

04

Разработка диагностики пристеночной плазмы с помощью измерения отношений линий HeI на токамаке „Глобус-М“

© В.М. Тимохин¹, А.И. Рыкачевский¹, И.В. Мирошников¹,
В.Ю. Сергеев¹, М.М. Кочергин², А.Н. Коваль², Е.Е. Мухин²,
С.Ю. Толстяков², А.В. Воронин²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

E-mail: v.timokhin@spbstu.ru

Поступило в Редакцию 25 сентября 2015 г.

Разработана диагностика периферийных распределений электронных температуры и плотности плазмы токамака на основе измерения отношений интенсивностей линий нейтрального гелия. Главными компонентами диагностики являются 4-канальный фильтрово-линзовый изображающий полихроматор (ФЛИП-4) и высокоскоростная камера Phantom Miro M110 для регистрации изображений. Конструкция полихроматора собрана, настроена, протестирована на оптическом стенде. Оптическая система установлена на сферическом токамаке „Глобус-М“, проведены первые эксперименты, получены изображения струи плазменной пушки в линиях нейтрального гелия.

Напуск гелия (He) в высокотемпературную плазму токамаков и стеллараторов активно используется для диагностических целей на большинстве современных установок с магнитным удержанием [1–3]. Детальную информацию о профилях плотности и температуры электронов на периферии и в диверторной области плазменного разряда позволяют получить спектральные измерения излучения на линиях нейтрального гелия (HeI) [2,4]. Для измерений плотности плазмы часто используют отношение интенсивностей синглет-синглетных спектральных линий атома гелия HeI(668 nm)/HeI(728 nm), ($1s3d1D-1s2p1P/1s3s1S-1s2p1P$), а для измерения температуры электронов плазмы — отношение интенсивностей синглет-триплетных линий HeI(728 nm)/HeI(706 nm), ($1s3s1S-1s2p1P/1s3s3S-1s2p3P$). При регистрации флуктуаций интенсивности отмеченных линий с временным разрешением масштаба $1\mu s$ возможно провести анализ

параметров микроколебаний плотности n_e и температуры плазмы T_e на периферии разряда токамака и отметить характер их изменений при формировании транспортного барьера как следствия подавления аномально высокого переноса тепла [5]. Наблюдение за свечением плазмы в линиях HeI при помощи высокоскоростной видеокамеры позволяет визуализировать турбулентные процессы на периферии плазменного шнура. Например, с помощью спектральных диагностик GPI (Gas Puff Imaging) [6] и BES (Beam Emission Spectroscopy) [2] были определены пространственные и временные характеристики наблюдаемых турбулентных структур. Таким образом, развитие методов диагностики параметров пристеночной плазмы с использованием регистрации линий HeI представляется перспективным направлением исследований пристеночной плазмы. Актуальность таких работ определяется также и тем, что гелий, являясь продуктом термоядерной реакции, будет в заметном количестве присутствовать в плазме токамака–реактора ITER [7].

Для измерения соотношения интенсивностей линий нейтрального гелия на сферическом токамаке „Глобус-М“ был разработан 4-канальный фильтрово-линзовый изображающий полихроматор ФЛИП-4 с высокочувствительной скоростной камерой Phantom Miro M110 в качестве регистратора изображений. Необходимые расчетные коэффициенты, связывающие отношение светимости линий нейтрального гелия с электронной температурой и плотностью фоновой плазмы, брались из расчетов по столкновительно-излучательной модели [4,8]. Расчеты позволяют восстановить электронную температуру и плотность фоновой плазмы по отношениям интенсивностей линий HeI, указанных выше. Методика достаточно надежно работает для следующих диапазонов электронной плотности $2.0 \cdot 10^{12} < n_e < 2.0 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ и электронной температуры $10 \text{ eV} < T_e < 250 \text{ eV}$ плазмы.

В случае пассивного варианта использования диагностики полихроматор способен принимать излучение остаточной примеси He, присутствующей в плазме „Глобус-М“, из-за его использования в качестве рабочего газа в тлеющем разряде, чистящем вакуумную камеру. Однако содержание нейтрального He в современных экспериментальных установках обычно недостаточно для надежной работы полихроматора. Для решения проблемы нейтральный He дополнительно напускается в плазму посредством быстрого клапана. Такая схема дополнительно обеспечивает локальность измерений, поскольку интенсивность излучения из относительно малой области взаимодействия плазмы со струей много больше суммарного паразитного излучения вдоль хорды наблюдения.

