

МНОГОХОРДОВАЯ КОРПУСКУЛЯРНАЯ ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЕННОГО ШНУРА, СЖИМАЕМОГО МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

*В.В.Афросимов, Е.Л.Березовский А.И.Кисляков,
С.Г.Щемелин, А.В.Худолеев*

Проведены многохордовые измерения плотности и температуры ионов при сжатии плазмы тороидальным магнитным полем на установке Туман-2А. По изменению концентрации во времени определен коэффициент диффузии. Обнаружено, что при сжатии плазмы со скоростью, близкой к скорости диффузии, нагрев ионов определяется возрастанием плотности плазмы.

При исследовании сжатия плазмы важно иметь возможность определять изменение радиальных распределений концентрации n_i и температуры T_i ионов. Для решения этой задачи был создан комплекс аппаратуры (рис. 1), состоящий из многоканальных инжекторов и анализатора,

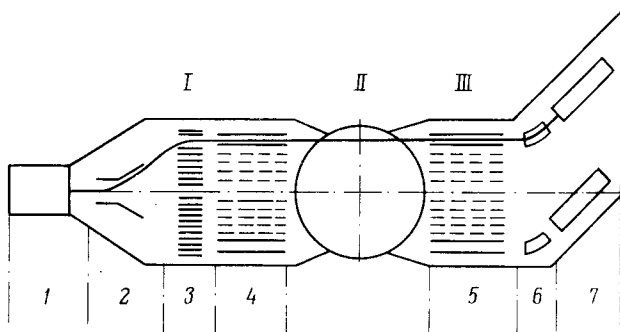


Рис. 1. Схема диагностической аппаратуры: I — инжектор, II — плазма, III — анализатор, атомных частиц

который позволяет проводить измерения распределений n_i и T_i за один разряд плазменной установки. Использование многоканальной аппаратуры позволяет сократить число разрядов, необходимых для измерений, и уменьшить ошибки, связанные с невоспроизводимостью параметров плазмы. Для определения распределения n_i используется метод многохордового зондирования плазмы пучками атомов водорода, при котором интегральная плотность ионов вдоль пути пучка $\bar{n}_i L$ определяется по величине ослабления интенсивности пучка, проходящего через плазменный шнур. Осуществление многохордового зондирования производится путем многократного последовательного переключения зондирующего пучка в течение разряда по 11 параллельным хордам с частотой до 100 кгц. Для этого ионы из источника 1 (рис. 1) после фокусировки направляются в конденсатор 2, на пластины которого подается ступенчатое высоковольтное напряжение, обеспечивающее 11 фиксированных положений пучка, направленных под различными углами к его первоначаль-

ному направлению. Отклоненный пучок поступает в электростатическую линзу 3, обеспечивающую выход пучка параллельно оси установки независимо от места и направления входа пучка в линзу. Далее пучок ионов попадает в камеру перезарядки 4, где часть ионов нейтрализуется в газе, и образующийся пучок атомов поступает в плазму. Для измерения интенсивности прошедшего через плазму пучка атомы подвергаются обдирке в газе в камере 5 анализатора III. Образующиеся ионы анализируются по массе анализатором 6 и регистрируются электронными умножителями 7 в каждом из каналов прибора. Модуляция пучка, возникающая при переключении с канала на канал, позволяет в течение всего разряда контролировать уровень фона, не связанного с зондирующим пучком.

Анализатор атомов, входящий в состав комплекса, позволяет измерять распределения ионной температуры путем анализа энергетических спектров атомов перезарядки, испускаемых плазмой, при этом измерения потоков атомов могут быть проведены по 11 хордам одновременно.

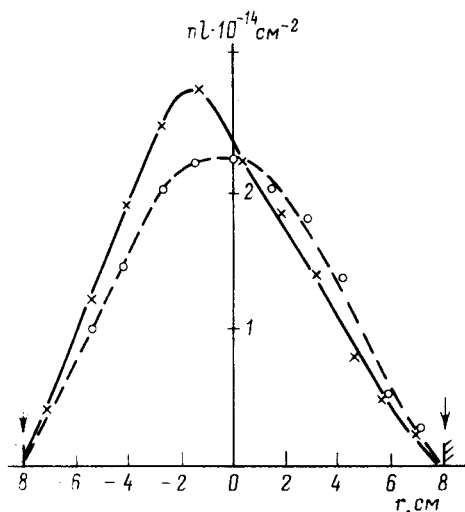


Рис. 2. Распределения интегральной плотности протонов: ● — в режиме омиического нагрева, перед сжатием, × — в момент максимума сжатия. Стрелками показано положение диафрагмы

