

УДК 533.9.082.76

АНАЛИЗАТОР ПАРАМЕТРОВ ИОННОЙ КОМПОНЕНТЫ ЗАМАГНИЧЕННОГО ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА

© 1998 г. В. И. Волосов, А. Г. Шешов, И. Н. Чуркин

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск-90, просп. Акад. Лаврентьева, 11

Поступила в редакцию 07.10.96 г.

После доработки 17.11.97 г.

Описан простой анализатор для исследования основных параметров замагниченных ионов в плазменном потоке, а именно: продольной скорости ионов, спектра поперечных энергий ионов, пространственного распределения плотности ионов в потоке, полного тока ионов. Приведены результаты измерений параметров плазменного потока с замагниченными тяжелыми ионами, полученные на плазменном источнике со скрещенными полями.

Во многих плазменных установках, например, плазменных пушках для заполнения форплазмой магнитных ловушек [1, 2], установках для разделения изотопов методом ионно-циклотронного резонанса (и.ц.р.) [3], источниках ионов [3–5], используются плазменные потоки с замагниченными ионами. Ниже описан простой анализатор для исследования параметров ионной компоненты замагниченного плазменного потока в проектируемой установке по разделению изотопов методом и.ц.р.-нагрева.

Анализатор (рис. 1) состоит из одного или нескольких соосных цилиндрических электродов 2 различного диаметра, находящихся внутри цилиндрического корпуса, закрытого диафрагмой 1. Ось диафрагмы совпадает с осями цилиндров. Плазменный поток в осевом магнитном поле B (0.1–3 Тл), падающий на диафрагму анализатора, вырезается ее отверстием диаметром $D \ll R_L$ (R_L – ларморовский радиус иона). Плазма, прошедшая внутрь анализатора, пространственно разделяется из-за значительного различия ларморовских радиусов ионов и электронов. Для нормальной работы анализатора должно выполняться условие $R_{Le} \ll R_{k \min}$, где $R_{k \min}$ – радиус наименьшего измерительного электрода, R_{Le} – ларморовский радиус электрона. При выполнении этих условий спектр поперечных энергий не искажается из-за электронов, приходящих на центральный цилиндрический электрод. Измерительный цилиндрический электрод радиусом R_{ki} собирает ионы с ларморовскими радиусами R_L , лежащими в диапазоне

$$R_{ki} \leq 2R_L \leq R_{ki+1}.$$

При этом поперечная энергия ионов W_{\perp} с массой M_i и зарядом q лежит в диапазоне

$$\frac{(qBR_{ki})^2}{8M_i} \leq W_{\perp} < \frac{(qBR_{ki+1})^2}{8M_i}. \quad (1)$$

Таким образом, анализатор позволяет измерять спектр поперечных энергий.

При работе с анализатором необходимо учитывать ряд эффектов, влияющих на ионный ток, измеряемый на цилиндрических электродах.

Рассмотрим эффекты, возникающие при прохождении иона через отверстие в диафрагме. Потеря части ионов на краях диафрагмы приводит к искажению спектра поперечных энергий. Ион проходит через отверстие в диафрагме, если его продольная скорость V_{\parallel} удовлетворяет условию

$$V_{\parallel} > \frac{d}{l} V_{\perp}, \quad (2)$$

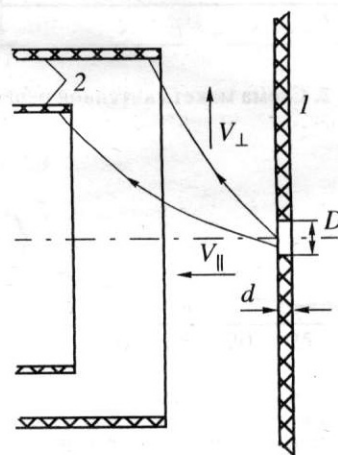


Рис. 1. Схема анализатора.

