

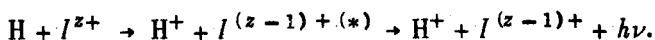
## АКТИВНАЯ ДИАГНОСТИКА ИОНОВ ПРИМЕСЕЙ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА Т-4

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

Впервые измерено абсолютное содержание ядер углерода в плазме методом, основанным на регистрации излучения, возникающего при перезарядке ионов примеси на атомах инжектируемого в плазму пучка. Показано отсутствие накопления легких примесей в плазме и оценено эффективное время ухода ядер углерода из центральной зоны шнура ( $20 \pm 10$  мсек).

При достигнутых в настоящее время параметрах разрядов в токамаках значительная часть вкладываемой в плазму энергии теряется вследствие излучения примесей. В то же время отсутствуют прямые методы контроля содержания легких примесей в плазме. Использование традиционных спектроскопических методов затруднено, что связано как с наличием большого числа процессов, приводящих к излучению ионов, так и с тем фактом, что основная часть легкой примеси (углерод, кисло-

род) находится в полностью ионизованном состоянии. В работе [1] нами предложен метод локальной диагностики содержания примесных ионов в плазме, в том числе и ядер, основанный на регистрации излучения, возникающего при инжекции в плазму пучка быстрых атомов водорода. При столкновении атома водорода с многозарядным ионом  $I^{z+}$  с большим сечением ( $10^{-15} + 10^{-14}$  см<sup>2</sup>) происходит захват электрона на возбужденный уровень иона  $I^{(z-1)+}$ :

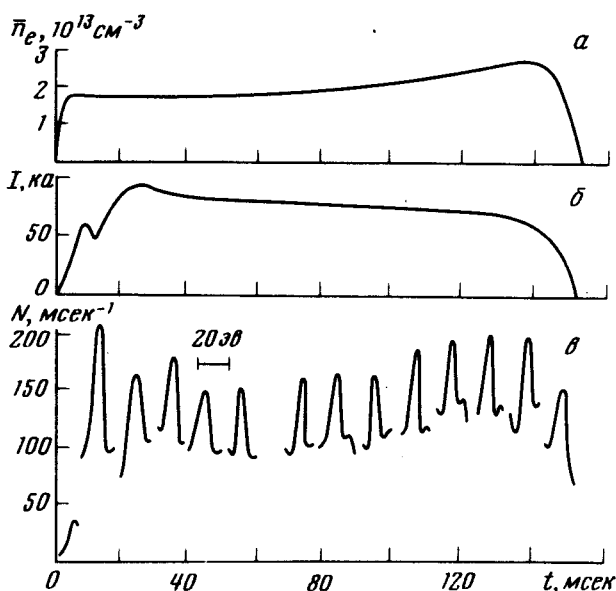


Наблюдая на различных участках пути пучка в плазме увеличение интенсивности характеристических линий, связанное с распадом образовавшихся при перезарядке возбужденных состояний ионов  $I^{(z-1)+}$ ; можно измерять абсолютное локальное содержание ионов примеси  $I^{z+}$ . Надежная информация имеется в настоящее время только о вероятностях заселения начальных возбужденных состояний по главным квантовым числам [2 - 4]. Поэтому практически единственно возможным для количественной диагностики оказывается наблюдение в активном эксперименте всплеска интенсивности  $L_\alpha$  линий ионов, так как вероятность этого перехода при каскадном распаде возбужденного состояния, образовавшегося при перезарядке, слабо зависит от схемы начального заселения по орбитальным моментам.

На установке Т-4 в ИАЭ им. И.В. Курчатова, где был реализован описываемый метод, использовался инжектор атомов, разработанный Димовым и Росляковым [5]. Энергия атомов водорода составляла 8 кэВ, время инжекции 180 мксек, эквивалентная плотность пучка в центре плазменного шнура - 10 мА/см<sup>2</sup>. При этих параметрах пучок практически не возмущал плазму. С целью повышения контрастности активного сигнала приемник излучения располагался под углом 7° к направлению зондирующего пучка. Область, из которой регистрировался сигнал, имела размеры 20 × 5 × 3 см<sup>3</sup>. Поскольку диаметр диафрагмы составлял 34 см, это позволяло выделить центральную горячую зону разряда. В качестве приемника излучения использовался разработанный нами фотоэлектронный спектрометр [6], в котором излучение с энергией  $E_\gamma$ , попадая на чувствительный элемент, преобразовывалось в электроны с энергией  $E_e = E_\gamma - J$  ( $J$  - известный потенциал ионизации атома мишени), и фотоэлектроны анализировались по энергии. Изменяя напряжение на анализаторе энергий электронов, можно анализировать по энергии излучение в течение разряда. Используемая схема управления позволяла снимать за разряд 15 разверток энергетического спектра фотонов при длительности разряда в установке 150 мсек. Это существенно увеличило также точность и объем получаемой информации при регистрации собственного свечения плазмы.

