

О.С. МЕДВЕДЕВ^{1,2}, А.Г. РАЗДОБАРИН^{1,3}, Е.В. СМИРНОВА^{1,3},
Д.И. ЕЛЕЦ^{1,2,3}, Л.А. СНИГИРЕВ¹, А.Н. НОВОХАЦКИЙ¹

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

³Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

* o.medvedev@mail.ioffe.ru

ЛАЗЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА ИЗОТОПНОГО СОСТАВА УГЛЕВОДОРОДНЫХ ОСАЖДЕНИЙ НА ЭЛЕМЕНТАХ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТОКАМАКА 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. 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 LID-QMS) и эмиссионной спектроскопии (LIBS, LIAS).

Эффективность метода LID-QMS продемонстрирована для бериллиевых и углеродных осадений для характерных длительностей импульсов 1-10 мс [2, 3]. Мы же предлагаем использовать метод LIA-QMS для количественного анализа изотопов водорода, который позволит также осуществлять профилирование с возможностью контроля элементного состава с помощью LIBS. Однако на данный момент остаётся открытым вопрос, применимости методов на основе лазерной абляции для количественного анализа содержания изотопов водорода методами масс-спектрометрии, так как в процессе абляции возможен выход дейтерия в молекулярном, атомарном, ионизованном виде, а также эрозия материала в виде капель и кластеров, и как следствие, часть сигнала может быть потеряна при использовании масс-спектрометрического анализа.

В данной работе проведено количественное сравнение содержания дейтерия, регистрируемого методами LIA-QMS, LID-QMS и TDS для

углеводородных осадений, полученных в установке Глобус-М2. Лазерная десорбция была реализована в режиме свободной генерации Nd:YAG лазера, при котором длительность импульса составляет 200 мкс, в то время как абляция выполнялась с использованием этого же лазера, но в режиме модуляции добротности, при котором длительность импульса составляет 12 нс. Анализ остаточных газов для процессов LID и LIA производился с помощью квадрупольного масс-спектрометра (QMS). Базовое давление в вакуумной камере составляло $1-2 \cdot 10^{-4}$ Па. В качестве контрольного метода оценки содержания дейтерия использовался термодесорбционная спектроскопия с использованием времяпролетного масс-спектрометра.

Исследуемый образец представлял собой вольфрамовый элемент облицовки после экспозиции в диверторе токамака Глобус-М2 в течении нескольких экспериментальных кампаний [4]. Исследования осадений на сканирующем электронном микроскопе (см. рис. 1) показали, что толщина осадений варьируется от 400 до 600 нм в рамках области 10×10 мм. Осадки имеют слоистую и глобулярную структуру. Исследование однородности толщины осадений в масштабах всего элемент облицовки размером $\sim 10 \times 10$ см не проводилась.

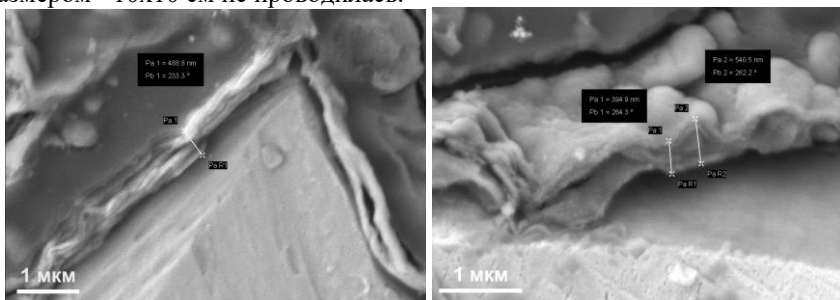


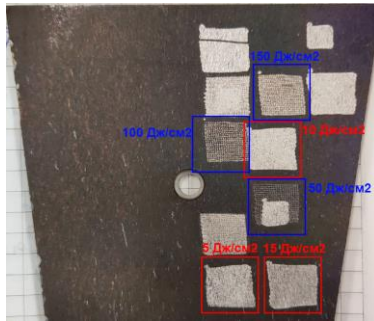
Рисунок 1 – СЭМ микрофотографии углеводородных осадений на W тайле из дивертора Глобус-М2.

