

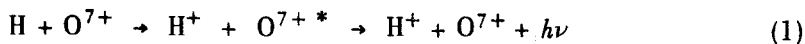
РАДИАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЯДЕР КИСЛОРОДА В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА T-10

*А.Н.Зиновьев, А.А.Коротков, Е.Р.Кржижановский,
В.В.Афросимов, Ю.С.Гордеев*

Методом зондирования плазмы пучком быстрых атомов водорода [1] впервые измерено радиальное распределение концентрации ядер кислорода. Показано отсутствие заметного накопления кислорода в плазме на стационарной стадии разряда и оценено диффузионное время жизни ядер кислорода $\tau = 14$ мсек.

Измерение концентраций ионов примесей и их радиальных распределений необходимо для анализа энергетического баланса плазмы и изучения диффузии. Поскольку наиболее важные легкие примеси (углерод, кислород) в центральной зоне современных токамаков находятся в виде ядер и недоступны для обычных спектроскопических методов диагностики, большое значение имеет развитие прямых локальных методов контроля содержания ядер примесей.

В настоящей работе для измерения радиальных распределений концентрации ядер кислорода использовался метод корпускулярно-спектроскопической диагностики, предложенный в работе [1] и основанный на инжекции в плазму пучка быстрых атомов водорода. При столкновениях атомов водорода с ядрами кислорода вследствие процесса захвата электрона



образовывались возбужденные водородоподобные ионы O^{7+*} и возникало дополнительное излучение характеристических линий этих ионов. Измерялась абсолютная величина возрастания интенсивности L_α линии ионов O^{7+} (19 Å). Наблюдение велось вдоль большого диаметра тора. Измерение радиального распределения концентрации примеси производилось качанием инжектора. В качестве детектора излучения использовался вторичный электронный умножитель с фотокатодом из CsJ, имеющим квантовый выход 30% для длины волны $\lambda = 19$ Å. Полоса чувствительности детектора (18 — 19,4 Å) определялась используемыми фильтрами (пленки из фторопласта и алюминия толщиной соответственно 5 и 1,5 мкм). Помимо фильтров перед фотокатодом под углом 4° к направлению падения излучения было установлено никелевое зеркало, предотвращавшее попадание на фотокатод жесткого излучения ($\lambda < 14$ Å) [2], пропускаемого фильтрами. Результирующая чувствительность полосового детектора составляла $8 \cdot 10^{-4}$ имп / фотон. Проверка отсутствия в полосе чувствительности детектора посторонних линий проводилась с помощью фотоэлектронного спектрометра [3], который использовался также для абсолютной калибровки детектора непосредственно на испускаемом плазмой излучении с длиной волны 19 Å. Калибровка полосового детектора дополнительно проверялась при помощи калиброванного спектрометра с плоским кристаллом и коллиматором Соллера. Величины интенсивностей линии L_α иона O^{7+} из плазмы, измеренные детектором и спектрометром, совпали в пределах точности калибровок.

Исследования проводились на токамаке Т-10. Изучался разряд в дейтерии с параметрами: ток разряда 230 кА, магнитное поле 15 кЭ, средняя электронная плотность в плазме $\bar{n}_e = 2 \cdot 10^{13}$ см⁻³, электронная и ионная температуры в центре плазмы $T_e = 1,1$ кэВ, $T_i = 550$ эВ, радиус графитовой диафрагмы $a = 29$ см. Использовался инжектор пучка атомов водорода [4] с эквивалентной плотностью тока пучка в плазме 3,5 мА/см². Энергия атомов водорода составляла 12 кэВ, длительность инъекции 200 мксек. Сбор излучения производился из объема с размерами $8 \times 7 \times 4$ см³.

Исходя из абсолютной интенсивности дополнительного излучения линии L_α иона O^{7+} , сечения захвата электрона [5] и каскадного фактора $\beta = 0,55$ были определены значения концентрации ядер $n [O^{8+}]$ в различных точках плазмы (рис. 1). В центре шнура она составляет 0,25% от средней плотности электронов. Значительная величина погрешностей (30 — 50%), указанных на рис. 1, была связана с обусловленной плазменными колебаниями существенной модуляцией собственного свечения плазмы на длине волны 19 Å, затруднявшей выделение дополнительно излучения при инъекции пучка.

Поскольку при подготовке камеры токамака помимо обычного прогрева до 350° С никаких других мер очистки не предпринималось, измеренная величина концентрации кислорода в плазме кажется неожиданно малой. Выяснение причин этого явления требует дополнительных исследований.

Как видно из рис. 1, заметного накопления примеси в стационарной стадии разряда не происходит.

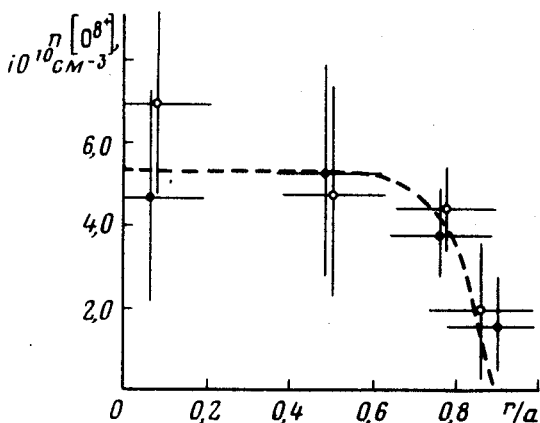


Рис.1. Радиальные распределения концентрации ядер кислорода в плазме токамака Т-10 для 300-й (темные точки) и 400-й (светлые точки) миллисекунд разряда. Пунктирная линия — расчет в стационарном корональном приближении относительно распределения ядер в предположении о равномерном распределении кислорода по шнуру. Кривая снормирована на экспериментальные данные при малых r/a

