

ЛАЗЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА СОДЕРЖАНИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В СТЕНКАХ ТОКАМАКА ГЛОБУС-M2

© 2024 г. А. Г. Раздобарин^{a,b,*}, О. С. Медведев^{a,c}, И. М. Букреев^a, Д. Л. Богачев^a, А. М. Дмитриев^a, Д. И. Елец^{a,b,c}, Е. В. Смирнова^{a,b}, Л. А. Снигирев^{a,b}, В. Б. Минаев^a, А. Н. Новохацкий^a, И. В. Мирошников^a, С. В. Филиппов^a, М. В. Гришаев^c, Ю. М. Гаспарян^{b,c}

^aФизико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

^bСанкт-Петербургский государственный университет, Физический факультет, Санкт-Петербург, Россия

^cНИИЯУ «МИФИ», Москва, Россия

*e-mail: aleksey.razdobarin@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 04.12.2023 г.

После доработки 10.03.2024 г.

Принята к публикации 30.03.2024 г.

Собран и испытан макет системы дистанционного мониторинга накопления изотопов водорода в стенках токамака Глобус-M2. Измерения проводились при помощи лазерной диагностики LIA-QMS (лазерно-индуцированная абляция с регистрацией методом квадрупольной масс-спектрометрии). Получены данные о содержании изотопов водорода в осадках, полученных путем экспозиции вольфрамовых коллекторов в объеме токамака Глобус-M. После апробации в лабораторных условиях диагностика реализована на установке Глобус-M2. Проведены *in-situ* измерения содержания изотопов водорода в графитовой облицовке дивертора токамака. Подтверждена возможность совмещения диагностики LIA-QMS с диагностикой LIBS (лазерно-индуцированная эмиссионная спектроскопия) для получения информации о составе аблируемого материала. Кроме того, методом LIBS получено изотопное соотношение дейтерий/протий при измерениях в установке Глобус-M2.

Ключевые слова: лазерно-индуцированная абляция, лазерно-индуцированная десорбция, первая стенка, сферический токамак, диагностика накопления трития

DOI: 10.31857/S0367292124060015, EDN: PTSREF

1. ВВЕДЕНИЕ

В современных установках магнитного удержания высокотемпературной плазмы существенный захват изотопов водорода происходит в процессе горения плазмы, на что указывает измерение газового баланса в разрядной камере. Исследование образцов облицовки первой стенки, извлеченных из установок, показывает, что одним из основных механизмов потерь газа является захват изотопов водорода в поверхностных слоях, осаждаемых на стенках вакуумной камеры [1]. Применительно к будущим токамакам-реакторам, превышение лимита накопления топлива, прежде всего радиоактивного трития, недопустимо с точки зрения безопасности работы и обслуживания, что требует постоянного мониторинга его содержания на поверхностях первой стенки [2]. В работе [1] было показано, что накопление в углеродных осадках может на порядок превышать захват в Ве осадках и на 2 порядка в вольфрамовых. В работе [3] показано, что даже после процедуры удаления трития из первой стенки, путем нагрева до 250°C, часть накопленного топлива остается, и для ИТЭР за рабочее время $\sim 10^7$ с содержание трития может достигнуть критической отметки в 1 кг [4, 5]. В реакторах следующего

поколения этот вопрос является одним из ключевых из-за длительного времени горения плазмы и высоких плазменных, радиационных и тепловых нагрузок на конструкционные элементы. Таким образом, необходима методика эффективного контроля за накоплением изотопов водорода, позволяющая осуществлять прямое измерение концентрации изотопов в осадках на первой стенке, для возможности оценки безопасной работы токамака. При разработке такой методики, необходимо учитывать:

- сложный химический состав осадков, включающий: материалы первой стенки, материалы возобновляемых покрытий (В, Li и С) и накопленные элементы рабочего газа (He, H/D/T и т. д.);
- меняющиеся нагрузки на обращенные к плазме элементы (ОПЭ) термоядерных установок;
- специфику размещения диагностического оборудования вне вакуумного объема токамака-реактора.

В настоящее время основными методами определения доли изотопов водорода, поглощенных в стенке токамака-реактора, являются оценка дефицита термоядерного топлива и лабораторные исследования образцов-коллекторов, экспонировавшихся на первой стенке токамака. Последний может быть более точным, но при этом имеет ряд существенных недо-

статков. Эти измерения становятся все более и более сложными при использовании тайлов, которые в процессе плазменных разрядов были активированы тритием и загрязнены токсичными продуктами эрозии, такими как Ве. Для преодоления этих проблем предлагается использовать лазерные методы диагностики изотопов водорода, которые дают возможность *in situ* исследований взаимодействия плазмы с первой стенкой реактора [5].

В лазерных методах дистанционного измерения накопления изотопов водорода принципиально используются импульсные лазеры для уменьшения глубины проникновения тепла и минимизации воздействия на узлы крепления защитной облицовки. Методы можно разделить на 2 группы: основанные на лазерной десорбции и лазерной абляции. Импульсное лазерное воздействие с показателем тепловой нагрузки менее $10^4 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-0.5}$ приводит к разогреву поверхности и дегазации поверхностных и перепыленных слоев. С ростом плотности энергии лазерного излучения происходит переход в режим абляции материала стенки. Вместе с материалами стенки в вакуумный объем токамака инжектируется и растворенный газ. После дегазации или абляции материала стенки состав газовой смеси в объеме может регистрироваться методами масс-спектрометрии (LID-QMS и LIA-QMS), и оптической спектроскопии изотопов водорода в краевой плазме, или специально организованном разряде (LIDS и LIAS). Кроме того, в случае лазерной абляции возможна регистрация состава испаренной смеси методом эмиссионной спектроскопии лазерного факела (LIBS) [7].

Метод LID-QMS, как наиболее простой в реализации и интерпретации, считается основным кандидатом в качестве диагностики накопления водорода в ИТЭР. Главным ограничением этого метода является невозможность однозначно определить точный объем, с которого происходит десорбция водорода, из-за неизвестных теплофизических свойств материала и неравномерного распределения температурных полей в области воздействия лазерного излучения. В случае цельнометаллической стенки большая часть изотопов водорода накапливается в осадениях с толщиной, не превышающей десятков микрон [8]. Путем подбора параметров лазерного импульса можно добиться равномерного прогрева осадочного слоя и его полной дегазации. В случае если толщина осадочных слоев составляет сотни микрон, или при имплантации в объем стенки с неизвестной глубиной залегания, данный метод ограничивается количественным анализом верхних слоев, при этом сложно получить информацию о концентрации изотопов водорода в глубине объема.

В данной работе представлена апробация метода измерения накопления водорода, основанного на лазерной абляции LIA-QMS. Применение этого метода совместно с методом LIBS описано в [9]. В отличие от

лазерной десорбции, данная комбинация методов дает возможность построить профиль залегания изотопов водорода по всей глубине за счет послойного удаления переосаждений при многократных проходах лазерного луча по интересующей области.

Статья состоит из двух частей. В первой описаны этапы макетирования такого комплекса в лабораторных условиях, и подтверждается возможность проведения количественного анализа с использованием вольфрамовых макетов облицовки, экспонировавшейся в установке Глобус-М2. Во второй — описывается апробация на токамаке Глобус-М2 для проведения измерений содержания изотопов водорода в элементах графитовой облицовки.