В ходе лазерного облучения измерялось интегральное содержание дейтерия в площадке размером 10×10 мм² для нивелирования неопределённости формы кратера. Предварительные эксперименты позволили определить диапазон параметров лазерного облучения для обоих методов LID-QMS и LIA-QMS:

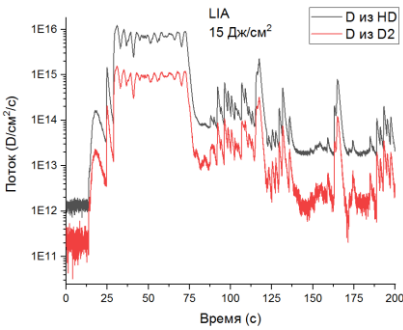
- Плотность энергии – для LIA-QMS 5 Дж/см², 10 Дж/см² и 15 Дж/см² при длительности импульса 12 нс, для LID-QMS – 50 Дж/см², 100 Дж/см² и 150 Дж/см² при длительности импульса 200 мкс.
- Шаг сканирования – 0.5 мм,

- Время нахождения в точке – 0.1 сек для LIA-QMS, 1 сек для LID-QMS при частоте импульсов 10 Гц,

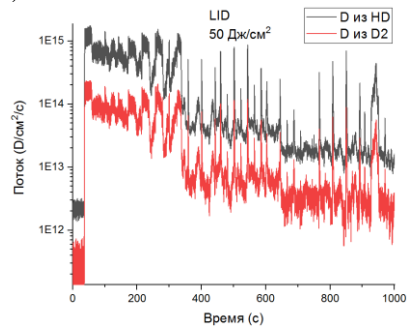
На рисунке 2 (а) представлена фотография элемента облицовки после проведённых экспериментов LID-QMS (области, выделенные синим) и LIA-QMS (области, выделенные красным). Для оценки уровня дегазации углеводородных осадений в режиме LID-QMS при плотности энергии 50 Дж/см² было проведено повторное сканирование части площадки в режиме LIA-QMS. Данный эксперимент показал, что остаточное количество дейтерия в плёнке составляет менее 5% от зарегистрированного в режиме LID-QMS.



(а)



(б)



(в)

Рисунок 2 – (а) Фотография плитки с областями после LIA-QMS (красные) и LID-QMS (синие). (б) – Поток атомов дейтерия, полученный из сигнала QMS для 3-ей (черная кривая) и 4-ой (красная кривая) масс в режиме абляции. (в) – Поток атомов дейтерия, полученный из сигнала QMS из 3-ей (черная кривая) и 4-ой (красная кривая) масс в режиме

десорбции.

На рис.2 (а) и (б) приведены значения потоков атомов дейтерия, вычисленные из сигнала QMS для экспериментов LID-QMS и LIA-QMS. Наибольший поток наблюдается для всех плотностей энергии во время первого прохода, в течении которого из исследуемой области выходит 80-90% всего дейтерия. После 2-го прохода уровень сигнала 3 и 4-ой масс падает на 1-2 порядка. Всплески сигнала после 2х проходов связана с несовершенством системы сканирования, которая периодически выводит лазерный луч за края заданной области, тем самым вызывая всплеск сигнала из осадений, ранее не подвергшихся лазерной абляции/десорбции. Суммарная поверхностная плотность атомов дейтерия для трех плотностей энергии для LID-QMS и LIA-QMS представлены на рис.3. Пунктирной линией обозначена поверхностная плотность атомов дейтерия, зарегистрированная методом TDS. Более подробное описание эксперимента, результатов и причин их расходимости будут представлены в докладе.

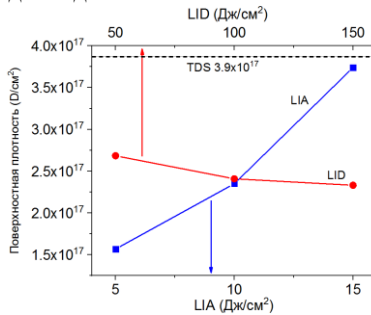


Рисунок 3 – Поверхностная плотность атомов дейтерия, измеренная методами LIA-QMS, LID-QMS и TDS на углеводородных осадениях на элементе облицовки экспонированном в Глобус-М2

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда 23-79-00023, <https://rscf.ru/project/23-79-00023/>

Литература

- [1] De Temmerman G., Hirai T., Pitts R.A., Plasma Phys. Control. Fusion. 2018. V. 60, P.044018.
- [2] Zlobinski et al., J. Nucl. Mater. 2013, 438, S1155-S1159.
- [3] M. Zlobinski et al., Nuclear Materials and Energy, vol. 19, 2019
- [4] А. Н. Новохацкий и др., ВАИТ. Сер. Термоядерный синтез, 2017, т. 40, вып. 4