Исследование сжатия плазмы было проведено на токамаке Туман-2А с большим радиусом 40 см и радиусом диафрагмы 8 см; ток по плазме составлял 10 кА. Торoidalное магнитное поле во время сжатия увеличивалось с 8 до 16 кэ за 500 мксек. Соответствующее возрастание интегральной плотности по диаметру плазменного шнура в случае в замороженности плазмы в магнитное поле должно составлять величину $\left(\frac{H_{сж}}{H_0}\right)^{1/2} = 1,4$, а возрастание ионной температуры — $\left(\frac{H_{сж}}{H_0}\right)^{2/3} = 1,6$.

Как видно из рис. 2, увеличение максимальной величины интегральной плотности при сжатии составляет 25%. Подобные распределения плотности ионов были получены также для других моментов времени как в процессе сжатия, так и во время распада плазмы после достижения сжимающим полем максимума. По изменению концентрации плазмы

во времени была оценена величина коэффициента диффузии плазмы. Во время возрастания магнитного поля коэффициент диффузии оказался равным $5 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{сек}$, а при распаде плазмы он уменьшается до $2 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{сек}$. Это свидетельствует об увеличении времени жизни частиц в сжатом шнуре.

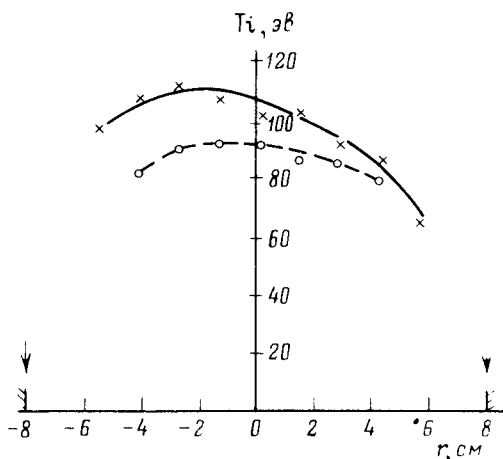


Рис. 3. Распределение ионной температуры по радиусу плазменного шнура:
 o — перед сжатием, x — в момент максимума сжатия

В том же режиме разряда температура ионов в центре при омическом нагреве составляет 90 эВ (рис.3), что хорошо согласуется с формулой Арцимовича. При сжатии температура ионов возрастает в 1,2 раза, т.е. меньше, чем можно было ожидать, исходя из механизма нагрева ионов, связанного с бетатронным эффектом, возникающим при возрастании магнитного поля [1]. Это отличие можно объяснить охлаждением ионов плазмы вследствие ее диффузии. Как показано в работе [2], в частном случае, когда магнитное сжатие производится со скоростью, равной скорости диффузии, плотность плазмы не меняется, а нагрев ионов за счет бетатронного эффекта полностью компенсируется их охлаждением при азимутальном дрейфе в радиальном электрическом поле, возникающем вследствие диффузии плазмы. Этот же эффект должен приводить к дополнительному нагреву электронов. Можно показать, что в случае, когда сжатие плазмы происходит со скоростью не намного превышающей скорость диффузии, изменение температуры должно быть связано с наблюдаемым изменением плотности плазмы, т.е. составлять величину $(n_{сж}/n_0)^{2/3} = 1,3$. Эта величина близка к наблюдаемому в эксперименте изменению T_i .

Таким образом, с помощью многохордовых корпускулярных измерений, которые являются удобным способом контроля изменения пространственных распределений плотности и температуры ионов, изучено поведение ионной компоненты плазмы при магнитном сжатии со ско-

ростью, сравнимой со скоростью диффузии, и предложено объяснение наблюдаемого нагрева ионов.

В заключение авторы выражают благодарность сотрудникам установки Туман-2А за помощь в работе и полезные обсуждения результатов.

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
23 августа 1978 г.

Литература

- [1] Л.А.Арцимович. Управляемые термоядерные реакции. М., Гос. изд. физ.-мат. лит-ры., 1963, стр.300.
- [2] С.И.Брагинский. Сб. "Вопросы теории плазмы". М., Госатомиздат. вып.1, 1963, стр.231.
-