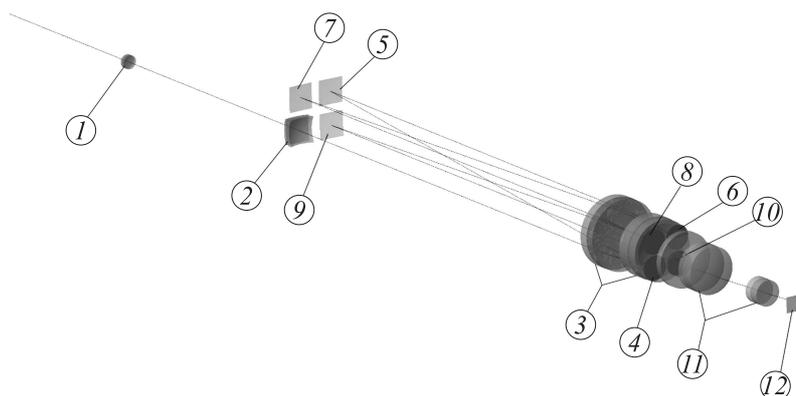


Рис. 1. Оптическая схема 4-канального фильтрово-линзового полихроматора (ФЛИП-4): 1 — входной объектив; 2 — линзовый коллектив; 3 — коллимационный объектив; 4, 6, 8, 10 — интерференционные фильтры; 5, 7, 9 — сферические зеркальные коллективы; 11 — приемный объектив камеры; 12 — матричный КМОП-детектор камеры.

Принцип работы полихроматора проиллюстрирован на рис. 1. Входной объектив 1 строит промежуточное изображение исследуемого объекта во входном окне ФЛИП, в качестве которого выступает линзовый коллектив 2. Коллектив 2 находится в фокальной плоскости коллимационного объектива 3. После прохождения объектива 3 параллельный пучок частично отражается от интерференционного фильтра 4, служащего селективным зеркалом, и направляется обратно через коллимационный объектив 3, фокусируясь в его фокальной плоскости, где расположен зеркальный коллектив 5. Прошедшая часть пучка собирается приемным объективом 11 в плоскости детектора камеры 12, формируя первое регистрируемое изображение объекта на длине волны соответствующего фильтра. Аналогичным образом работают остальные 3 канала.

Пространственное разрешение оптической системы составляет 1 мм. Спектральное разрешение определяется полосой пропускания интерференционных фильтров и составляет величину около 1 нм. Временное разрешение диагностики определяется максимальной частотой кадров скоростной камеры. Для модели Phantom Miro M110 [9], ис-

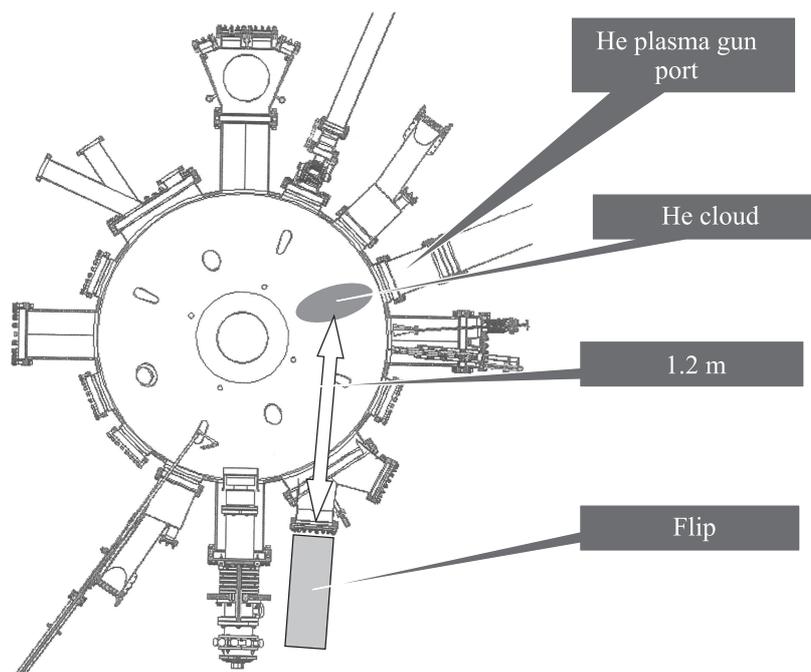


Рис. 2. Схема тестовых экспериментов на токамаке „Глобус-М“. Вид сверху.

пользованной в данной конструкции, при максимальном размере кадра 1280×800 пикселей частота кадров — 1.6 kHz.

Схема расположения диагностики на токамаке „Глобус-М“ приведена на рис. 2. Луч зрения полихроматора расположен в экваториальной плоскости установки и направлен на порт плазменной пушки. Для тестовых экспериментов в качестве источника He использовалась двухступенчатая плазменная пушка токамака „Глобус-М“. На выходе устройства формировалась плотная ($\sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) высокоскоростная струя ($\sim 100 \text{ km/s}$) ионизованного газа со степенью ионизации $> 90\%$, длительностью $15 \mu\text{s}$. Устройство плазменной пушки, а также результаты ее стендовых испытаний подробно описаны в работе [10].

