

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РЕЗОНАНСНОЙ ФЛЮОРЕСЦЕНЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРА НА КРАСИТЕЛЕ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ В УСТАНОВКЕ ТОКАМАК ФТ-1

*В.С.Бураков, Л.Я.Мисаков, П.А.Науменко,
С.В.Нечаев, Г.Т.Раздобарин, В.В.Семенов,
Л.В.Соколова, И.П.Фоломкин*

Методом резонансной флюоресценции на линии H_{α} выполнены локальные измерения концентрации нейтральных атомов водорода в плазме установки Токамак ФТ-1. Концентрация атомов водорода на оси разряда в максимуме тока ниже 10^9 см^{-3} .

В настоящей работе впервые для диагностики высокотемпературной плазмы был применен метод резонансной флюоресценции с использованием лазера на красителе. Применение этого метода позволило выполнить локальные измерения концентрации атомов нейтрального водорода в плазме установки Токамак. Нижняя граница измеренных концентраций была меньше 10^9 атомов в см^3 . Эксперименты проводились на установке Токамак ФТ-1 [1] в разряде с током до 27 кА, при магнитном поле 7,5 кэ. Температура электронов $T_e = 300 - 350 \text{ эв}$, концентрация электронов $n_e = 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Давление водорода в камере составляло $7 \cdot 10^{-5} \text{ тор}$.

Для возбуждения сигнала флюоресценции нейтральных атомов водорода на линии H_{α} ($\lambda = 6563 \text{ \AA}$) использовался лазер на основе растворов органических соединений с ламповой накачкой. Ширина линии генерации около 8 А, энергия импульса генерации достигала 0,05 дж при длительности $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ сек}$.

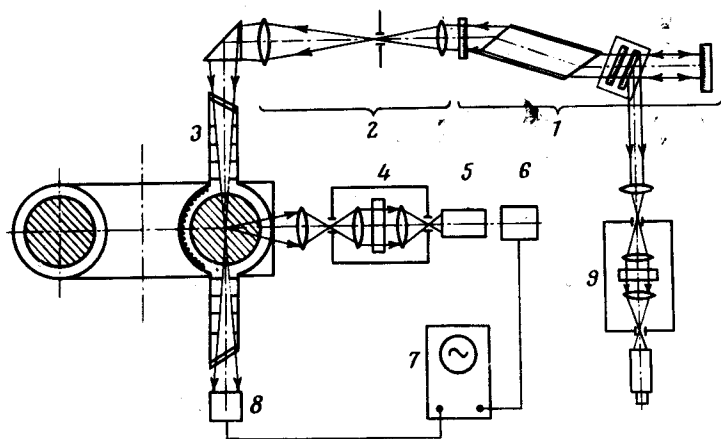


Рис. 1

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Основными ее элементами являются: (1) лазер с плавно перестраиваемой частотой, (2) оптическая система формирования пучка, состоящая из двух

линз $F = 250$ мм, $F = 750$ мм и диафрагмы 2 мм, (3) система черенных диафрагм для ввода и вывода лазерного излучения из разрядной камеры, ловушка света напротив окна наблюдения, (4) монохроматор МДР-2, (5) приемник излучения ФЭУ-84, (6) импульсный усилитель, (7) осциллограф С8-2, (8) измеритель энергии лазера (калиброванный фотоприемник ФЭК-15), (9) дифракционный монохроматор ДМ-1 с микроскопом, предназначенный для контроля за частотой генерации лазера.

Лазерный луч в камере имел диаметр около 1 см. Телесный угол сбора света $4 \cdot 10^{-3}$ стерад. Излучение флуоресценции наблюдалось под углом 90° к оси лазерного пучка. Исследуемый участок плазмы изображался на щели монохроматора с уменьшением 1:5.

Для определения абсолютной величины сигнала флуоресценции производилась калибровка аппаратуры методом релеевского рассеяния излучения лазера в аргоне.

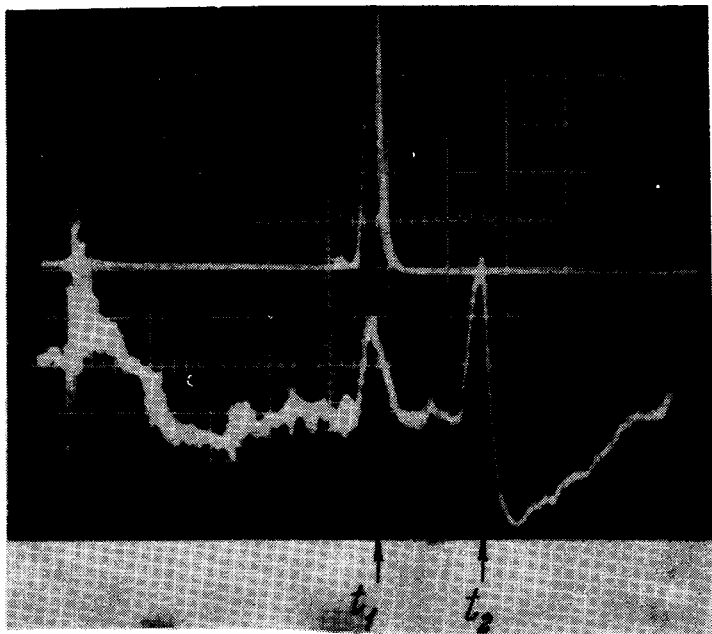


Рис. 2

В экспериментах с плазмой спектральная плотность мощности лазерного излучения была около 10^3 вт/см²·Å. В этих условиях под воздействием лазерного излучения заселенности верхнего и нижнего уровней, соответствующих переходу на линии H_α практически достигают насыщения, и сигнал флуоресценции, как показывают измерения, перестает зависеть от мощности лазера.

