

02:04:07

©1995

АБСОЛЮТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ НЕЙТРАЛЬНОГО ВОДОРОДА В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА ФТ-1 МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ФОТОИОНИЗАЦИИ

*В.К.Гусев, А.В.Деч, Д.В.Куприенко, М.М.Ларионов,
Ю.В.Петров, Г.Т.Раздобарин, С.Ю.Толстяков*

В опубликованных ранее работах [1,2] были изложены принципы нового метода лазерной диагностики плазмы в установках токамак, основанного на фотоионизации возбужденных атомов. При достаточно высокой плотности потока зондирующего излучения Nd лазера (несколько МВт/см) достигается практически полная ионизация водородного атома на уровне с главным квантовым числом $n = 4$. В этом случае по наблюдению выгорания спектральных линий соответствующих оптических переходов за время действия лазерного импульса непосредственно измеряются локальные значения собственного излучения плазмы. Количество излучающих атомов внутри малого объема на пересечении луча зондирования и линии наблюдения находится как:

$$N = \Delta\Phi / h\nu A, \quad (1)$$

где $\Delta\Phi$ — наблюдаемое уменьшение интенсивности свечения линии, A и $h\nu$ — вероятность спонтанного излучения и энергия кванта для наблюдаемого оптического перехода.

Для установок большого размера локальные изменения интенсивности свечения плазмы под воздействием лазерного излучения составляют малую часть от полной интенсивности света, собираемого вдоль оси наблюдения. В этом видится общий недостаток локальных методов диагностики плазмы — лазерной фотоионизации и лазерной флуоресценции [3,4]. В обоих случаях для надежного измерения слабого сигнала в присутствии шумов собственного свечения плазмы целесообразно производить накопление количества фотонов, главным образом, за счет увеличения энергии зондирующего излучения.

При достижении условия насыщения, когда регистрируемый сигнал перестает зависеть от мощности зондирующего потока, увеличение чувствительности диагностики связывают с увеличением длительности генерации, числа ге-

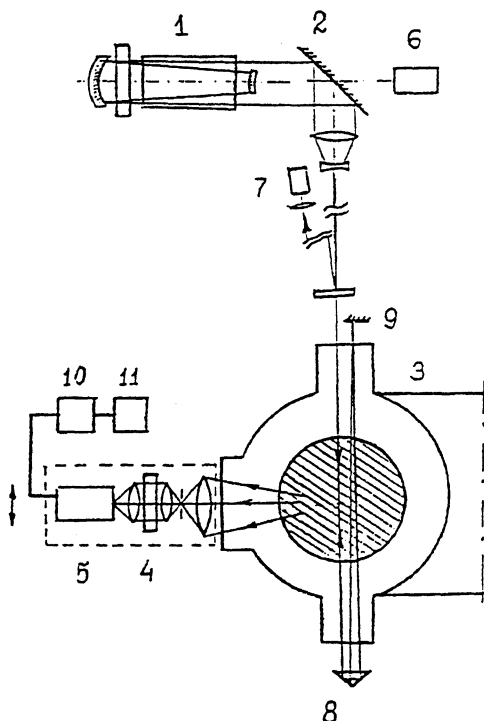


Рис. 1. Схема диагностической аппаратуры: 1 — Nd лазер, 2 — система формирования лазерного луча, 3 — разрядная камера токамака, 4 — интерференционный фильтр, 5 — фотоумножитель, 6 — быстрый фотодиод, 7 — калориметр, 8 — призмный рефlector, 9 — плоское зеркало, 10 — стробируемый интегратор, 11 — персональный компьютер.

нерируемых импульсов, а также с увеличением поперечных размеров лазерного пучка.

В демонстрационных экспериментах [2] был достигнут нижний предел измеримых концентраций около $1 \cdot 10^{10}$ водородных атомов в см^3 в основном состоянии, что позволило выполнить измерения на периферии плазменного шнура в сечении газонапуска. В настоящей работе в результате разработок диагностической аппаратуры удалось увеличить чувствительность метода по крайней мере на 2 порядка и достичь нижнего предела измеримых концентраций $1 \cdot 10^8$ невозбужденных атомов водорода в см^3 .

На рис. 1 приведена схема диагностической аппаратуры для исследования плазмы на токамаке ФТ-1. Функциональное назначение различных элементов приведенной схе-

мы обсуждалось ранее [2]. Новые аппаратурные разработки относятся, в первую очередь, к созданию оригинальной лазерной системы на основе многоимпульсного лазера и многопроходного зондирования плазмы. Оптическая система, состоящая из призмного рефлектора 8 и плоского диэлектрического зеркала 9, обеспечивает 6 проходов пучка через плазму с возвратом излучения вдоль оптической оси в направлении лазера. Многопроходная призмно-зеркальная система 8, 9 совместно с резонаторными зеркалами Nd лазера 1 формирует единый составной резонатор длиной более 10 м, внутри которого размещена камера токамака.