2. МАКЕТИРОВАНИЕ ДИАГНОСТИКИ LIA-QMS В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

2.1. Экспериментальная методика

Для отработки режимов лазерно-индуцированной абляции был создан макет оптической схемы диагностики, приведенный на рис. 1. Макет включает в себя импульсный Nd:YAG лазер с длиной волны 1064 нм, длительностью импульса 12 нс, энергией в импульсе 450 мДж и частотой следования импульсов 10 Гц, постоянный твердотельный лазер с диодной накачкой, мощностью 200 мВт и длиной волны 532 нм, поворотное и сканирующее зеркало системы ввода лазерного излучения. В представленной конфигурации в схеме ввода лазерного излучения имеется аттенюатор, позволяющий варьировать плотность энергии излучения на поверхности образца в диапазоне $1\text{--}150 \text{ Дж/см}^2$, не изменяя размер пятна фокусировки. Лабораторный макет воспроизводит геометрию и характерные размеры схемы, которую планировалось установить на токамаке Глобус-М2.

Система регистрации остаточных газов была реализована на основе квадрупольного масс-спектрометра (QMS) Extorr XT-300M, который оснащен вторичным электронным умножителем. В описываемом макете QMS имеет собственную дифференциальную откачку вакуумным постом Pfeiffer HiCube 80 Eco и присоединяется к общему вакуумному объему через апертуру диаметром 1 мм, для обеспечения давления в объеме QMS в пределах 10^{-3} Па во время лазерных импульсов. Для получения абсолютных показаний потоков сигнал QMS калибровался по сигналу дейтериевой течи с уровнем потока $1 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$. Для 2-й и 3-й массы использовались те же значения калибровки.

Для макетирования вакуумного объема токамака Глобус-М2 была использована вакуумная камера, объемом $\sim 70 \text{ л}$. Данная вакуумная камера имеет двухступенчатую вакуумную откачку, состоящую из турбомолекулярного насоса (ТМН) Leybold Turbovac 90i и спирального насоса Geowell CWSP300. Базовое давление в вакуумном объеме контролировалось при помощи комбинированного вакуумного датчика (Пира-

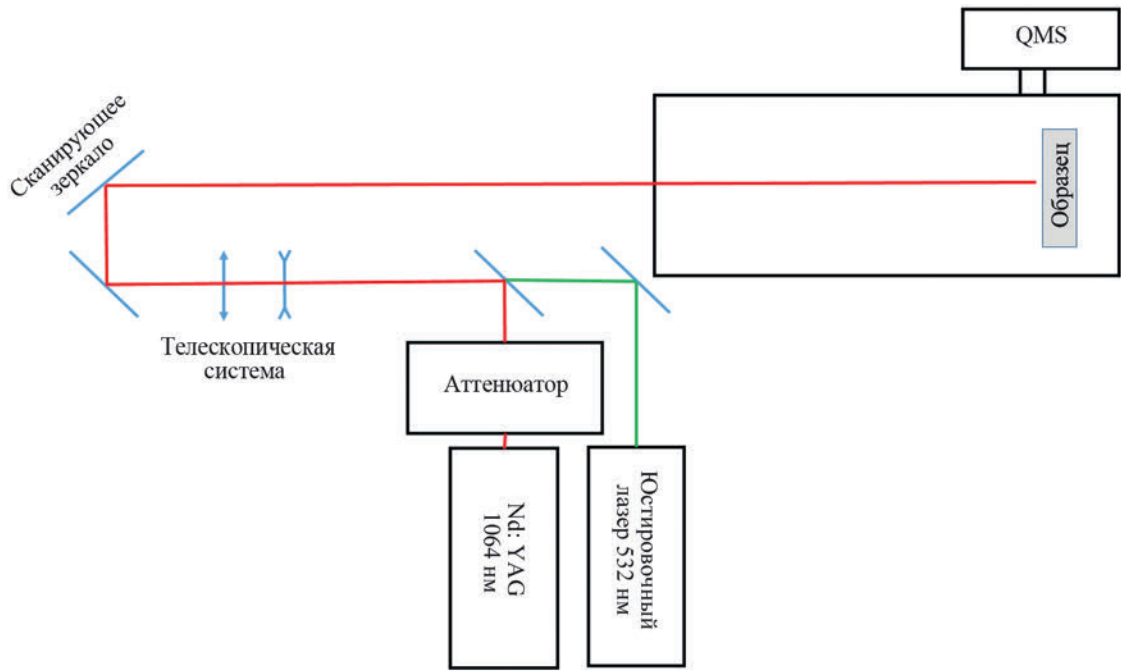


Рис. 1. Принципиальная схема оптической системы лазерной диагностики содержания водорода в конструкционных материалах первой стенки токамака.

ни/холодный катод) Edwards WRG-S и после 12 часов откачки составляло $8 \cdot 10^{-5}$ Па. Предельный вакуум, достижимый в данной камере, составляет $\sim 5 \cdot 10^5$ Па.

Сканирование поверхности стенки токамака и образца во время макетирования осуществлялось при помощи автоматизированной поворотной подвижки с зеркалом, обеспечивающей развертку по 2-м направлениям. Необходимость сканирования обусловлена неопределенностью профиля лазерного пятна и, соответственно формы кратера на исследуемой поверхности. Очевидно, что в отсутствие данных о форме кратера для обеспечения количественных измерений необходимо, чтобы размер анализируемой области был значительно больше площади лазерного пятна. Управление углом поворота подвижки производилось посредством шаговых двигателей, контроль за которыми осуществлялся с помощью управляющей платы Arduino UNO. Управляющая программа позволяла выполнять сканирование площадей прямоугольной формы, задавать размеры сканируемой области, шаг развертки и задержку между шагами. Задержка задавалась равной периоду импульсного излучения лазера. Чтобы соседние точки заведомо перекрывались, шаг сканирования был выбран равным радиусу лазерного пятна. На рис. 2 приведен профиль лазерного пятна на поверхности образца при плотности энергии порядка 15 Дж/см². Диаметр лазерного пятна на поверхности составлял ~ 1 мм.

Параметры сканирования исследуемых образцов защитной плитки Глобус-М2 лазерным лучом приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры сканирования мишени лазерным лучом в экспериментах по лазерной абляции

Шаг сканирования, мм	0.5
Время нахождения в точке, с	0.1
Область сканирования, мм ²	10 × 10 и 5 × 5
Количество проходов, шт	10

2.2. Образцы

Для исследования изотопного состава методом LIA-QMS были выбраны три вольфрамовые плитки токамака Глобус-М из двух областей дивертора, на которые приходятся наибольшие потоки переосаждений: образцы 3.1 и 3.2, располагавшиеся в одном ряду, и образец 5. Нумерация образцов соответствует нумерации, в схемах, приведенных в работах [10, 11]. Исследуемые плитки были извлечены после разных кампаний на Глобус-М2. Толщины осаджений составляли 300–600 нм (образцы 3.1 и 3.2) и 5–6 мкм (образец 5). В составе осаджений обнаруживались соединения бора и углерода, дейтерий, а также примеси металлов: Ti, Cr, Fe, Ni и Cu [10]. Измерения толщины проводились методом сканирующей электронной микроскопии по окончании экспериментов по лазерной абляции на областях, не затронутых в исследовании. Предполагается, что осаджения на исследуемых вольфрамовых образцах имеют тот же состав, что и осаджения на стенке Глобус-М2, и, следовательно, результаты макетирования применимы к экспериментам внутри вакуумного объема токамака.