где d – толщина диафрагмы; l – расстояние, которое ион проходит в отверстии диафрагмы в поперечном направлении за время пролета $t = d/V_{\parallel}$; V_{\perp} – поперечная скорость иона. Расстояние l представляет собой дугу ларморовской окружности, но при $R_L \gg D$ дугу можно считать отрезком прямой.

Для удобства расчета полного количества ионов N_p , проходящих через отверстие, рассмотрим два случая, определяемых соотношением поперечной и продольной энергий (рис. 2а, 2б): $l > R_d$ и $l < R_d$, где $R_d = D/2$ – радиус отверстия.

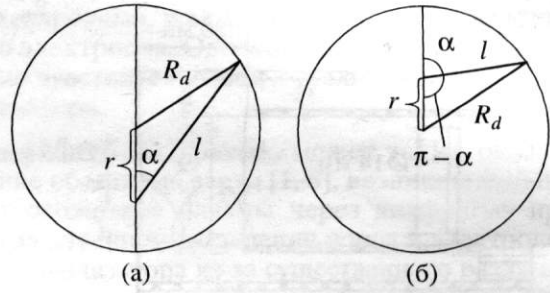


Рис. 2. Два случая входа ионов в отверстие диафрагмы.

В первом случае

$$N_p = 2n \int_{l-R_d}^{R_d} r \arccos \frac{l^2 + r^2 - R_d^2}{2rl} dr.$$

Во втором случае

$$N_p = n\pi R_d^2 - 2n \int_{R_d-l}^{R_d} r \arccos \frac{R_d^2 - l^2 - r^2}{2rl} dr.$$

Здесь n – плотность потока ионов до диафрагмы.

Коэффициент прохождения ионов с определенным соотношением продольной и поперечной энергий через отверстие определяется как

$$K = \frac{N_p}{n\pi R_d^2}. \quad (3)$$

Таким образом, по продольной скорости плазменного потока можно вычислить поправочные коэффициенты K_i для ионного тока i -го измерительного цилиндрического электрода.

Используя эффект потери ионов на диафрагме, можно определить максимальную продольную скорость ионного потока по “отсечке” измеряемого ионного тока. Для этого используется зависимость тока ионов с одинаковой поперечной энергией (т.е. тока, измеряемого на одном измерительном электроде) от отношения толщины диафрагмы к диаметру отверстия d/D .

Из неравенства (2) вытекает условие для продольной скорости, при котором ионы не проходят через отверстие

$$V_{\parallel} \leq V_{\perp} d/D.$$

Ионный ток на измерительном электроде равен нулю и тогда получаем следующее выражение для максимальной продольной скорости ионов:

$$V_{\parallel \max} \leq \frac{dqBR_L}{D 2M_i}. \quad (4)$$

Если время оборота иона по ларморовской окружности меньше, чем время пролета иона между краями соседних цилиндрических электро-

дов, то измеряемый спектр энергий смещается. Часть ионов значительной энергии не успевает сделать оборот внутри анализатора и оседает на меньшем электроде, служащем для регистрации ионов с меньшей поперечной энергией. Для устранения ошибок, связанных с этим эффектом, расстояние L между краями соседних электродов должно удовлетворять условию $L \geq V_{\parallel} t_{об} = 2\pi R_L V_{\parallel} / V_{\perp}$, где $t_{об}$ – время оборота иона по ларморовской окружности.

Смещая анализатор по радиусу плазменного потока и суммируя ионные токи, измеренные всеми электродами, с учетом поправочных коэффициентов для каждого электрода на потери на диафрагме можно определить радиальное распределение плотности ионов

$$n(r) = \frac{I_{\Sigma}(r)}{S_d q V_{\parallel}}, \quad (5)$$

где $I_{\Sigma}(r) = \sum_i K_i I_i(r)$ – суммарный ток ионов, прошедших через диафрагму, S_d – площадь отверстия диафрагмы.

