

УДК 533.9.082.5

## ЛАЗЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА НАКОПЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В ПЕРВОЙ СТЕНКЕ ТОКАМАК-РЕАКТОРОВ

Смирнова Е.В. (Университет ИТМО), Раздобарин А.Г. (ФТИ им. Иоффе РАН)

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, Медведев О.С. (ФТИ им. Иоффе РАН)

**Введение.** В устройстве термоядерных установок – токамак-реакторов, важная роль отводится контролю накопления термоядерного топлива в компонентах первой стенки и переосажденных плёнках, образующихся при длительных импульсах плазменного разряда [1]. Вольфрам (W) является наиболее перспективным конструкционным материалом для облицовки первой стенки и области дивертора, так как обладает высокой температурой плавления и теплопроводностью, высокой устойчивостью к нейтронному облучению и низким коэффициентом распыления при плазменной обработке. Для термоядерных реакторов следующего поколения в качестве топлива планируется использовать дейтерий-тритиевую смесь. Тритий является радиоактивным изотопом водорода и имеет свойство накапливаться в материалах. Для обеспечения безопасности персонала и предотвращения неконтролируемого выхода трития со стенки во время реакции необходимо проводить диагностику его накопления в элементах, обращённых к плазме. Среди механизмов накопления изотопов водорода в первой стенке термоядерных реакторов выделяют кратковременную адсорбцию с последующим газовыделением, глубокую имплантацию (захват изотопов водорода на радиационных дефектах, в примесях, дислокациях и междоузлиях кристаллической решетки) и совместное осаждение с материалами, распыленными при контакте плазмы с поверхностью облицовки. Причём во время соосаждения происходит непрерывное накопление изотопов водорода без точки насыщения, поэтому именно плёнки требуют особого внимания при проведении диагностики накопления радиоактивного трития [2].

Среди часто применяемых методов для анализа накопленных газов в твёрдых телах выделяют термодесорбционную спектроскопию (TDS) и анализ ядерных реакций (NRA). Однако методы TDS и NRA применяют после вскрытия вакуумного объёма, что возможно только при сервисном обслуживании реактора. Для количественной оценки содержания изотопов водорода в первой стенке токамаков разрабатывают in-situ методы с применением лазерного излучения: лазерно-индуцированную десорбцию (LID) и лазерно-индуцированную абляцию (LIA) совместно с масс-спектрометрией. В методе LID для десорбции изотопов водорода из конструкционных материалов необходимо локально нагреть W до температуры свыше 700 K с помощью лазерного излучения с длительностью импульса ~1 – 3 мс [3]. Данный метод уже имеет доказанную эффективность для плёнок бериллия толщиной до 100 мкм и планируется к применению на Международном экспериментальном термоядерном реакторе (ITER). В настоящее время изучается возможность использования метода LIA для количественного анализа содержания изотопов в облицовке первой стенке. Основное преимущество LIA — возможность совместного применения со спектроскопией лазерной искры пробоя (LIBS) для качественной и количественной оценки состава аблируемого слоя и профилирования по глубине кратера. Но существует неопределённость количественного анализа, так как во время абляции происходит удаление материала в различных формах – атомы, молекулы, кластеры, капли микронного размера и твёрдые частицы. Для определения влияния данного фактора необходимо подобрать оптимальные режимы лазерной абляции, а также напрямую сравнить получаемые результаты с результатами TDS и LID на идентичных образцах.

**Основная часть.** Для оценки точности методов LID и LIA и возможности их применения для количественного анализа содержания изотопов водорода были использованы образцы – тонкие плёнки W толщиной ~ 0,5 мкм на медной подложке 15x15 мм и толщиной 3 мм. Плёнки

W осаждались в атмосфере дейтерия при давлении 30 Па. Выбор материала подложки обусловлен эффективным отводом тепла, что исключает влияние её нагрева на десорбцию дейтерия.

В качестве источника лазерного излучения использовался твердотельный лазер Nd:YAG с длиной волны излучения 1064 нм, энергией в импульсе 0,43 Дж и частотой импульсов 10 Гц. Лазер использовался в режиме модуляции добротности для LIA и свободной генерации для LID с длительностью импульса 10 нс и 200 мкс, соответственно. Лазерное излучение фокусировалось на образце в пятно диаметром 1 мм.

Эксперименты по LID и LIA проводились в вакуумной камере при давлении  $1 \cdot 10^{-4}$  Па. Для сравнения методов были выбраны плотности энергии 10 Дж/см<sup>2</sup> для LIA и 100 Дж/см<sup>2</sup> для LID. Регистрация остаточных газов проводилась с помощью квадрупольного масс-спектрометра (QMS). Для сравнения методов LIA-QMS и LID-QMS в качестве реперного значения содержания дейтерия в исследуемых образцах использовался результат, полученный методом TDS.

В результате исследования были получены следующие результаты количественного анализа накопленного дейтерия в плёнках W:  $(1,6 \pm 0,1) \cdot 10^{16}$  D/см<sup>2</sup> для LIA,  $(1,7 \pm 0,4) \cdot 10^{16}$  D/см<sup>2</sup> для LID и  $(1,7 \pm 0,3) \cdot 10^{16}$  D/см<sup>2</sup> для TDS.

**Выводы.** В результате проведённой работы при оценке количественного содержания дейтерия, накопленного в плёнках W методом LIA, не было отмечено значительной потери количества дейтерия при масс-спектрометрическом анализе. Методами TDS, LID и LIA регистрируются близкие значения количественного содержания дейтерия в плёнках W, что указывает на возможность использования методов LID и LIA для диагностики накопления изотопов водорода в первой стенке токамаков.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда 22-12-00360, <https://rscf.ru/project/22-12-00360/>

#### **Список использованных источников:**

1. Mukhin E. E. et al. In situ monitoring hydrogen isotope retention in ITER first wall //Nuclear Fusion. – 2016. – Т. 56. – №. 3. – С. 036017.
2. Skinner C. H. Tritium retention and removal in Tokamaks //AIP Conference Proceedings. – American Institute of Physics, 2009. – Т. 1095. – №. 1. – С. 127-145.
3. Zlobinski M. et al. Hydrogen retention in tungsten materials studied by Laser Induced Desorption //Journal of Nuclear Materials. – 2013. – Т. 438. – С. S1155-S1159.