

А.Г. РАЗДОБАРИН^{1*}, А.Д. ДМИТРИЕВ¹, Д.И. ЕЛЕЦ^{1,2}, О.С. МЕДВЕДЕВ^{1,2},
А.Н. НОВОХАЦКИЙ, И.В. МИРОШНИКОВ¹, С.В. ФИЛИППОВ¹, М.В.
ГРИШАЕВ², Ю.М. ГАСПАРЯН²

¹ *Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, С-Пб*

² *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

**Aleksey.Razdobarin@mail.ioffe.ru*

АПРОБАЦИЯ ДИАГНОСТИКИ НАКОПЛЕНИЯ ВОДОРОДА В УСТАНОВКЕ ГЛОБУС-М2

Процессы, происходящие в плазме токамака, неразрывно связаны с состоянием поверхности контактирующих с плазмой элементов стенки. Согласно выводам, основанным на текущих исследованиях в токамаках и в лабораторных установках, взаимодействие плазмы со стенкой, в частности, накопление термоядерного топлива будет одними из ключевых факторов, определяющих характеристики проектируемых в настоящее время термоядерных установок [1]. При этом большинство токамаков на сегодняшний день имеет достаточно ограниченный набор диагностик состояния первой стенки и захвата водорода. Обычно, такие исследования ограничиваются контролем баланса напускаемого и откачиваемого газа, а также исследованием образцов-свидетелей или отдельных частей обращенных к плазме элементов (ОПЭ) после длительных экспериментальных кампаний. Для локального дистанционного мониторинга накопления топлива в токамаках следующего поколения, таких как ИТЭР, ТРТ и т. д. рассматривается возможность проведения измерений содержания топлива лазерно-индуцированными методами с использованием масс-спектрометрии (LIA-QMS) и эмиссионной спектроскопии лазерного факела (LIBS).

В докладе представлены первые результаты апробации комбинированной методики LIA-QMS/LIBS измерения содержания изотопов водорода в первой стенке токамака Глобус –М2. Для этого была смонтирована оптическая схема, состоящая из системы ввода лазерного излучения, системы сбора света, системы развертки пучка и спектрометра. В схеме использовался Nd:YAG лазер с длительностью импульса равной 3 нс и максимальной энергией в импульсе до 2 Дж. В условиях неопределенной формы лазерного кратера для обеспечения количественных измерений необходимо, чтобы размер анализируемой области был значительно больше площади лазерного пятна. Это достигается за счет сканирования поверхности при помощи автоматической поворотной подвижки, обеспечивающей вращение вокруг 2-

х осей. Размер анализируемой области составлял $\sim 10 \times 10$ мм. Схема регистрации состояла из квадрупольного масс-спектрометра Pfeiffer PrismaPlus QMG220 (с анализатором QMA220) и дифракционного спектрометра с высоким спектральным разрешением (0.004 нм) SPT DDHR.

В ходе экспериментов была проведена экспозиция облицовки дивертора Глобус-М2 серией лазерных импульсов с плотностью мощности ~ 10 Дж/см². В результате, была подтверждена возможность регистрации эмиссионных линий вольфрама и изотопов водорода в плазме лазерного факела и регистрации сигналов 1-4 масс методами масс-спектрометрии. Кинетики амплитуд линий в масс-спектре при циклическом сканировании области дивертора Глобус-М2 показаны на рисунке 1.

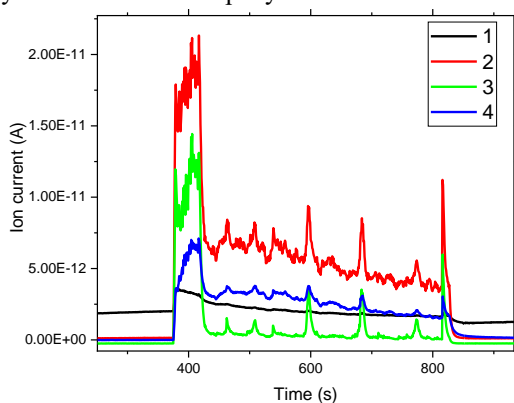


Рисунок 1 – Кинетики линий, соответствующих массам 1–4 (H, H₂, HD, D₂), записанные в ходе многократного сканирования облицовки дивертора установки Глобус М2

Предложенный метод, в принципе, позволяет оценить распределение залегания изотопов водорода по глубине осадений на поверхности защитной облицовки токамака. Для этого, однако, необходимо иметь возможность независимого определения толщины удаленного лазером слоя. Для таких измерений предлагается использовать метод двухволновой цифровой голографии.

После предварительной калибровки сигнала масс-спектрометра в объеме Глобус -М2, была выполнена оценка содержания изотопов водорода в поверхностных слоях облицовки дивертора Глобус М2: $\sim 5 \cdot 10^{16}$ H₂/ см² и $2 \cdot 10^{16}$ D₂/ см². Следует отметить, что данная оценка учитывала только

изотопы водорода, запасенные в верхнем слое и не учитывала возможное наличие водородосодержащих соединений в газовой смеси. Возможность возникновения таких соединений при лазерной абляции требует дополнительных исследований.

Одновременно с записью масс-спектра во время лазерной экспозиции производилась запись эмиссионного спектра факела в спектральном диапазоне 655,8 - 656,8 нм. Спектр, записанный во время первого прохода сканирования, приведен на рисунке 2. На спектре хорошо видно две Бальмер-альфа линии от двух изотопов водорода – протия (H) и дейтерия (D). Из соотношения интенсивности линий можно предположить, что концентрации дейтерия и протия в искре составляют около 1:3. Данное значение близко к оценкам, полученным методами масс-спектрометрии $\sim 1:2.5$. После начала второго прохода сканирования Бальмер-альфа линии изотопов водорода полностью пропадали из спектра, что также свидетельствует о том, что большая часть изотопов водорода, содержащихся в приповерхностных слоях, удаляется по время первого прохода.

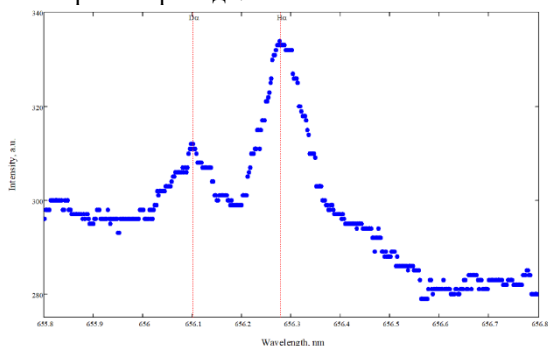


Рисунок 2. Спектр свечения лазерной искры по время первого прохода лазерного сканирования, давление 5×10^{-4} Па

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда 22-12-00360.

Литература

[1] De Temmerman G., Hirai T., Pitts R.A. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2018. V. 60, P.044018. doi: 10.1088/1361-6587/aaaf62