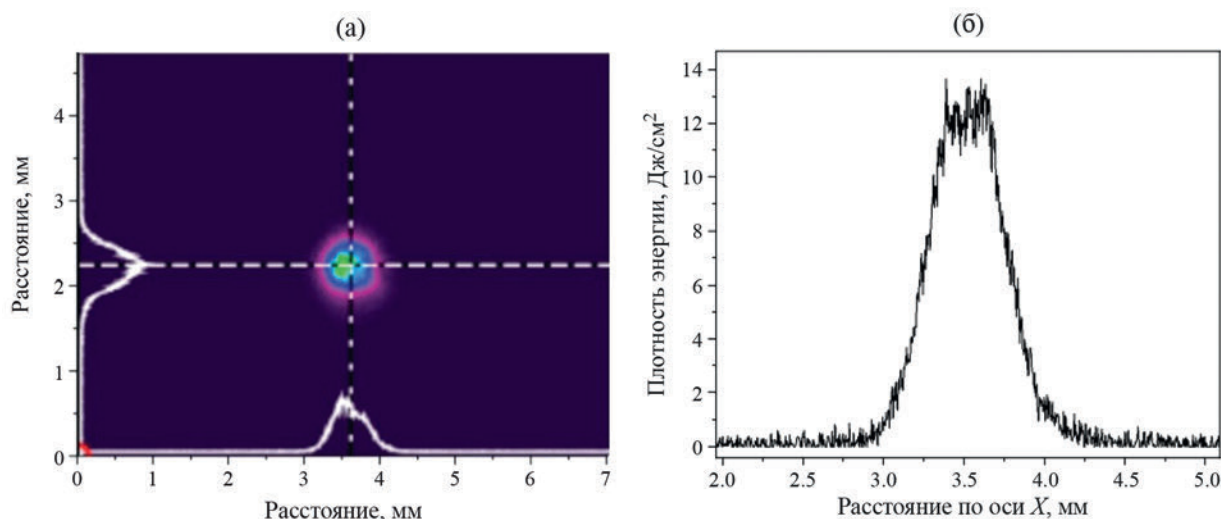


Рис. 2. Карта распределения интенсивности лазерного пятна на образце при нормальном падении луча (а); сечение профиля лазерного пятна на образце по оси X (б).

2.3. Измерение содержания изотопов водорода в вольфрамовых макетах облицовки дивертора Глобус-M2 методом LIA-QMS

На образце 3.1 с толщиной осадений порядка 500 нм исследовалось влияние выбранной плотности энергии LIA-QMS на количество дейтерия, зарегистрированного квадрупольным масс-спектрометром. Сравнение проводилось для 3 плотностей энергии: 5, 10 и 15 Дж/см².

В эксперименте отслеживался QMS сигнал 2-й, 3-й и 4-й масс. На рис. 3 представлены временные зависимости потока дейтерия, вычисленные из сигнала 4-й массы, при плотности энергии 5 Дж/см² (черная кривая), 10 Дж/см² (красная кривая) и 15 Дж/см² (синяя кривая). Время одного прохода площади 10×10 мм² составляло 40 с. После первого прохода на всех трех зависимостях наблюдается резкий спад потока дейтерия: на 2 порядка для плотностей энергии 10 и 15 Дж/см², и в 10 раз для 5 Дж/см². Последующие пики десорбции связаны с погрешностью системы сканирования, которая может выводить лазерное пятно за рамки исходно заданной области, т. е. на незатронутые лазерной абляцией области переосаждения, что и приводит к появлению данных пиков. Однако их вклад в интегральное количество потока составляет менее 10%, в сравнении с первым проходом. Плотность энергии напрямую влияет на количество аблируемого материала и, судя по всему, в случае 5 Дж/см² на поверхности после первого прохода остается тонкий слой переосаждений, который во время второго прохода уже полностью удаляется. Для 10 и 15 Дж/см² весь осадочный слой ~ 500 нм удаляется за первый проход. Интегральная поверхностная плотность атомов дейтерия для трех плотностей энергии составляет

- 5 Дж/см²— $1.6 \cdot 10^{17}$ см⁻²;
- 10 Дж/см²— $2.4 \cdot 10^{17}$ см⁻²;
- 15 Дж/см²— $3.7 \cdot 10^{17}$ см⁻².

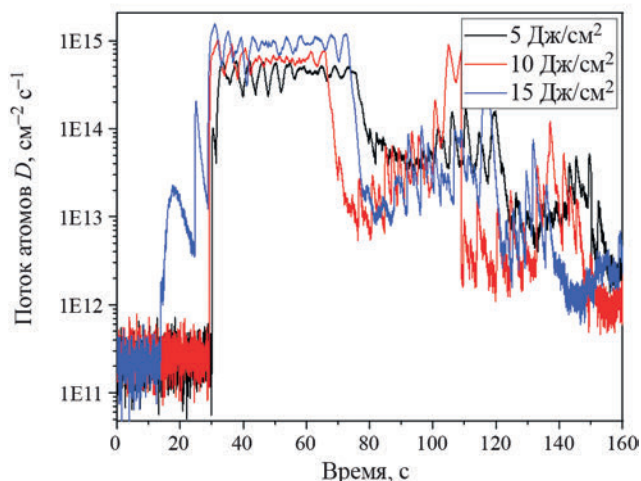


Рис. 3. Зависимость потока атомов дейтерия из образца 3.1, вычисленная из сигнала Extorg XT-300M для 4-й массы.

– 15 Дж/см²— $3.7 \cdot 10^{17}$ см⁻².

Согласно данным термодесорбционной спектроскопии (TDS) данного образца облицовки содержание атомов дейтерия составляет $2.9 \pm 0.7 \cdot 10^{17}$ см⁻². Результаты LIA-QMS в целом хорошо согласуются с результатами TDS. Отклонения от среднего значения при плотностях энергий 5 и 15 Дж/см² наиболее вероятно связаны с неоднородной толщиной осадений на образце, размер которого составлял $\sim 10 \times 10$ см. Для образца 3.2 при фиксированной плотности энергии абляции 10 Дж/см² поверхностная плотность атомов дейтерия, измеренная в трех точках, лежащих на диагонали, составила $4.8 \cdot 10^{17}$; $4.0 \cdot 10^{17}$ и $5.8 \cdot 10^{17}$ см⁻², что косвенно говорит о различной толщине осадений, либо отличающимися условиями захвата дейтерия в разных частях плитки и его различ-

ной концентрации. Из вышесказанного можно сделать вывод, что вариации регистрируемого сигнала в диапазоне плотностей энергии 5–15 Дж/см² не превышают экспериментальную неопределенность, обусловленную неоднородностью захвата дейтерия по площади исследуемых образцов, и можно выбирать плотность энергии исходя из удобства реализации профилирования осадений.