При условии малых световых потерь излучение, циркулирующее внутри составного резонатора, вызывает более эффективный съем запасенной инверсии и приводит к дополнительному увеличению энергии зондирования плазмы при неизменной накачке. Для уменьшения уровня световых потерь из-за расходимости Nd стержень размещался в неустойчивом телескопическом резонаторе, формируемом двумя сферическими зеркалами большого и малого диаметра с радиусами кривизны 3.3 и 0.8 м соответственно.

Исходя из поперечных размеров стержня и малого сферического зеркала на выходе из резонатора, пучок имел полую круговую форму с внутренним диаметром 10 мм и наружным 45 мм. Для согласования с размерами патрубков токамака, ограниченных прямоугольным окном 20×40 мм, сечение выходного пучка телескопически сжималось до размера 18 мм. Заполнение всей апертуры окна размером 18×36 мм осуществлялось в результате проведения луча в многопроходной системе.

Активный элемент из Nd фосфатного стекла $\varnothing 45 \times 300$ мм использовался в режиме пассивной модуляции добротности, осуществляемом при помощи кюветы с фототропным раствором с исходным пропусканием 70%. Высокое пропускание фототропного затвора и внешний рефлектор, формируемый многопроходной системой, обеспечивали возможность генерации за время 1 мс около 30 субмикросекундных импульсов со средней энергией около 3 Дж каждый (на входе в многопроходную систему). Пучок Nd лазера направлялся в камеру токамака вдоль малого диаметра перпендикулярно экваториальной плоскости тора.

Регистрируемое излучение на линии H_{β} с длиной волны $\lambda = 486$ нм собиралось в телесном угле $1.25 \cdot 10^{-2}$ ср нормально к лазерному лучу и направлялось через интерференционный светофильтр со спектральной полосой пропускания 2 нм на фотокатод ФЭУ118. Для подавления коллективных колебаний собственного свечения плазмы частотная полоса регистрирующей аппаратуры была ограничена 1 МГц со стороны низких частот. Стробированные с временным

окном 400 нс электрические сигналы с выхода фотоумножителя регистрировались во время лазерного импульса и с временной задержкой 10 мс после его окончания, оцифровывались с помощью АЦП4225 и записывались в память ЭВМ. Разностные сигналы по результатам двух последовательных измерений накапливались в процессе многоимпульсной генерации лазера за время 1 мс и обрабатывались для вычисления среднего значения и дисперсии сигнала.

Для абсолютной калибровки интенсивности измеренных сигналов использовалась эталонная лампа с известной температурой накала нити, а также галогеновая лампа с известной мощностью излучения в нужном спектральном интервале. Концентрация возбужденных атомов водорода на уровне с главным квантовым числом $n = 4$ определялась по формуле (1) с использованием результатов абсолютной калибровки чувствительности.

Концентрация атомов водорода в основном состоянии вычислялась исходя из измеренной концентрации возбужденных атомов на основании известного баланса населенностей возбужденных уровней водородных атомов в плазме [5]. Для вычислений использовались локальные значения электронной концентрации и температуры, известные из экспериментов по томсоновскому рассеянию. Пространственные распределения концентрации водорода вдоль луча лазера измерялись в повторных разрядах токамака.

Эксперименты были выполнены в стандартных условиях разряда токамака ФТ-1 ($R = 62.5$ см, $r = 15$ см) со следующими параметрами: ток разряда 30 кА, тороидальное магнитное поле 0.9 Тл, концентрация электронов $n(0) = 1.3 \times 10^{13}$ см⁻³. Измерения производились в сечении газонапуска, а также при расположении клапана газонапуска в другом сечении, удаленном на 90° по большому обходу тора.

На рис. 2 и 3 приведены распределения концентрации возбужденных $n_4(r)$ и невозбужденных $n_1(r)$ атомов водорода соответственно, измеренные при близком и удаленном газонапуске. Экспериментальные ошибки, показанные на графиках, соответствуют измерениям, выполненным в каждом отдельном разряде токамака.

