнитного поля для расчета траекторий первичных и вторичных зондирующих частиц. Во-вторых, отсутствие возможности испытаний, настройки и калибровки диагностического комплекса в целом вне рабочего цикла установки (т.е. без плазмы и без магнитного поля). Сюда можно добавить также жесткие требования к стабильности энергии ионов в зондирующем пучке для достижения необходимой точности измерений.

Авторы данной работы предприняли попытку разработать методику измерений распределения потенциала

высокотемпературной плазмы, свободную от перечисленных трудностей.

Схема диагностического комплекса для измерений распределения потенциала плазмы представлена на рисунке. При рассеянии на угол  $\theta$  атомов пучка 1, имеющих массу  $m_1$  и энергию  $E_0$ , на ионах зондирующего пучка 2, имеющих массу  $m_2$ , энергию  $E'_2 = E_2 - q\phi$  (где  $E_2$  – энер-

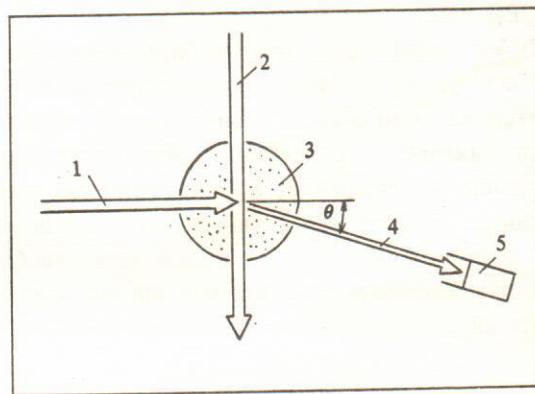


Схема диагностического комплекса: 1 – рассеивающийся атомарный пучок; 2 – зондирующий ионный пучок; 3 – плазма; 4 – рассеивающиеся быстрые атомы; 5 – система регистрации

гия ионов пучка на выходе из инжектора,  $\varphi$  — потенциал плазмы в точке рассеяния) и движущихся по направлению нормали к вектору скорости рассеивающихся атомов, энергетический спектр рассеянных атомов смещается на величину

$$\delta E = E_1 - E_0 = E_0 \left\{ \gamma \cos \theta + \sqrt{\gamma E_2' / E_0} \sin \theta + \sqrt{1 - \gamma^2 \sin^2 \theta + \gamma \sin^2 \theta E_2' / E_0 + \gamma \sin 2\theta \sqrt{\gamma E_2' / E_0}} \right\} / (1 + \gamma) - 1.$$

Здесь  $E_1$  — средняя энергия рассеянных атомов;  $\gamma = m_1 / m_2$ . В случае, когда  $\sin \theta \ll 1$ ,  $\gamma \sin \theta \ll 1$ ,  $\gamma \sin \theta E_2' / E_0 \ll 1$ , это выражение значительно упрощается:

$$\delta E \approx 2\theta \sqrt{\gamma E_2' E_0} - \gamma \theta^2 E_0.$$

Отсюда, полагая  $q\varphi / E_2 \ll 1$ , получаем выражение для потенциала плазмы в явном виде:

$$\delta E \approx 2\theta \sqrt{\gamma E_2 E_0} - q\varphi \theta \sqrt{\gamma E_0 / E_2} - \gamma \theta^2 E_0 \quad (1)$$

или

$$\varphi \approx \left\{ 2\theta \sqrt{\gamma E_2 E_0} - \gamma \theta^2 E_0 - \delta E \right\} / (q\theta \sqrt{\gamma E_0 / E_2}).$$

Таким образом, измеряя смещение энергетического спектра атомов, рассеянных на ионах зондирующего пучка, от энергетического спектра атомов, рассеянных на ионах тяжелых примесей плазмы (или на нейтральной компоненте зондирующего пучка), можно определить потенциал плазмы в объеме рассеяния. Изменяя путем наклона или перемещения пучков и анализатора положение наблюдаемой области рассеяния, можно определить распределение потенциала по сечению плазмы.

Дифференциальное сечение рассеяния в лабораторной системе координат в случае незранированного кулоновского взаимодействия ядер определяется выражением

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left[ \frac{Z_1 Z_2 e^2}{E_0 + \gamma E_2'} \frac{1 + \gamma}{2} \right]^2 \frac{1}{\sin^4(\chi/2)} \cdot R(\chi, \gamma, E_0, E_2'). \quad (2)$$

Здесь  $\chi$  — угол рассеяния в системе центра масс;  $R(\chi, \gamma, E_0, E_2') \sim 0,5$ .