Для демонстрации возможности профилирования содержания изотопов водорода по толщине методом LIA-QMS, было проведено исследование образца 5 с толщиной осадений порядка 5–6 мкм. Плотность энергии в данной серии экспериментов составляла 10 Дж/см². На рис. 4 представлены потоки атомов водорода и дейтерия, вычисленные из данных QMS при многократном сканировании мишени. Длительность одного прохода по площади 5×5 мм² составляла 10 с. Из рисунка видно, что наибольший поток водорода наблюдается при первом сканировании. После чего до 4-го сканирования наблюдается постепенное/ступенчатое снижение уровня потока атомов водорода. В случае же атомов дейтерия наблюдаются аналогичные тенденции. Однако стоит заметить, что в случае атомов дейтерия нет явно выраженного повышенного потока при первом сканировании, что может свидетельствовать об изотопном замещении атомами водорода атомов дейтерия в приповерхностных слоях. При 4-м сканировании наблюдается резкий спад потоков газов, что по всей видимости свидетельствует о полном или практически полном удалении углеводородных осадений в данной области. Природа пиков на 5, 6 и 8-м проходах, аналогична описанным выше, что связано с несовершенством системы сканирования, которая может выводить лазерное пятно за рамки исходно заданной области, т. е. на незатрону-

тые лазерной абляцией области пересадений, что и приводит к появлению данных пиков. Как и в случае выше, десорбция газов не приводит к значительному искажению интегрального количества атомов дейтерия, и, конкретно в данном случае, составляет 14%. Данную погрешность можно минимизировать увеличением области сканирования и усовершенствованием самой системы сканирования. Данный образец исследовался в трех областях, максимально удаленных друг от друга, временные зависимости 2, 3 и 4-й масс для всех областей аналогичны приведенным на рис. 4.

Результаты измерений поверхностной плотности атомов дейтерия для образца 5 вместе с данными LIA-QMS и TDS для образцов 3.1 и 3.2 приведены в табл. 2.

Как видно из таблицы, содержание дейтерия растет приблизительно линейно с толщиной осадений, что косвенно подтверждает корректность выводов о применимости метода LIA-QMS для измерения содержания изотопов водорода в толстых углеводородных осадениях. В работе [12] показано, что в режиме лазерной десорбции выход дейтерия из графитовых плиток на 80% происходит в виде молекул D₂ и HD, остальные 20% выделяются в виде летучих углеводородов C_xH_yD_z. В приведенных выше экспериментах не проводилось прямого сравнения количества выхода молекулярного дейтерия и дейтерия в различных соединениях с углеродом. Однако, можно сделать вывод, что измерения содержания дейтерия методом LIA-QMS с учетом лишь вклада D₂ и HD показывают неплохое совпадение с результатами TDS. Пространственная неоднородность содержания дейтерия по площади исследуемых плиток (до 50%) вносит неопределенность в результаты измерений, что не позволяет объективно оценить точность метода, а дает только оценку ошибки сверху. Чтобы получить более точную оценку, необходимы эксперименты на образцах осадений с лучшей пространственной однородностью по толщине.

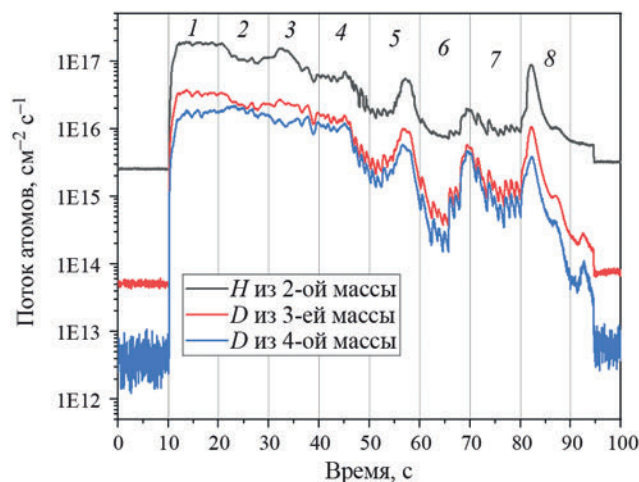


Рис. 4. Зависимость потока атомов водорода и дейтерия из образца 5, вычисленная из 2, 3 и 4-й масс. Цифрами сверху указан порядковый номер прохода лазерным лучом.

3. РЕАЛИЗАЦИЯ ЛАЗЕРНЫХ ДИАГНОСТИК СОДЕРЖАНИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА НА УСТАНОВКЕ ГЛОБУС-М2

3.1. Экспериментальная методика

Схема диагностики накопления водорода, реализованная на установке Глобус-М2, показана на рис. 5.

В дополнение к диагностике LIA-QMS на установке Глобус-М2 была смонтирована схема сбора излучения лазерного факела, что позволило оценить возможность комбинации методов LIAQMS и LIBS для исследования содержания изотопов водорода в первой стенке. В представленной схеме излучение зондирующего лазера доводилось из диагностической комнаты до токамака при помощи системы зеркал и перископических устройств (не показаны на схеме). Далее фокусировка и развертка лазерного луча осуществлялась аналогично описанной выше схеме, использованной

Таблица 2. Поверхностная плотность атомов дейтерия в образцах 3.1, 3.2, 5, измеренная методами LIA-QMS и TDS

	3.1. Толщина осаждений ~ 0.5 мкм	3.2. Толщина осаждений ~ 0.5 мкм	5. Толщина осаждений 5–6 мкм
LIA-QMS 5 Дж/см ²	$1.6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$	—	—
LIA-QMS 10 Дж/см ²	$2.4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$	$4.8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$	$2.6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$
LIA-QMS 10 Дж/см ²	$2.4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$	$4.0 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$	$2.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$
LIA-QMS 10 Дж/см ²	$2.4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$	$5.8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$	$2.4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$
LIA-QMS 15 Дж/см ²	$3.7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$	—	—
TDS	$2.9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$	—	—

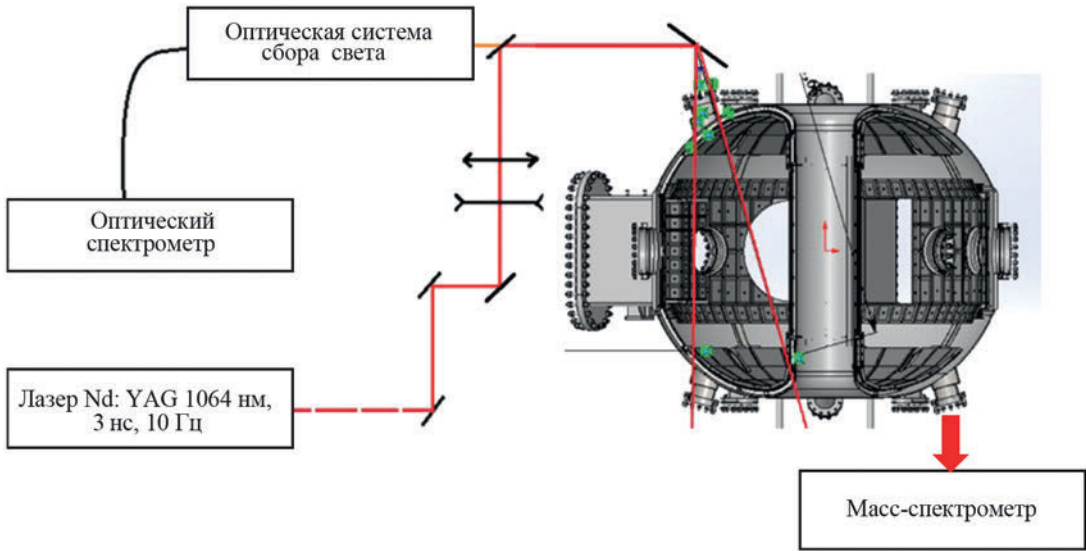


Рис. 5. Схема ввода лазерного излучения и сбора света диагностики содержания водорода в стенках токамака Глобус-М2.