Временная развертка линии  $L_\alpha$  (33,7 Å) иона CVI для разряда в водороде приведена на рисунке. Интенсивность свечения этой линии, а так-

же других линий высокоионизованных состояний легких примесей к 30 мсек от начала разряда выходит на стационарный уровень, что свидетельствует об отсутствии накопления легких примесей в плазме.



Изменение интенсивности свечения линии  $L_{\alpha}(33,7\text{Å})$  иона  $\text{C VI}$  в течение разряда в токамаке Т-4 (в) Приведены также зависимости от времени средней электронной плотности (а) и тока разряда (б)

Метод активного зондирования плазмы был использован для изучения разрядов в водороде и гелии при наличии в установке диафрагмы из графита. Типичные параметры исследованных разрядов — ток разряда  $I = 90$  кА, тороидальное магнитное поле  $H_z = 30$  кэ, средняя плотность электронов  $\bar{n}_e = 2 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$ , электронная температура в центре шнура  $T_e(0) = 1$  кэВ. В водородной плазме, а также в гелиевой плазме с нетренированной камерой во время инъекции пучка атомов водорода наблюдался заметный всплеск излучения в области линии  $L_{\alpha}$  иона  $\text{C VI}$ . Возрастание интенсивности составляло  $8,6 \cdot 10^8$  и  $1,1 \cdot 10^9$  фотонов за импульс инъекции из см $^3$  плазмы в первом и во втором случаях соответственно. В гелиевом разряде после длительной тренировки камеры активный сигнал снижался и соответствовал возрастанию интенсивности  $3,6 \cdot 10^8$  фотонов/см $^3$  за импульс инъекции. Отсутствие подобного сигнала в холодной плазме тренировочного разряда, а также при уходе с линии по напряжению анализатора на аппаратное разрешение ( $\Delta E/E = 0,1$ ) подтверждает, что в нашем эксперименте наблюдалось увеличение интенсивности резонансной линии  $L_{\alpha}$  иона  $\text{C VI}$ , связанное с взаимодействием пучка атомов водорода с ядрами углерода. Определенная из величины активного сигнала концентрация ядер углерода в центре плазмы составляет  $(1,1 \pm 0,5) \cdot 10^{11}$  см $^{-3}$  для разряда в водороде и  $(0,5 \pm 0,3) \cdot 10^{11}$  см $^{-3}$  и  $(1,3 \pm 0,5) \cdot 10^{11}$  см $^{-3}$  для разряда в гелии с чистой и "грязной" камерой соответственно, что составляет  $0,25 \pm 0,65\%$  от средней концен-

трации электронов в плазме. Уменьшение в два раза содержания углерода в плазме при переходе от водородного разряда к гелиевому может указывать на существенную роль "химического" распыления диафрагмы в водородной плазме (образование летучих углеводородных соединений).

Активный сигнал в наших экспериментах связан с перезарядкой и пропорционален концентрации ядер углерода CVII, а фоновый сигнал связан главным образом с возбуждением водородоподобных ионов электронным ударом и пропорционален концентрации CVI. Отношение этих сигналов может быть рассчитано при использовании уравнения баланса для ионов соответствующих кратностей. В качестве параметра при расчете мы варьировали величину диффузионного члена в уравнении баланса. Необходимые распределения электронной плотности и температуры по ширину брались из экспериментов по лазерному рассеянию, распределения ионной температуры и распределения атомов водорода — из экспериментов по активной и пассивной [8] корпускулярной диагностике соответственно. Из сравнения расчетного отношения с экспериментальной величиной было найдено, что знак диффузионного члена в уравнении баланса соответствует уходу ядер углерода из центра плазмы, а эффективное время ухода составляет  $20 \pm 10$  мсек.

В заключение авторы выражают благодарность сотрудникам ИАЭ им. И.В.Курчатова К.А.Разумовой, В.А.Вершкову, В.А.Крупину, И.Б.Семенову и В.А.Абрамову за помощь в работе и полезные обсуждения.

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

Поступила в редакцию  
5 сентября 1978 г.

### Литература

- [1] В.В.Афросимов, Ю.С.Гордеев, А.Н.Зиновьев. Письма в ЖТФ, 3, 97, 1977.
- [2] R.E.Olson, A.Salop. Phys. Rev., A16, 1811, 1977.
- [3] М.И.Чибисов. Письма в ЖЭТФ, 24, 56, 1976.
- [4] В.А.Абрамов, Ф.Ф.Барышников. В.С.Лисица. Письма в ЖЭТФ, 27, 494, 1977.
- [5] Г.И.Димов, Г.В.Росляков. ПТЭ, №1, 29, 1974.
- [6] А.Н.Зиновьев, А.А.Коротков, Б.Н.Макаренко. Материалы Всесоюзного семинара по физике ВУФ излучения и взаимодействия излучения с веществом. Ленинград, изд. ЛГУ, 1978.
- [7] А.Б.Извозчиков, М.П.Петров. Физика плазмы, 2, 212, 1976.