Проведенные исследования позволили оценить диффузионное время жизни ядер кислорода в плазме. Используемая методика давала возможность измерить абсолютную интенсивность собственного свечения плазмы на линии L_{α} иона O^{7+} , определяемую, главным образом, возбуждением ионов O^{7+} электронным ударом. Эту же интенсивность можно рассчитать, исходя из измеренного нами радиального распределения концентрации ядер и стационарного уравнения ионизационного баланса для ядер

$$\frac{n [O^{7+}]}{n [O^{8+}]} = \frac{n_e \langle \sigma_p v_e \rangle + n_H \langle \sigma_c v_i \rangle + \frac{1}{r}}{n_e \langle \sigma_i v_e \rangle}, \quad (2)$$

где n_e , n_H и $n [O^{7+}]$ — соответственно концентрации электронов, атомов водорода и ионов O^{7+} . $\langle \sigma_i v_e \rangle$, $\langle \sigma_p v_e \rangle$ и $\langle \sigma_c v_i \rangle$ — соответственно скорости ионизации O^{7+} электронами, фоторекомбинации ядер O^{8+} и захвата ими электрона у атомов водорода. Диффузионный член в этом уравнении учтен введением эффективного времени жизни ядер τ . В дальнейшем величина τ считалась от r независимой. Интенсивность свечения линии

$$B = \frac{1}{4\pi} \int_{-a}^a \langle \sigma_b v_e \rangle n_e n [O^{7+}] dr = \frac{1}{4\pi} \int_{-a}^a \frac{\langle \sigma_b v_e \rangle}{\langle \sigma_i v_e \rangle} \left(n_e \langle \sigma_p v_e \rangle + n_H \langle \sigma_c v_i \rangle + \frac{1}{\tau} \right) n [O^{8+}] dr, \quad (3)$$

где $\langle \sigma_b v_e \rangle$ — скорость возбуждения ионов O^{7+} электронным ударом.

При расчете ионизационного баланса использовались полученные из эксперимента радиальные распределения электронной плотности, электронной и ионной температур [6], а также радиальное распределение атомов водорода в плазме, рассчитанное Извозчиковым по программе [7] и снормированное таким образом, чтобы объяснить наблюдаемую

величину потока атомов перезарядки из плазмы. При этом концентрация атомов водорода в центре плазмы $n_H(0) = 1 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$.

$B \cdot 10^{-13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{стерад}^{-1}$

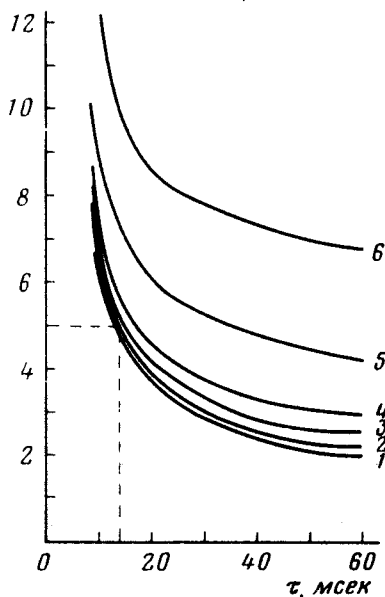


Рис.2. Зависимость интенсивности свечения линии L_α иона O^{7+} от диффузионного времени жизни ядер. Кривым соответствуют различные концентрации атомов водорода в центре плазмы $n_H(0)$: 1 - $4 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$, 2 - $1 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$, 3 - $2 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$, 4 - $4 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$, 5 - $1 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$, 6 - $2 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$. Пунктир - экспериментальное значение интенсивности линии

Результаты расчетов приведены на рис.2. (Как видно из рис.2 измеренному нами значению интенсивности свечения линии $B = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \times \text{сек}^{-1} \cdot \text{стерад}^{-1}$ соответствует значение $\tau = 14$ мсек. Полученный результат указывает на существование механизма, эффективно выводящего кислород из плазмы.

Авторы выражают благодарность коллективу установки Т-10 за большую помощь в работе, в особенности В.А.Крупину, и В.И.Бугаря за помощь в проверке калибровки детектора, а также А.В.Извозчикову и Е.Л. Березовскому за монтаж и наладку инжектора атомов.

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

Поступила в редакцию
1 июля 1980 г

Литература

- [1] В.В.Афросимов, Ю.С.Гордеев, А.Ю.Зиновьев. Письма в ЖТФ, 3, 97, 1977.
- [2] О.А.Ершов, И.А.Брытов, А.И.Лукирский. Оптика и спектроскопия, 22, 127, 1967.
- [3] В.В.Афросимов, Ю.С.Гордеев, А.Ю.Зиновьев, А.А.Коротков. Физика плазмы, 5, 987, 1979.
- [4] Г.И.Димов, Г.В.Росляков. ПТЭ, №1, 29, 1974.
- [5] A.Salop, R.E.Olson. Phys. Rev., A6, 1811, 1977.
- [6] A.V.Berlizov et al. Proc. Int. Conf. on Plasma Physics and Contr. Nuclear Fusion, Brussel, 1980.
- [7] А.В.Извозчиков, М.П.Щетров. Физика плазмы, 2, 212, 1976.