при лабораторном макетировании. В эксперименте на токамаке использовался Nd:YAG лазер с длительностью импульса равной 3 нс и максимальной энергией в импульсе до 2 Дж. Оценить плотность энергии лазерного излучения на поверхности облицовки во время эксперимента не представлялось возможным, однако по измерениям глубины кратера постфактум был сделан вывод о том, что показатель тепловой нагрузки ($\text{Дж} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-0.5}$) был заметно выше, чем в лабораторных экспериментах. Ось системы сбора света была совмещена с осью системы ввода лазерного излучения за счет монтажа элементов обеих систем на общем оптическом рельсе, что позволило держать лазерный луч в центре области наблюдения в ходе сканирования дивертора. Трехобъективная оптическая система сбора света передавала излучение лазерного факела на торец волокон оптического спектрометра. Для регистрации эмиссионного спектра лазерной искры в данной системе использовался дифракционный спектрометр SPT-DDHR-4 [13] с большой дисперсией и высокой пропускной способностью.

Для ввода лазерного излучения в вакуумную камеру токамака использовался верхний патрубок диаметром

80 мм, на который было установлено сапфировое окно, оснащенное защитной шторкой.

Регистрация остаточных газов осуществлялась при помощи квадрупольного масс-спектрометра Pfeiffer PrismaPlus QMG220 (с анализатором QMA220), установленного в откачной системе непосредственно перед ТМН. Данный QMS имеет предел обнаружения по парциальному давлению $1.5 \cdot 10^{-10}$ Па, и скорость измерения одной массы от 20 мс до 60 с, т. е. регистрация одного спектра (до 50 а. е. м.) осуществляется от 1 до 300 с.

Перед началом измерения была проведена калибровка показаний масс-спектрометра для водорода и гелия. В ходе процедуры калибровки в объем установки Глобус-М2 напускался газ, после чего напуск газа перекрывался и проводилась одновременная запись динамики давления в камере и амплитуды соответствующих линий в масс-спектре. При давлениях выше, чем $5 \cdot 10^{-4}$ Па, когда полное давление в камере незначительно отличается от парциального давления водорода, наблюдается близкая к линейной зависимость ионного тока от давления с коэффициентом пропорциональности $\sim 3 \cdot 10^5$ Па/А. В дальнейших

экспериментах мы использовали данный калибровочный коэффициент для расчета давления водорода и дейтерия в камере Глобус-М2.

3.2. Измерение содержания изотопов водорода в графитовой облицовке дивертора Глобус-М2 методом LIA-QMS

После завершения калибровки была проведена серия экспериментов по облучению облицовки токамака Глобус-М2 с целью записи эмиссионных спектров излучения лазерной искры и масс-спектров десорбированных газов. Базовое давление в вакуумной камере токамака поддерживалось на уровне $4 \cdot 10^{-4}$ Па. Лазерное излучение фокусировалось внутри объема токамака на графитовую диверторную плитку в области пересечения с правой ветвью сепаратрисы, которое соответствует положению образцов 3.1 и 3.2, исследуемым в предыдущем пункте. Всего было произведено 8 лазерных экспозиций, две из которых были тестовыми, а шесть заключались в сканировании лазерным лучом поверхности плитки. Как показали предварительные эксперименты, время накопления при записи масс-спектра нежелательно делать менее, чем 200 мс на диапазон в 1 а. е. м. Для того, чтобы ограничить длительность записи одного спектра временем 1–2 с, было принято решение разбить весь интересующий нас диапазон на несколько меньших. Поэтому, в течение первых 3-х сканирующих экспозиций масс-спектр записывался в 3-х диапазонах масс: 1–5, 11–16 и 23–31 а. е. м. Затем выбирались линии, которые демонстрировали наибольший рост при лазерном облучении и в ходе следующих 3 экспозиций были записаны кинетики соответствующих линий. На рис. 6 показаны кинетики отдельных линий, соответствующих 1–4 массам и две последовательные записи масс-спектра в диапазонах 1–5 а. е. м, сделанные до

начала и во время лазерного сканирования дивертора установки Глобус-М2. Как видно из рис. 6, облучение лазером приводит к дегазации облицовки, которая может быть надежно зарегистрирована методами масс-спектрометрии. Следует отметить, что одновременно с ростом интенсивности линий, соответствующих 1–4 массам, в спектре наблюдался рост сигналов от кислорода, азота, воды и различных соединений углерода. Как следствие, скачок полного давления более чем на порядок превышал амплитуду импульсов парциальных давлений изотопов водорода в камере.

Из рис. 6 можно сделать вывод о количестве изотопов водорода, содержащегося в поверхностных слоях облицовки. Используя полученный выше калибровочный коэффициент, парциальное давление водорода в камере во время экспозиции можно оценить, как $(I_{H_2} + I_{HD})/2 \cdot 3 \cdot 10^5 \sim 4 \cdot 10^{-6}$ Па, а парциальное давление дейтерия как $(I_{D_2} + I_{HD})/2 \cdot 3 \cdot 10^5 \sim 1.6 \cdot 10^{-6}$ Па. Принимая скорость откачки равной $S \sim 1$ м³/с, стационарные потоки со стенки равны $P \cdot S/(k \cdot T) \sim 10^{15}$ Н₂/с и $4 \cdot 10^{14}$ D₂/с. Как следует из рис. 7, один проход сканирования занимал ~ 50 с, и за это время экспонировалась площадь ~ 1 см². Таким образом, на основании проведенных измерений можно сделать вывод о количественном содержании изотопов водорода в поверхностных слоях облицовки дивертора Глобус М2: $\sim 10^{17}$ Н/см² и $4 \cdot 10^{16}$ D/см². Полученное соотношение протия и дейтерия в поверхностном слое скорее всего связано с проведением процедуры боронизации стенки. Эта процедура в Глобус-М2 проводится в тлеющем разряде гелия в присутствии паров карборана (C₂B₁₀H₁₂).

Для получения информации о глубине залегания топлива в приповерхностной области был проведен цикл экспозиций, в котором одна и та же площадка сканировалась последовательно несколько раз.