Полный ионный ток в плазменном потоке I_S находится интегрированием

$$I_S = \int_0^R 2\pi q V_{\parallel} n(r) r dr, \quad (6)$$

где R – характерный размер плазменного потока.

Экспериментальная проверка анализатора проводилась на универсальном плазменном источнике ИСП [6], разработанном в ИЯФ СО РАН для использования в системах по разделению изотопов. Источник работал в режиме S-разряда в ловушке со скрещенными полями (радиальное электрическое и аксиальное магнитное) [7]. Плазменный поток с замагниченными тяжелыми ионами вытекал из источника вдоль силовых линий аксиального магнитного поля через выпускной канал $\varnothing 50$ мм, на выходе которого были проведены все измерения. Характерные параметры источника: разрядный ток ~ 50 А, напряжение на разряде

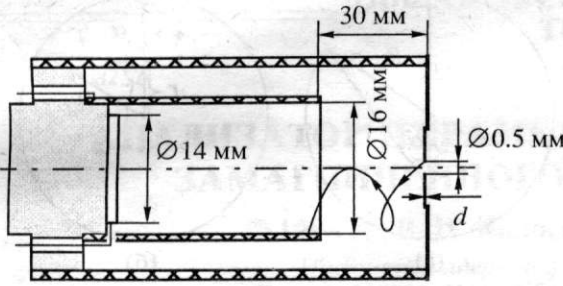


Рис. 3. Анализатор для измерения продольной скорости потока.

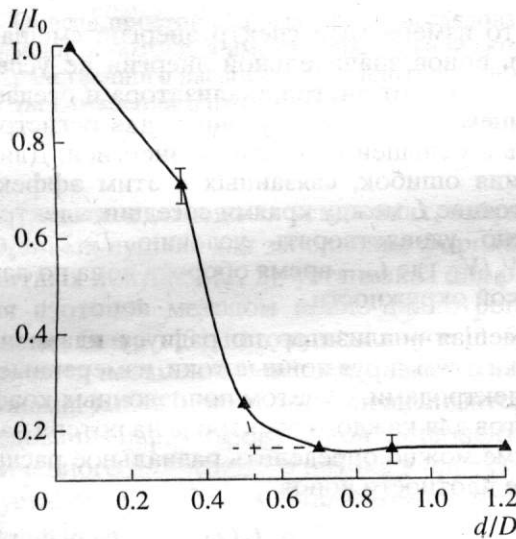


Рис. 4. Зависимость ионного тока от отношения d/D на расстоянии 10 мм за магнитной пробкой.

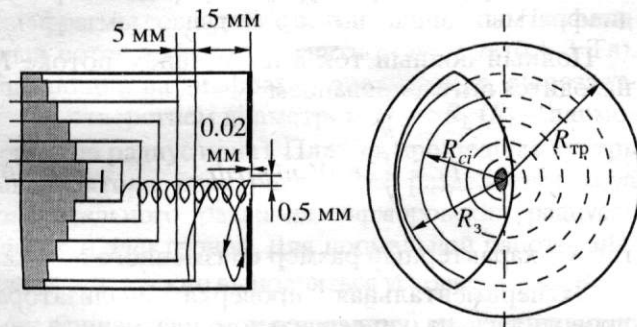


Рис. 5. Анализатор для измерения спектра поперечных энергий и радиального распределения плазмы. $R_{ci} = 4, 8.5, 13, 17.5, 22$ мм, $R_3 = 23.5$ мм – внешний размер (условный радиус) анализатора, $R_{тр}$ – радиус выпускного канала источника, $d = 20$ мкм.

~5 кВ, длительность разряда 4 мс, магнитное поле 0.8 Тл, рабочее вещество – титан. В источнике этого типа свыше 90% ионов в плазменном потоке являются однозарядными.

Параметры ионной компоненты плазменного потока анализировались с помощью анализаторов двух модификаций.