На рис. 2 приведены осциллограммы наблюдаемых сигналов. На нижнем луче на фоне шумовой составляющей свечения плазмы виден сигнал флуоресценции (момент времени t_1). Амплитуда сигнала соответствует концентрации атомов нейтрального водорода $2,5 \cdot 10^9$ см⁻³. Второй сигнал (момент времени t_2) обусловлен световым импульсом от светодиода, расположенного вблизи фотокатода ФЭУ. Контрольный импульс светодиода позволял следить за изменениями чувствительности регистрирующей аппаратуры при наблюдении сигналов флуорес-

ценции и релеевского рассеяния на газе. На верхнем луче записан сигнал с выхода калиброванного фотоприемника, пропорциональный энергии лазера.

Абсолютная величина сигнала флюоресценции (число фотонов C из единицы объема в единицу телесного угла) находится в результате измерения амплитуды наблюдаемого сигнала флюоресценции с использованием данных калибровки чувствительности аппаратуры. По измеренному числу фотонов флюоресценции C вычисляются приращения заселенности третьего возбужденного уровня ΔN_3 , вызванное лазерным излучением, и в результате исходная заселенность третьего уровня N_3 (в отсутствие лазерного излучения). Величины ΔN_3 и N_3 находятся из следующих выражений:¹⁾

$$\Delta N_3 = \frac{4\pi G}{A_{32}\tau}, \quad (1)$$

$$1 + \frac{\Delta N_3}{N_3} = \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) \frac{A_{32} + A_{31}}{\frac{g_2}{g_3} A_{21} + A_{31}}, \quad (2)$$

где A_{ki} — вероятности спонтанных переходов между уровнями с главными квантовыми числами k и i . R_2, R_3 — вероятности возбуждения атомов водорода с основного уровня на уровни $n = 2, n = 3$. g_2, g_3 — статистические веса второго и третьего возбужденных уровней τ — длительность генерации лазера.

В высокотемпературной плазме отношение R_2/R_3 слабо зависит от температуры электронов [3]. Для нашей плазмы с температурой электронов выше 100 эВ величины ΔN_3 и N_3 согласно формулам (1) и (2) равны $\Delta N_3 = 0,117C$, $N_3 = 0,083C$. Концентрация нейтральных атомов водорода в основном состоянии может быть определена из заселенности возбужденного состояния N_3 по известным величинам относительных заселенностей возбужденных уровней, данные по которым для различных значений n_e, T_e приведены в работе [4]. На рис. 3 приведены величины сигнала флюоресценции, измеренные в различные моменты времени от начала разряда (экспериментальные точки усреднены за несколько импульсов). Измерения производились на расстоянии 10 см от оси разряда (кривые 1 и 2) на оси разряда (кривая 3). Быстрый спад сигнала флюоресценции в начале тока после импульса предварительной ионизации соответствует уменьшению концентрации атомов водорода в результате ионизации. Кривая (1) получена в разряде с недостаточно хорошими вакуумными условиями. Концентрация нейтральных атомов во-

¹⁾ Формула (2) применима для насыщающей мощности лазера. Она получена из более общих выражений, приведенных в работе [2]. При выводе ее допускалось, что в плазме Токамака при концентрации электронов около 10^{13} см^{-3} заселение уровней $n = 2, n = 3$ в отсутствие лазерного излучения происходит электронным ударом из основного состояния, а релаксация возбужденных состояний — спонтанным излучением.

дорода в этом случае вблизи максимума тока равна $N_1 = 2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$. В стандартном режиме (кривая 2) после длительного прогрева и тренировки разрядами концентрация нейтрального водорода в максимуме тока упала до $N_1 = 1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$. На оси разряда в стандартном режиме сигнал флюоресценции (кривая 3) быстро уменьшается со временем и к моменту времени 5 мсек от начала разряда становится сравним с шумом. В центре плазменного шнура в момент максимума тока концентрация нейтральных атомов водорода ниже 10^9 см^{-3} .

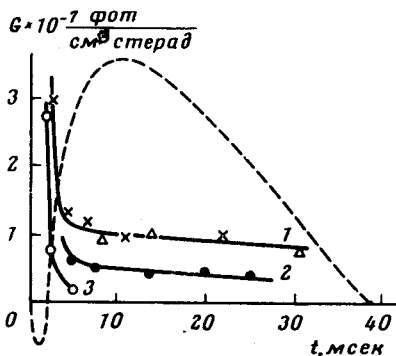


Рис. 6. Изменение сигнала флюоресценции в течение разряда. Точки (x) – режим с током разряда 17 ка. Остальные точки – режим с током разряда 27 ка. Пунктирная кривая – ток разряда

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность проф. В.Е.Голанту за интерес, проявленный к работе. Авторы благодарят М.М.Ларионова, М.П.Петрова, принявших участие в обсуждении полученных результатов, а также Л.С.Левина и А.Д.Лебедева за помощь в работе.

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

Институт физики
Академии наук Белорусской ССР

Поступила в редакцию
26 августа 1977 г.

Литература

- [1] М.М.Ларионов, Л.С.Левин, В.В.Рождественский, А.И.Токунов. Физика плазмы, 1, 923, 1975.
- [2] D.E.Evans. Proc. VIII Yugoslav Simp. and Summer School on the Phys. of Ion Gases, p. 641, 1976.
- [3] L.C.Johnson. Astrophys. Journ., 174, 227, 1972.
- [4] L.C.Johnson, E.Hinnov. J.Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer., 13, 359, 1973.