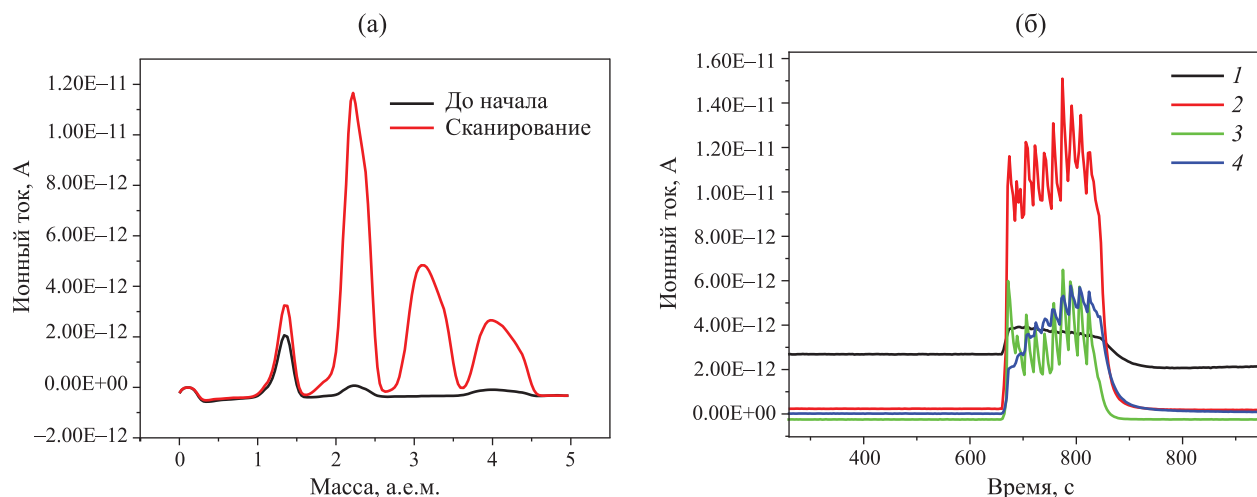


Рис. 6. Две последовательные записи масс-спектра в диапазонах 1–5 а. е. м., сделанные до начала (черная линия) и во время (красная линия) лазерного сканирования облицовки дивертора установки Глобус-М2 (а), кинетики линий, соответствующих массам 1–4 (Н, Н₂, HD, D₂) (б).

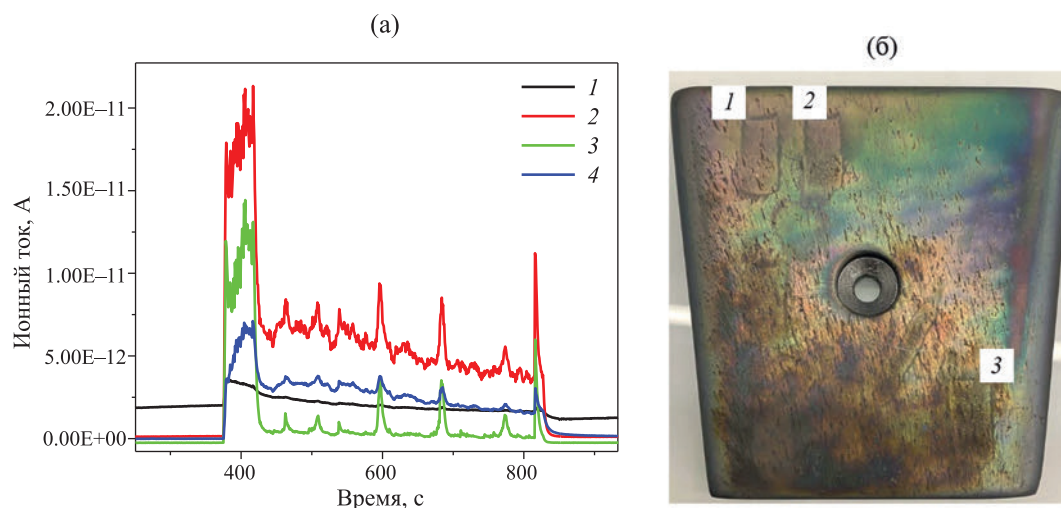


Рис. 7. Кинетики линий, соответствующих массам 1–4 (H, H₂, HD, D₂) записанные в ходе многократного сканирования облицовки дивертора установки Глобус-М2 (а); облицовка дивертора после лазерного сканирования (б). Область 1 — глубина 80–90 мкм, 2 — 110–140 мкм, 3 — 60–70 мкм.

Результат такого многократного сканирования, показан на рис. 7а. Как видно из рисунка, после первого прохода, амплитуды линий, соответствующих изотопам водорода, резко уменьшаются, однако некоторое количество топлива наблюдается и в более глубоких слоях. При этом неясно, оказывает ли какое-либо влияние на горение плазменного разряда топливо, запасенное в глубине взаимодействующих с плазмой элементов. Очевидно, данный вопрос требует дальнейшего исследования как в лабораторных условиях, так и на токамаке. Внешний вид плитки после лазерной экспозиции показан на рис. 7б. Измерения глубины следа лазерного сканирования позволили оценить полную толщину слоя, удаленного за 10 проходов, как ~100 мкм. Следовательно, приведенные выше оценки, сделанные для первого прохода лазерного сканирования облицовки, дают информацию о залегании изотопов водорода в верхнем слое толщиной ~10 мкм.

3.3. Измерение изотопного соотношения дейтерий/протий методом LIBS

На рис. 8 приведены фотографии лазерной искры во время первого и второго проходов лазерного сканирования облицовки дивертора Глобус-М2.

Из рис. 8 видно, что в начале экспозиции лазерный факел имеет два цвета — синий и красный. По всей вероятности, синий цвет соответствует свечению азота (391, 423 и 470 нм), так как в масс-спектрах интенсивность линии молекулы азота является доминирующей. Свечение углерода лежит в глубоком УФ-диапазоне (менее 200 нм). Красный цвет соответствует свечению водородных линий (656 нм). Примечательно, что визуально лазерный факел имеет тенденцию к раздвоению, однако авторы предполагают,

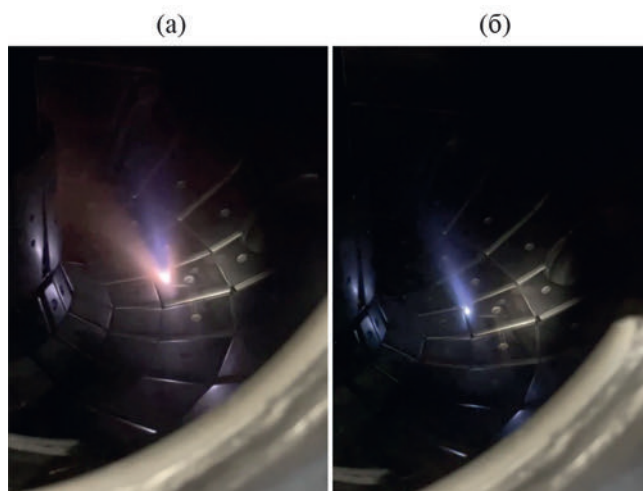


Рис. 8. Фотография лазерной искры во время первого (а), второго проходов лазерного сканирования облицовки дивертора Глобус-М2 (б).