**Выбор параметров.** При выборе конкретной пары атом—ион, угла рассеяния и энергий пучков необходимо добиться разумного компромисса между желанием получить максимальное временное или пространственное разрешение (уменьшая  $\theta$ ,  $E_0$ ) и точностью измерения потенциала (увеличение точности достигается увеличением параметра  $\theta \sqrt{\gamma E_0 / E_2}$ ). Кроме того, необходимо, чтобы ларморовский радиус ионов превосходил  $L$  — характерный размер области, занятой магнитным полем  $H$ , т.е.

$$m_2 E_2 > \frac{1}{2} (qHL/c)^2.$$

Для того чтобы не было проблем с фоном частиц, рассеянных на ионах плазмы, необходимо иметь предельный угол

рассеяния  $\theta_{\text{пр}} = \arcsin(m_1/m_2)$  меньше выбранного угла рассеяния  $\theta$  ( $m_1$  — масса ионов плазмы).

Пусть  $\theta = 10^\circ$ . Тогда из условия  $\theta > \theta_{\text{пр}}$  получаем  $m_1 > 5,8m_2$ . Рассмотрим рассеяние пучка атомов азота  $N^0$  на пучке ионов аргона  $Ar^+$ . Возьмем  $E_0 = 14$  кэВ,  $E_2 = 4$  кэВ. Тогда из (1) для энергии  $E_1$  рассеянных атомов получаем  $E_1 = 15,4$  кэВ —  $0,2q\varphi$  ( $\varphi$  выражено в вольтах), т.е. энергия рассеянных на ионном пучке атомов более чем на 1 кэВ превышает энергию инжекции  $E_0$ , что снимает проблемы с фоном частиц, образующихся в результате двойной перезарядки атомов пучка в плазме.

В экспериментах по измерению ионной температуры методом рассеяния быстрых атомов [6 — 8] характерная плотность плазмы  $n_i \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Достижимая нами плотность ионов  $Ar^+$  в пучке инжектора ДИНА [9]  $n_{Ar} (\approx E^2) \approx (1 \div 5) \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ , но необходимо учесть, что сечение рассеяния незранированного кулоновского взаимодействия в нашем случае в  $(Z_N Z_{Ar})^2 \approx 1,6 \cdot 10^4$  раз больше, а это перекрывает разницу в плотности мишени.

Однако наши эксперименты по рассеянию пучка  $N^0$  на аргоновой газовой мишени [10] показали, что при выбранных параметрах эксперимента существенным оказывается влияние экранирования зарядов ядер и сечение рассеяния  $N^0 \rightarrow Ar$  примерно на порядок меньше расчетного. Таким образом, величина ожидаемого в нашем случае потока рассеянных атомов сравнима с соответствующей величиной в экспериментах по измерению температуры ионов плазмы с плотностью  $n_i \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , что с учетом отсутствия проблем с фоном не кажется проблематичным.

В настоящее время авторами начаты первые эксперименты по отработке методики и по измерению потенциала плазменной струи в аксиально-симметричном пробкотроне [8].

#### Список литературы

1. Hickok R.L. Plasma Density Measurements by Molecular Ion Breakup. — Rev. Sci. Inst., 1967, vol. 38, № 1, p. 142–143.
2. Jobes F.C., Marshall J.F., Hickok R.L. Plasma density measurement by ion-beam probing. — Phys. Rev. Lett., 1969, vol. 22, № 20, p. 1042–1045.
3. Jobes F.C., Hickok R.L. Direct measurement of plasma space potential. — Nucl. Fusion, 1970, vol. 10, № 2, p. 195–197.
4. Давыденко В.И., Иванов А.А., Кабанцев А.А. и др. Корпускулярные методы диагностики плазмы для установки АМБАЛ. — В кн.: Диагностика плазмы, вып. 5. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
5. Кудрявцев А.М., Сорокин А.Ф. Использование двойной перезарядки для измерения электрического поля и плотности плазмы: Препринт ИЯФ СО АН СССР 79-151. — Новосибирск, 1979.
6. Александров Е.В., Афросимов В.В., Березовский Е.Л.

- и др. Измерение локальных параметров ионов в плазме Токамака-4. — Письма в ЖЭТФ, 1979, т. 29, вып. 1, с. 3 — 7.
7. Березовский Е.Л., Кисляков А.И., Петров С.Я., Росляков Г.В. Измерение температуры ионов в горячей плазме по рассеянию быстрых атомов. — Физика плазмы, 1980, т. 6, вып. 6, с. 1385 — 1395.
8. Иванов А.А., Кабанцев А.А., Росляков Г.В., Таскаев С.Ю. Плазменная струя в неоднородном магнитном поле: Препринт ИЯФ СО АН СССР 86-77. — Новосибирск, 1986.
9. Давыденко В.И., Морозов И.И., Росляков Г.В. Диагностический инжектор атомов водорода. — Физика плазмы, 1981, т. 7, вып. 2, с. 464 — 469.
10. Кабанцев А.А., Таскаев С.Ю. Нелинейные эффекты при рассеянии интенсивных атомарных пучков в тяжелых газах: Препринт ИЯФ СО АН СССР 88-126. — Новосибирск, 1988.

Статья поступила в редакцию  
20 октября 1988 г.

Вопросы атомной науки и техники.  
Сер. Термоядерный синтез, 1989, вып. 2, с. 43 — 45.