В.С. ЕФИМОВ[1], А.С. ШУБИНА[1], М. ЗИБРОВ[1,2], Ю.М. ГАСПАРЯН[1],
А.А. ПИСАРЕВ[1], T. SCHWARZ-SELINGER[2]
[1]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
[2]Max Planck Institute for Plasma Physics, Garching, Germany

ДЕСОРБЦИЯ ГЕЛИЯ ИЗ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ВОЛЬФРАМЕ

В работе исследовалось взаимодействие гелия с радиационными дефектами в вольфраме. Вольфрам будет использован в ИТЭР в зоне максимальных тепловых нагрузок и рассматривается для использования в будущих термоядерных установках. В условиях работы реактора обращенные к плазме элементы будут подвержены облучению не только мощными потоками плазмы, но и высокоэнергетичными нейтронами. Это будет приводить к образованию радиационных дефектов в объеме материала. Также в объеме материала будет образовываться гелий как продукт ядерных реакций, а также в результате распада трития, захваченного в объеме материала. Повышенная концентрация гелия в кристаллической решетке существенно ухудшает механические свойства материалов [1].

Для экспериментов были использованы образцы, отрезанные от листа вольфрама (чистота – 99,95 ат.%) производства фирмы Plansee (Германия), и имели размеры и толщину: 6x6 мм^2 и 50 мкм, соответственно. Образцы подвергались предварительной очистке в ультразвуковой ванне, затем отжигались в вакууме при температуре 2000 K в течение 30 минут, что приводит к рекристаллизации образцов. Для моделирования нейтронного облучения применялось облучение высокоэнергетичными ионами вольфрама. Повреждение образцов ионами вольфрама и облучение ионами $^3He^+$ проводилось на ускорителе TANDEM (IPP, Германия). Эксперименты по термодесорбции проводились на сверхвысоковакуумной установке «ТДС-стенд» (НИЯУ МИФИ, Москва).

На рисунке 1 можно видеть спектры термодесорбции 3 а.е.м и 4 а.е.м для образца вольфрама, поврежденного ионами вольфрама с энергией 20 МэВ дозой $1{,}4\times10^{18}$ W/м^2 и облученного ионами гелия $^3He^+$ с энергией 1 МэВ дозой 10^{20} He/м^2. В нашем случае сигнал 3 а.е.м. соответствует ^{3}He и HD, а в качестве сигнала 4 а.е.м. могут выступать элементы ^{4}He и D_2. Дейтерий в образцах присутствовал в результате предварительного анализа содержания гелия методом ядерных реакций: ^{3}He (D,p) ^{4}He.

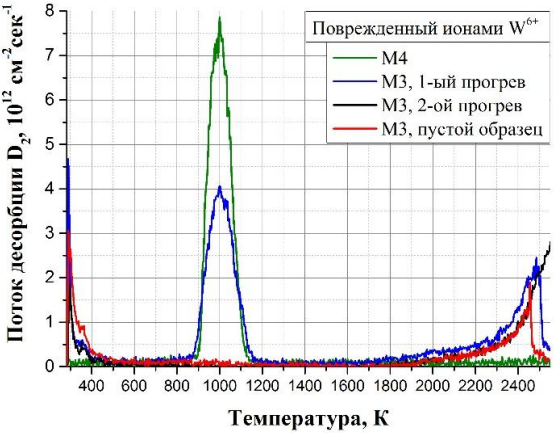


Рис.1. Спектры термодесорбции для двух последовательных нагревов образца вольфрама с предварительным повреждением, облученного ионами гелия и дейтерия (в ходе анализа методом ядерных реакций)

На спектрах 3 и 4 а.е.м. присутствует один единственный пик с максимумом при температуре 990 К. Для спектра 3 а.е.м. дополнительно имеется рост сигнала начиная с температуры 1700 К. В силу совпадения положения пиков на спектрах двух масс очевидно, что газовыделение в области 900-1100 К соответствует выходу дейтерия в составе HD и D_2. Отметим, что доза облучения дейтерием была на порядок меньше, чем доза облучения гелием. При этом, интегральное количество дейтерия, посчитанное на основе термодесорбционных спектров, совпало с точностью до 10% с дозой облучения, определенной по измерению тока в ходе анализа методом ядерных реакций.