что данный эффект связан с тем, что синяя часть факела имеет более высокую интенсивность, и красная часть факела на ее фоне становится незаметной. После первого прохода сканирования исследуемой области красная часть факела практически полностью исчезает, что подтверждает сделанные выше выводы о том, что за первый проход происходит преимущественное удаление водородосодержащих пленок с поверхности тайла. Следует также отметить, что после первого прохода сканирования исследуемой области факел становится значительно меньше.

В данной работе спектроскопия лазерного факела использовалась совместно с методом LIA-QMS для измерения относительной интенсивности линий дейтерия и протия. Во время лазерной экспозиции эмис-

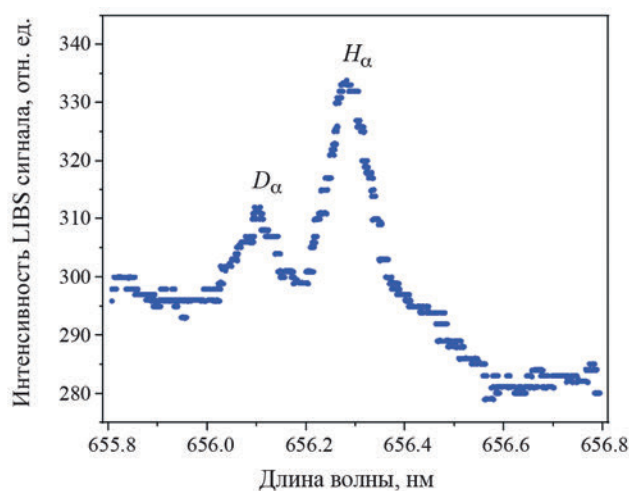


Рис. 9. Спектр свечения лазерной искры по время первого прохода лазерного сканирования, давление $5 \cdot 10^{-4}$ Па.

сионный спектр факела в спектральном диапазоне 655.8–656.8 нм регистрировался при помощи спектрометра SPT-DDHR-4. Спектр, записанный во время первого прохода сканирования, приведен на рис. 9. На спектре хорошо видно Бальмер-альфа ($H\alpha$ и $D\alpha$) линии от двух изотопов водорода — протия (H) и дейтерия (D). Из соотношения интенсивности линий можно предположить, что отношение концентраций дейтерия и протия в искре составляет около 1:3, что близко к оценкам, полученным методами масс-спектрометрии $\sim 1:2.5$. Данный факт подтверждает корректность измерений, проведенных методом LIA-QMS. В частности, можно ответить на вопрос о соотношении вкладов D_2 и ^4He в интенсивность линии, соответствующей массе 4 в масс-спектре. Поскольку стенка установки Глобус-M2 регулярно проходит процедуру кондиционирования в тлеющем гелиевом разряде, такой результат не является очевидным. В нашем случае, исходя из данных LIBS, можно сделать вывод о доминирующем вкладе D_2 в интенсивность линии 4-й массы.

После начала второго сканирования Бальмер-альфа линии изотопов водорода полностью пропадали из спектра, что подтверждает, что большая часть изотопов водорода, содержащихся в приповерхностных слоях, удаляется во время первого прохода.

Оценки атомной концентрации дейтерия на глубине более 10 мкм (после первого прохода лазерного сканирования) дают величину $\sim 10^{-2}$ ат%, что существенно меньше атомной концентрации дейтерия в осадениях, измеренной в [10] на плитке из того же ряда — 4 ат%. Полученная нами концентрация $\sim 10^{-2}$ ат% гораздо ближе к величине $2 \cdot 10^{-3}$ ат%, приведенной в работе [10] для растворенного D_2 в объеме графитовой облицовки. В наших экспериментах интегральная поверхностная плотность атомов дейтерия составила $\sim 4 \cdot 10^{16}$ D/см², где преобладающий вклад

оказывает первый проход. Данный результат примерно на порядок меньше содержания — $5.6 \cdot 10^{17}$ D/см², приведенного в той же работе [10] в осадениях с толщиной 2.6 мкм. Следовательно, естественным будет предположить, что в описанных выше экспериментах на Глобус-M2 толщина осадений была заметно меньше (сотни нм). За первый проход все осадения были удалены вместе со слоем объемного материала, что и дало несколько более высокий уровень сигнала по сравнению с дальнейшими проходами сканирования, когда мы распыляли исключительно объемный материал.

В представленных экспериментах оптическая спектроскопия использовалась только для регистрации спектра эмиссии протия и дейтерия. В то же время метод LIBS позволяет получать информацию и о составе распыленного слоя, а при должной калибровке быть независимым инструментом количественного анализа содержания изотопов водорода в стенке. Для этого необходимо одновременно реализовать запись в широком спектральном диапазоне, обеспечить высокое разрешение и светосилу в области свечения $H\alpha$ и $D\alpha$. Как вариант, предлагается использовать 2 спектральных канала с перекрестной калибровкой. Контролируя одновременно элементный состав распыляемого вещества и содержание в нем изотопов водорода, мы сможем разделять водород, со-осажденный вместе с продуктами эрозии и содержащийся в объеме стенки, получать дополнительную информацию о механизмах накопления топлива в зависимости от сценария разрядов, проведения процедур боронизации или кондиционирования.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены первые результаты разработки и апробации системы лазерной диагностики содержания изотопов водорода в первой стенке токамак-реакторов. Макетирование в лабораторных условиях подтвердило применимость системы для измерения содержания изотопов водорода во взаимодействующих с плазмой элементах токамаков. Система была смонтирована на установке Глобус-M2 и получены первые экспериментальные данные о накоплении изотопов водорода в облицовке дивертора установки. Сравнение изотопного содержания по соотношению интенсивности $H\alpha/D\alpha$, полученного двумя методами: LIBS и LIA-QMS позволила подтвердить корректность проведенных измерений.

Дальнейшее развитие методов включает в себя разработку методики LIBS для многоэлементного количественного анализа в предположении Больцмановской заселенности возбужденных уровней и не требующего использования калибровочных кривых. Альтернативой может служить метод регистрации, основанный на спектроскопии во внешнем разряде, например, в Пеннинговской ячейке. Кроме того, при-

менение метода абляции для исследования осаждений неизвестной толщины предполагает наличие обратной связи, отслеживающей основные химические элементы первой стенки в лазерном факеле. Наличие подобной системы на базе многоэлементного LIBS позволит избежать повреждения первой стенки.