На рис. 3, *a-d* представлен пример изображений плазменной струи, инжектированной в камеру сферического токамака „Глобус-М“ с то-

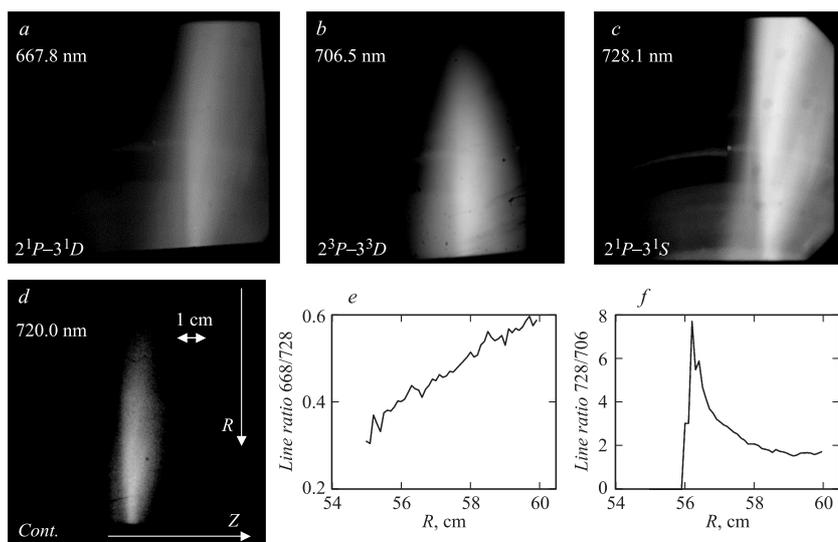


Рис. 3. Пример экспериментальных данных, полученных с помощью полихроматора ФЛИП-4. Изображения гелиевой плазменной струи в отсутствие фоновой плазмы (*a-d*). Профили отношений интенсивностей линий вдоль оси плазменной струи (*e,f*).

роидальным магнитным полем 0.2 Т в отсутствие фоновой плазмы, зарегистрированных полихроматором с экспозицией $625 \mu\text{s}$. Экспериментальные данные представляют собой набор снимков струи гелия в линиях HeI 667.8, 706.5, 728.1 nm, а также на участке излучения континуума 720.0 nm. Масштаб и направления осей, обозначенные на нижнем снимке, верны и для всех остальных снимков. Ось *Z* направлена вертикально вверх, ось *R* соответствует оси большого радиуса установки „Глобус-М“.

Для корректного расчета параметров плазмы величины отношений интенсивностей линий должны лежать в диапазоне 2–8 для HeI(668 nm)/HeI(728 nm) и 0.5–3 для HeI(728 nm)/HeI(706 nm) [8]. Значения этих отношений для изображений, представленных на рис. 3, *a-d*, рассчитанные вдоль оси плазменной струи, приведены на рис. 3, *e,f* соответственно. Видно, что в данном случае значения величины

HeI(668 nm)/HeI(728 nm) (рис. 3, e) лежат вне искомого диапазона 2–8, что соответствует электронным плотностям плазменной струи $< 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. На этом основании можно сделать вывод, что этот метод не позволяет корректно определить параметры распадающейся рекомбинирующей плазмы струи в данной схеме эксперимента. В дальнейшем предполагается локальный напуск He со звуковыми скоростями с помощью пьезоэлектрического клапана через сопло Лавалья.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и образования РФ „Филаменты и стохастизации“ № 3.200.2014/К, а также грантов РФФИ № 14-02-00697 А, 13-02-01409 А.

Список литературы

- [1] Лаишул С.И., Алтухов А.Б., Дьяченко В.В. и др. // Физика плазмы. 2012. Т. 38. В. 11. С. 923–936.
- [2] Ahn J.W., Craig D., Fiksel G. et al. // Phys. Plasmas. 2007. V. 14. P. 083 301.
- [3] Goto M. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2003. V. 76. P. 331.
- [4] de la Cal E. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2001. V. 43. P. 813.
- [5] Rosmej F.B., Ohno N., Takamura S., Kajita S. // Contrib. Plasma Phys. 2008. V. 48. N 1–3. P. 243.
- [6] Maqueda R.J., Wurden G.A., Stotler D.P. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2003. V. 74. N 3. P. 2020.
- [7] Loarte A. et al. // Nucl. Fusion. 2007. V. 75. P. S203.
- [8] Schweer B. // Trans. Fusion Sci. Technol. 2006. V. 49. P. 404.
- [9] <http://www.visionresearch.com/Products/High-Speed-Cameras/Phantom-Miro-M110/>
- [10] Воронин А.В., Гусев В.К., Герасименко Я.А., Судьенков Ю.В. // ЖТФ. 2013. Т. 83. В. 8. С. 36–42.