Выход гелия происходит не раньше достижения температуры ~1700 К, где начинается рост сигнала 3 а.е.м. Однако, этот рост наблюдается и при нагреве образца, не облученного гелием (рис.1). Природное содержание дейтерия, а также особенности работы квадрупольного масс-спектрометра, приводят к одновременному росту 2 а.е.м. и 3 а.е.м. во всех экспериментах с отношением $I_{M2}/I_{M3} > 300$. На рисунке 1 также приведены спектры 3 а.е.м. для образца без предварительного облучения ионами и для повторного ТДС вышеупомянутого поврежденного образца. Можно видеть, что сигнал 3.а.е.м. для облученного образца в области температур свыше 1700 К лишь незначительно превосходит сигнал для «пустого образца». В предположении, что это выходит гелий, разница спектров для

облученного и необлученного образцов в области температур от 1700 К до 2500 К на рисунке 1 дает с учетом коэффициента калибровки масс-спектрометра по гелию 3.2×10^{18} Не/м^2, или 3,2 % от дозы облучения. В связи с тем, что большая часть гелия осталась в образце после ТДС до 2470 К, повторный ТДС был выполнен с выдержкой в течение 30 минут при T_{max}. Поток десорбции гелия в ходе выдержки было определить невозможно в связи с неопределенностью фонового сигнала HD. Однако, количество вышедшего гелия (90% от захваченного количества в ходе облучения) было определено при повторном анализе методом ядерных реакций. Таким образом, можно предположить, что отсутствие значительного газовыделения гелия на спектрах термодесорбции вплоть до максимальной температуры 2470 К объясняется не экстремально большой энергией связи гелия с дефектами (энергия связи, рассчитанная для 2470 К, без учета транспорта гелия – 7 эВ), а чрезвычайно медленным транспортом гелия в поле дефектов.

Для интерпретации экспериментальных результатов была предпринята попытка проведения моделирование газовыделения гелия с помощью численного кода TMAP 7. Результаты расчетов приведены на рисунке 3.

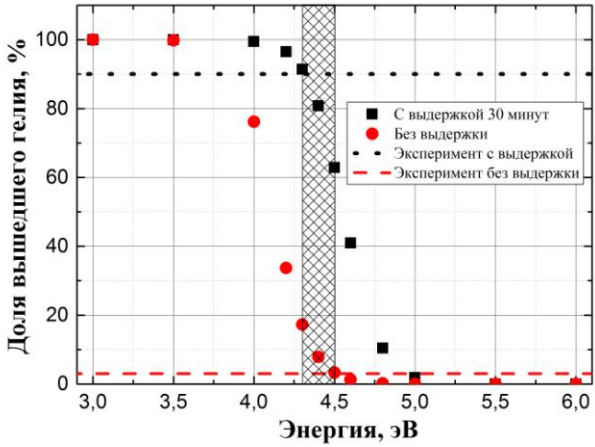


Рис. 3. Расчетные значения зависимости полного вышедшего количества гелия (квадратики) и количества гелия, вышедшего в ходе линейной части нагрева, в зависимости от энергии выхода гелия из ловушек (кружки). Линии соответствуют экспериментальным значениям.

В модели предполагалось равномерное распределение ловушек одного типа с концентрацией N_t = 1 ат.%. в поверхностном слое толщиной L = 2,3 мкм. На поверхности задавалась «бесконечная» скорость рекомбинации, а энергия активации для диффузии равной E_{dif} = 0,1 эВ. Энергия выхода из ловушек E_t варьировалась в диапазоне 3-6 эВ. Можно видеть, что результаты моделирования согласуются с экспериментом при значении энергии E_t от 4,3 до 4,5 эВ.

Таким образом, гелий может удерживаться в радиационных дефектах вплоть до очень больших температур, что, видимо, обеспечивается не только большой энергией связи, но и эффективным перезахватом атомов гелия в соседние дефекты по пути к поверхности. В случае больших концентраций гелия в материале кратковременный нагрев даже до очень больших температур, вплоть до 2500 К, не приводит к выходу большого количества атомов гелия из поврежденной зоны. Это делает практически невозможным вывод гелия из вольфрама путем нагрева конструкционных элементов. Кроме того, это говорит о том, что присутствие гелия осложняет отжиг радиационных дефектов, в которые он захватывается.

Список литературы:

[1] H. Ullmaier. Nuclear fusion, Vol.24, No.8 (1984).