1. Для измерения продольной скорости потока использовался анализатор (рис. 3), состоящий из корпуса, измерительного цилиндрического и плоского электродов. Использовались диафрагмы с различными толщинами d и диаметром отверстия $D = 0.5$ мм. На внутренний цилиндр радиусом $R_c = 8$ мм попадают ионы с ларморовскими радиусами $R_k/2 > R_L \geq R_c/2$, где $R_k = 9.5$ мм – внутренний радиус корпуса анализатора. При этом диапазон поперечных энергий ионов, попадающих на цилиндрический электрод,

$$7.5 \text{ эВ} \leq W_{\perp} < 10.5 \text{ эВ} \quad (W_{\perp} = 9.35 \pm 1.85 \text{ эВ}).$$

На измеренной зависимости (рис. 4) ионного тока на измерительном электроде от отношения d/D ($D = 0.5$ мм; $d = 20, 100, 150, 250, 350, 450, 600$ мкм) видно, что “отсечка” ионного тока на цилиндр происходит при $d/D = 0.53$. При этом верхняя граница спектра продольных скоростей $V_{\parallel \max} = 0.53 V_{\perp} = (3.3 \pm 0.3) 10^5$ см/с (см. (4)).

2. Для измерения спектра поперечных энергий, радиального распределения плотности плазмы и полного тока тяжелых ионов использовался анализатор с одной диафрагмой и набором вложенных измерительных цилиндрических электродов специальной формы (рис. 5).

Энергетические спектры тяжелых ионов, измеренные на различных расстояниях от оси плазменного потока, представлены на рис. 6. При восстановлении спектра поперечных энергий однократно заряженных ионов Ti были рассчитаны и учтены поправки, связанные с прохождением ионов через диафрагму и с потерями части ионов на стенках анализатора. Следует заметить, что для ионов с различными поперечными энергиями эти поправки различны.

Радиальное распределение плотности тяжелых ионов, рассчитанное по формуле (5) при продольной скорости $V_{\parallel} = 3.3 \cdot 10^5$ см/с, показано на рис. 7. Проведенные измерения позволяют оценить суммарный ток ионов Ti в плазменном потоке $I_{\Sigma} \sim 0.6$ А (см. (6)).

При измерении спектра поперечных энергий и определении радиального распределения плотности ионов считалось, что продольная скорость равна максимальной скорости ионов $V_{\parallel \max} = 3.3 \cdot 10^5$ см/с. Вообще говоря, условие $V_{\parallel} = V_{\parallel \max}$ приводит к искажению энергетического спектра, особенно в области малых поперечных энергий ($W_{\parallel} \sim W_{\perp}$). Однако для исследованного плазменного потока, в котором $W_{\parallel \max} \ll \bar{W}_{\perp}$, где \bar{W}_{\perp} – средняя поперечная энергия ионов (см. рис. 6), это предположение слабо влияет на результаты измерений.

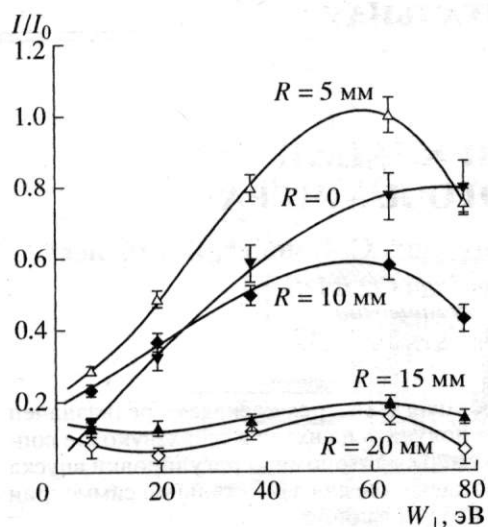


Рис. 6. Спектры поперечной энергии ионов Ti на различных расстояниях от оси плазменного потока ($I_0 = 35$ мкА).

