

М.А. ПОПОВА, Д.Г. БУЛГАДАРЯН, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ, В.С. ЕФИМОВ,
С.А. КРАТ, Ю.М. ГАСПАРЯН, М.В. ГРИШАЕВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕСОРБЦИИ ДЕЙТЕРИЯ ИЗ ВОЛЬФРАМА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НАНОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Контроль содержания трития в термоядерных установках является важной задачей с точки зрения обеспечения радиационной безопасности. Одним из доминирующих механизмов захвата изотопов водорода является так называемое соосаждение, т.е. захват в постепенно растущие из продуктов эрозии плёнки. Таким образом, значительная часть захваченного рабочего газа часто сконцентрирована в приповерхностной области. В связи с этим активно изучается возможность использования лазерного излучения для контроля содержания изотопов водорода на поверхности обращенных к плазме элементов термоядерных установок. Использование лазерного излучения позволяет осуществлять контроль дистанционно, а также проводить локальные измерения и получать распределение концентрации по поверхности [1].

В зависимости от параметров лазерного излучения может происходить либо простой нагрев поверхностного слоя и десорбция захваченного газа, либо абляция материала вместе с захваченным газом. Глубина прогреваемого слоя и глубина абляции также определяются параметрами лазера.

В данной работе проводилось моделирование для сравнения с полученными ранее на установке «Большой масс-монокроматор МИФИ» экспериментальными данными по десорбции дейтерия из вольфрамовых слоев при воздействии Nd:YAG лазера с длиной волны 1064 нм и длительностью импульса 20 нс. Измерения проводились при плотности энергии излучения в диапазоне 5 – 200 МВт/см², что покрывает как область десорбции, так и область абляции.

Моделирование проводилось с помощью кода TMAP7, позволяющего одновременно решать задачи диффузии и теплопроводности с различными граничными условиями. Параметры вольфрамового слоя брались стандартными для поликристаллического вольфрама. Дополнительно предполагалось наличие нескольких типов ловушек для водорода, равномерно распределенных по толщине пленки. Исследуемая в экспериментах вольфрамовая пленка осаждалась в магнетронном разряде в смеси аргона и дейтерия аналогично процедуре, описанной в [2]. Поэтому параметры ловушек выбирались на основе данных, полученных в данной

работе: 1) $E_{dt1} = 0,74$ эВ, $c_{t1} = 2,3$ ат.%; 2) $E_{dt2} = 1,18$ эВ, $c_{t2} = 1,8$ ат.%; 3) $E_{dt3} = 1,56$ эВ, $c_{t3} = 1,0$ ат.%

На рис.1 приведено сравнение экспериментальных значений количества десорбированного дейтерия при разной плотности энергии лазерного излучения и результатов моделирования с различными вариантами начального заполнения ловушек, а также максимальная температура образца, полученная при расчетах в TMAP и COMSOL Multiphysics для одномерной и трехмерной с гауссовым профилем пучка постановок. При рассмотрении полностью (100%) заполненных сначала ловушек (пометка (1) на графике) можно видеть, что расчетные значения оказываются несколько выше экспериментальных, что может быть связано с частичным выходом дейтерия за время между осаждением пленки и проведением экспериментов. Поэтому были проведены дополнительные расчеты, где ловушки предполагались сначала частично пустыми (пометка (2) на графике), а именно: полностью пустые наиболее слабые ловушки 1 типа (0%), ловушки 2 и 3 типов заполнены соответственно наполовину (50%) и почти полностью (95%). Также были проведены расчёты с частично заполненными сначала ловушками, где приповерхностный слой (толщиной 10, 50 нм) предполагался пустым. Это позволило более точно описать экспериментальные данные.

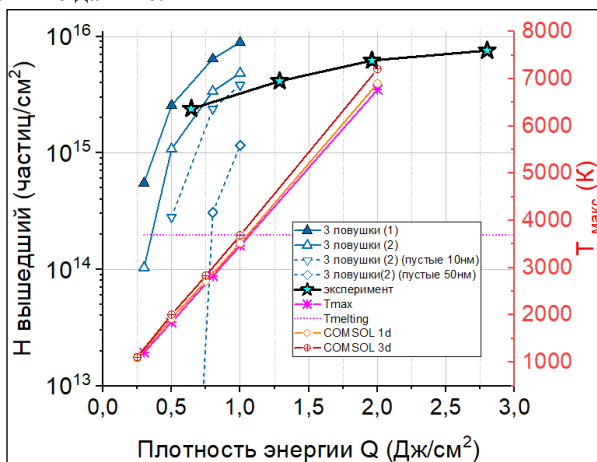


Рис.1. Зависимость количества десорбированного водорода от плотности энергии лазерного импульса для разных вариантов начального заполнения ловушек: (1) – полное заполнение ловушек, (2) – частичное заполнение (см. в тексте)

Резкое снижение количества десорбированного дейтерия с увеличением толщины опустошенного слоя говорит о чувствительности измерений с помощью наносекундного лазера к узкому поверхностному слою толщиной 10-100 нм (в зависимости от энергии импульса).

По результатам данных расчетов и лабораторных экспериментов в ближайшее время планируется разработка диагностической систем для токамака Глобус-М2 в ФТИ им.А.Ф.Иоффе.

Литература:

[1] E.E. Mukhin et al., Nucl. Fusion 56 (2016) 036017.

[2] S. Krat et al., Vacuum, 149 (2018) 23-28.