Как видно из рисунков, концентрация нейтральных атомов быстро уменьшается от пристеночной области к оси разряда, где достигает при удаленном газонапуске величины $1 \cdot 10^8$ см⁻³. Абсолютные значения плотности водорода на оси разряда оказались от 3 до 5 раз ниже значений, полученных ранее [3,4], что может быть связано с неполной воспроизводимостью условий в плазме. Косвенно это предположение подтверждается тем, что в последней серии экспериментов не предпринимались специальные меры по очистке стенок разрядной камеры токамака (такие как дли-

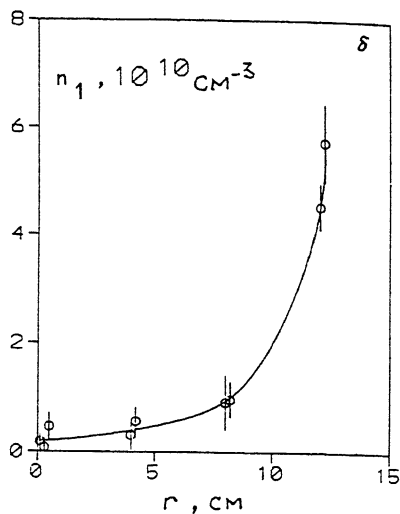
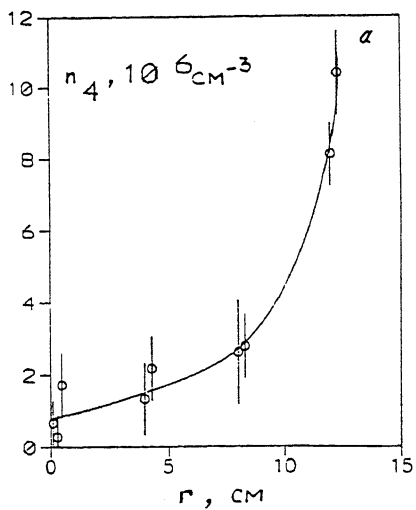


Рис. 2. Профили плотности водорода в возбужденном (а) и основном (б) состояниях в сечении газонапуска.

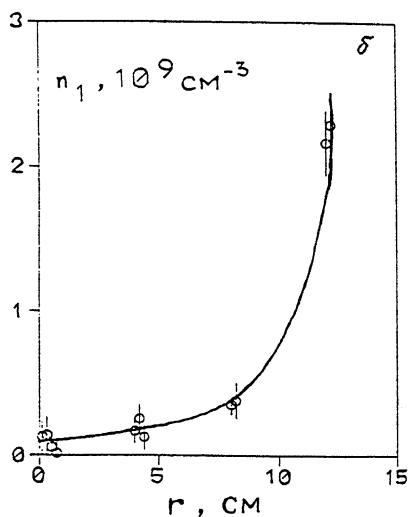
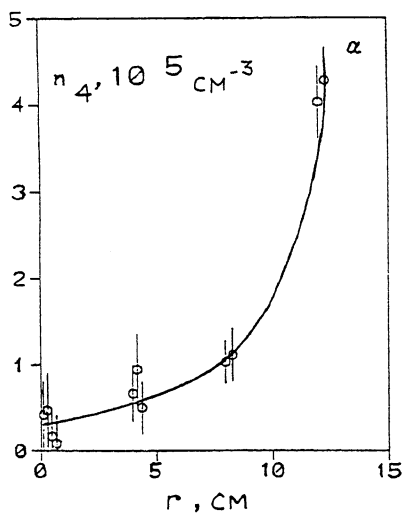


Рис. 3. Профили плотности водорода в возбужденном (а) и основном (б) состояниях при удаленном газонапуске.

тельный прогрев или тейлоровский разряд). Эксперименты в аналогичных условиях разряда на токамаке ФТ-1 проводились нами и ранее. Методом резонансной флуоресценции были зарегистрированы похожие профили концентрации нейтралов на периферии плазмы, однако полные радиальные распределения плотности водорода не могли быть измерены ввиду недостаточной чувствительности.

Список литературы

- [1] *Gladushchak V.I., Gusev V.K. et al. // Contr. Fusion and Plasma Physics. 1992. V. 2., P. 1219.*
- [2] *Гладущак В.И., Гусев В.К. и др. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. С. 18.*
- [3] *Razdobarin G.T., Semenov V.V. et al. // Nucl. Fusion. 1979. V. 19. P. 1439.*
- [4] *Petrov Yu.V., Razdobarin G.T. et al. // Proc. LAPD 4 Int. Symp. on Laser Aided Plasma Diagnostics. Fukuoka. 1989. P. 123.*
- [5] *Johnson L.C., Hinnoy E.J. // Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 1973. V. 13. P. 333.*

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе РАН
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
27 июня 1995 г.