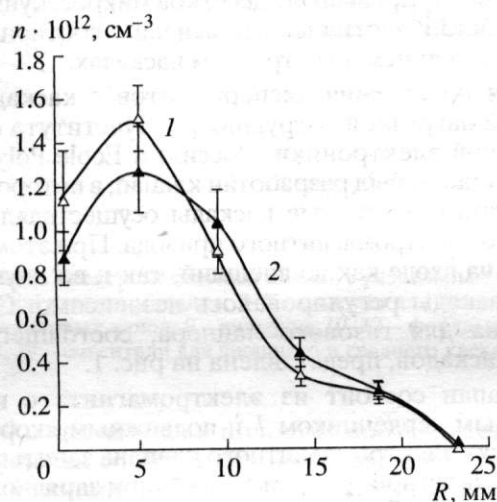


Рис. 7. Типичные радиальные распределения плотности ионов Ti в плазменном потоке на различных расстояниях от среза источника (1 – 10 мм, 2 – 70 мм).

Ниже представлены погрешности измерения поперечной энергии в диапазоне, определяемом формулой (1), анализатором с цилиндрическими электродами (рис. 5):

R_c , мм	4	8.5	13	17.5	22
W_{\perp} , эВ	7.1	19.4	38.2	63.5	78
$\pm \Delta W_{\perp}$, эВ	4.5	7.7	10	14.2	4.6

Точность измерений энергии W_{\perp} в основном определяется расстоянием между измерительными

электродами, и ее можно повысить, увеличив число электродов. Однако это приводит к уменьшению чувствительности и увеличению размеров анализатора.

На работу анализатора может также оказать влияние объемный заряд [1, 8], возникающий после прохождения плазмы через диафрагму при пространственном разделении ионов и электронов внутри анализатора из-за существенного различия их ларморовских радиусов. Чтобы проверить это, на анализатор устанавливались диафрагмы одинаковой толщины с отверстиями различных диаметров. Ток анализатора с учетом всех поправочных коэффициентов изменялся пропорционально площади отверстия (до 0.8 мм^2), что указывает на отсутствие влияния объемного заряда на измерение.

Экспериментальная проверка путем установки на входном отверстии в диафрагме специальных сеток с характерными размерами, меньшими дебаевского радиуса экранирования плазмы, показала, что амбиполярный потенциал, который может возникнуть в окрестности диафрагмы из-за изменения плотности плазмы [9], не вносит существенных искажений в измерения энергетических спектров ионов.

В дальнейшем мы планируем использовать этот анализатор для диагностики параметров ионов в рабочей камере установки по разделению изотопов методом и.ц.р.-нагрева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Габович М.Д., Плишивцев Н.В., Семашко Н.Н. Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей. М.: Энергоатомиздат, 1986. С. 16, 45–51.
2. Плазменные ускорители / Под. ред. Л.А. Арцимовича, С.Д. Гришина, Г.Л. Гродзовского. М.: Машиностроение, 1973. С. 32.
3. Муромкин Ю.А. // Итоги науки и техники. Сер. Физика плазмы. 1991. Т. 12. С. 85.
4. Martinez R., Istra M., Orthel J. et al. // IEEE Int. Conf. on Plasma Science. San Diego, Calif. 1983. IEEE Conf. Record Abstracts. 1983. P. 71.
5. Карчевский А.И., Лазько В.С., Муромкин Ю.А. и др. Препринт № 5239/7. М.: ИАЭ, 1990. С. 16.
6. Волосов В.И., Чуркин И.Н. Препринт № 94-75. Новосибирск: ИЯФ, 1994. С. 3.
7. Volosov V.I., Abdrashitov G.F., Bekhtenev A.A. et al. // J. of Nucl. Materials. 1984. V. 128, 129. P. 445.
8. Козлов О.В. // Электрический зонд в плазме. М.: Атомиздат, 1969. С. 20–21.