Точность и чувствительность разработанного метода сильно зависят от материала первой стенки и объема вакуумной камеры токамака. В ходе исследований наблюдалась и десорбция водорода из объема первой стенки, которая тоже может вносить заметный вклад в формирование сигнала масс-спектрометра. К сожалению, попытка выделения водорода из объема сопряжена с нарушением целостности первой стенки. Для повышения точности определения концентрации изотопов водорода необходимо определять глубину и форму лазерного кратера. Для этого предполагается усилить методику интерферометрией. Реализация калибровки масс-спектрометра возможна несколькими способами, которые могут быть легко интегрированы в текущую вакуумную систему токамака. В последующих исследованиях на токамаке Глобус-М2 планируется использовать калиброванную течь с потоком дейтерия $\sim 10^4$ Па · м³/с, что позволит провести более точный количественный анализ изотопов водорода.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена с использованием УНУ «Сферический токамак Глобус-М», входящей в состав ФЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях» ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Макетирование диагностики LIA-QMS в лабораторных условиях выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-12-00360). Реализация лазерных диагностик содержания изотопов водорода на установке Глобус-М2 выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (договор № 0723-2020-0043). Разработка вариантов размещения диагностического комплекса на токамаке, а также анализ ожидаемой точности измерения выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (договор FFUG-2024-0034 и № 0034-0024-0028).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Doerner R.P., Baldwin M.J., De Temmerman G., Hanna J., Nishijima D., Roth J., Schmid K., Tynan G.R., Umstadter K. // IAEA Genova. 2008. Ex/P4-4. P. 1.
2. Federici G., Skinner C.H., Brooks J.N., Coad J.P., Grisolia C., Haasz A.A., Hassanein A., Philipps V., Pitcher C.S., Roth J., Wampler W.R., Whyte D.G. // Nucl. Fusion. 2001. V. 41. P. S1967. Doi: 10.1088/0029-5515/41/12/218.
3. Sugiyama K., Roth J., Anghel A., Porosnicu C., Baldwin M., Doerner R., Krieger K., Lungu C. P. // J. Nuclear Mater. 2011. V. 415. P. S731. Doi: 10.1016/j.jnucmat.2010.09.043.
4. ITER Documentation 2001 Generic Site Safety Report volumes III, ITER Document Ref. G 84 RI.
5. Zlobinski M., Sergienko G., Martynova Y., Matveev D., Unterberg B., Brezinsek S., Spilker B., Nicolai D., Rasinski M., Moller S., Linsmeier Ch., Lungu C.P., Porosnicu C., Dinca P., De Temmerman G. // Nucl. Mater. Energy. E. 2019. V. 19. P. 503. Doi: 10.1016/j.nme.2019.04.007.
6. Hodille E.A., Bernard E., Markelj S., Mougenot J., Becquart C. S., Bisson R., Grisolia C. // Physica Scripta. 2017. P. 014033. Doi: 10.1088/1402-4896/aa8787.
7. Paris P., Butikova J., Laan M., Aints M., Hakola A., Piip K., Tufail I., Veis P. // Physica Scripta. 2017. P. 014003. Doi: 10.1088/0031-8949/2017/T170/014003.
8. Brezinsek S., Widdowson A., Mayer M., Philipps V., Baron-Wiechec P., Coenen J.W., Heinola K., Huber A., Likonen J., Petersson P., Rubel M., Stamp M.F., Borodin D., Coad J.P., Carrasco A.G., Kirschner A., Krat S., Krieger K., Lipschultz B., Linsmeier Ch., Matthews G.F., Schmid K., JET contributors // Nucl. Fusion. 2015. V. 55. P. 063021. Doi: 10.1088/0029-5515/55/6/063021.
9. Gasparyan Y., Bulgadaryan D., Efimov N., Efimov V., Krat S., Popova M., Sinelnikov D., Vovchenko E., Dmitriev A., Elets D., Mukhin E., Razdobarin A., Minaev V., Novokhatsky A., Sakharov N., Varfolomeev V. // Fusion Engineering Design. 2021. V. 172. P. 112882. Doi: 10.1016/j.fusengdes.2021.112882.
10. Gusev V.K., Alimov V.Kh., Arkhipov I.I., Balden M., Denisov E.A., Gorodetsky A.E., Kurdumov A.A., Kompaniec T.N., Lebedev V.M., Litunovsky N.V., Mazul I.V., Novokhatsky A.N., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Sharapov V.M., Terukov E.I., Trapeznikova I.N., Roth J., Zakharov A.P., Zalavutdinov R.Kh. // J. Nuclear Mater. 2009. V. 49. P. 095022. Doi: 10.1088/0029-5515/49/9/095022.
11. Novokhatsky A.N., Gusev V.K., Ber B.Ya., Brunkov P.N., Bukhovets V.L., Gervash A.A., Gorodetsky A.E., Grigoriev S.A., Kuznetsov V.E., Litunovsky N.V., Makhankov A.N., Mazul I.V., Mukhin E.E., Petrov Yu.V., Rybkina T.V., Sakharov N.V., Sokolov R.V., Tanchuk V.N., Tolstyakov S.Yu., Voronin A.V., Zakharov A.P., Zalavutdinov R.Kh. // БАИТ. Сер. Термоядерный синтез. 2017. Т. 40. С. 14. Doi: 10.21517/0202-3822-2017-40-4-14-24.
12. Zlobinsky M. PhD Thesis. Laser Induced Desorption as Hydrogen Retention Diagnostic Method.
13. Mukhin E.E., Andrew P., Anthoine A.D., Bazhenov A.N., Barnsley R., Bukreev I.M., Bukhovets V.L., Chernakov A.P., Gorodetsky A.E., Kochergin M.M., Koval A.N., Kukushkin A.B., Kukushkin A.S., Kurskiev G.S., Levashova M.G., Litvinov A.E., Litunovsky V.N., Markin A.V., Mazul I.V.,

Masyukevich S.V., Miroshnikov I.V., Nemov A.S.,
Novokhatsky A.N., Razdobarin A.G., Sherstnev E.V.,
Samsonov D.S., Semenov V.V., Smirnov A.S., De

Temmerman G., Tolstyakov S.Yu., Zalavutdinov R.Kh.,
Walsh. M.J. // Nucl. Fusion. 2016. V. 56. P. 036017.
Doi: 10.1088/0029-5515/56/3/036017.

HYDROGEN ISOTOPES IN THE GLOBUS-M2 TOKAMAK WALL

A. G. Razdobarin^{a,b,*}, O. S. Medvedev^{a,c}, I. M. Bukreev^a, D. L. Bogachev^a, A. M. Dmitriev^a,
D. I. Elets^{a,b,c}, E. V. Smirnova^{a,b}, L. A. Snigirev^{a,b}, V. B. Minaev^a, A. N. Novokhatsky^a, I. V. Miroshnikov^a,
S. V. Filippov^a, M. V. Grishaev^c, and Yu. M. Gasparyan^{b,c}

^a Ioffe Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 194021 Russia

^b Department of Physics, St. Petersburg State University, St. Petersburg, 199034 Russia

^c National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, 115409 Russia

*e-mail: aleksey.razdobarin@mail.ioffe.ru

Mock-up of the system for remote monitoring of the accumulation of hydrogen isotopes in the walls of the Globus-M2 tokamak was assembled and tested. The measurements were performed using the LIA-QMS laser diagnostics (laser-induced ablation with registration using quadrupole mass-spectrometry). The data were obtained on the content of hydrogen isotopes in deposits appearing after exposing tungsten collectors to the loads in the volume of the Globus M tokamak. After testing the diagnostics under laboratory conditions, it was mounted at the Globus-M2 facility. In-situ measurements of the content of hydrogen isotopes in the graphite tiles of the tokamak divertor were performed. The possibility of combining the LIA-QMS diagnostics with the LIBS (laser-induced emission spectroscopy) diagnostics has been confirmed, in order to obtain information on the composition of the ablated material. In addition, the LIBS method was used for obtaining the deuterium/protium isotopic ratio during measurements in the Globus-M2 facility.

Keywords: laser-induced ablation, laser-induced desorption, first wall, spherical tokamak, tritium accumulation Diagnostics