С.А. РЯБЦЕВ[1], Ю.М. ГАСПАРЯН[1], В.С. ЕФИМОВ[1], З.Р. АРУТЮНЯН[1], А.А. ПИСАРЕВ[1], С.Л. КАНАШЕНКО[2], Ю.Д. ИВАНОВ[2]
[1]*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
[2]*Институт биомедицинской химии им.В.Н. Ореховича*

ЗАХВАТ ГЕЛИЯ В ВОЛЬФРАМ ПРИ ИОННОМ ВНЕДРЕНИИ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА МОРФОЛОГИЮ ПОВЕРХНОСТИ И НАКОПЛЕНИЕ ВОДОРОДА

В случае использования дейтерий-тритиевой смеси в качестве топлива в термоядерном реакторе неизбежно появление примеси гелия (He), являющегося продукта D–T реакции. Внедрение He в обращенные к плазме материалы может существенным образом влиять как на структуру их поверхностного слоя, так и на накопление изотопов водорода в этих материалах. Как известно, в области дивертора ITER в качестве обращенного к плазме материала будет использован вольфрам (W), который будет подвержен облучению высокими потоками ($>10^{22}$–10^{24} м$^{-2}$с$^{-1}$) ионов He с низкой энергией (от десятков до сотен эВ) при повышенных температурах. В связи с этим, исследование взаимодействия He с W представляет большой интерес.

Распространенным методом исследования захвата He является термодесорбционная спектроскопия (ТДС). Несмотря на высокий интерес, существует не так много работ по десорбции He из W, особенно, при высоких температурах. Термодесорбционный анализ W, облученного при температурах, превышающих 900 K, проводился только для доз облучения выше 10^{24} м$^{-2}$ [1–3]. Этот недостаток данных может частично объясняться исключительно высокими температурами десорбции. He может оставаться в металлах вплоть до температур порядка $(0{,}6–0{,}7)\times T_{пл}$, а для W это значение существенно выше технических ограничений большинства существующих ТДС-установок. Для того, чтобы преодолеть это ограничение, нагреватель установки «ТДС-стенд», которая использовалась для ТДС в данной работе, был геометрически оптимизирован, что позволило достигать температур вплоть до 2500 K в ходе ТДС.

Работа посвящена исследованию накопления гелия (He) и сопутствующей модификации поверхности вольфрама (W) после облучения пучком ионов He^+ при температурах поверхности порядка 700–1200 K и относительно низких дозах облучения (10^{20}–10^{22} м$^{-2}$), а также

влиянию предварительного облучения He на накопление дейтерия (D) в W.

Внедрение He в материал проводилось посредством ионного облучения на установке «Медион». Источник ионов He^+ установки позволяет облучать расположенный в основной камере образец масс-сепарированным ионным пучком в диапазоне энергий 0,1–3 кэВ. В качестве образцов использовалась W фольга толщиной 50 мкм производства Plansee, Германия (чистота 99,97%). Перед установкой в вакуумной камере, образцы подвергались ультразвуковой очистке в ацетоне и спирте. Кроме того, все образцы были предварительно отожжены при 2200 K в течение 30 минут в сверхвысоковакуумной установке «ТДС-стенд» для того, чтобы минимизировать количество естественных дефектов и примесей с целью улучшения воспроизводимости результатов. Затем образцы облучались масс-сепарированным пучком ионов He^+ с энергией 3 кэВ при температурах 700 K, 1000 K, 1200 K до доз облучения в диапазоне 10^{20}–10^{22} $м^{-2}$. Среднее значения тока пучка составляло порядка 0,55 мкА, что соответствует потоку ионов 5×10^{17} $м^{-2}с^{-1}$, это значение поддерживалось постоянным во всех экспериментах. Нагрев образца во время облучения осуществлялся с помощью W нагревателя, расположенного позади образца. Температура измерялась посредством приваренной к образцу вольфрам-рениевой термопары.

Как было отмечено выше, ТДС-анализ проводился в сверхвысоковакуумной установке «ТДС-стенд». Десорбция He из образца во время ТДС регистрировалась при помощи квадрупольного масс-спектрометра, после каждого эксперимента проводилась калибровка сигнала. Скорость нагрева образца в ходе ТДС составляла 2 K/c.

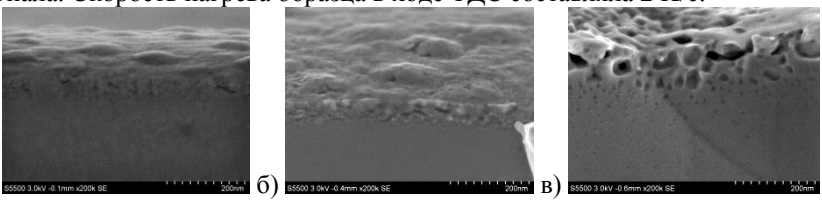

Рис. 1. SEM-фотографии поперечного сечения образцов W, облученных пучком ионов He^+ с энергией 3 кэВ до дозы 10^{22} $м^{-2}$ при температурах: а) 700 K, б) 1000 K, в) 1200 K.

Поверхность и поперечное сечение образцов после облучения исследовались методом сканирующей электронной микроскопии (SEM).

На рис. 1. представлены SEM-изображения поперечного сечения образцов, облученных до дозы 10^{22} м$^{-2}$ при различных температурах.

На поверхности образцов, облученных при 700 K и 1000 K, хорошо различимы блистеры. Поверхностный слой образцов достаточно пористый толщиной порядка 50–70 нм, что сравнимо с глубиной зоны внедрения (140 Å, хвост до 500 Å согласно расчетам SRIM). Поврежденный слой может быть толще за счет распухания и диффузии He и дефектов. В модифицированном слое наблюдаются также пузыри диаметром до 10 нм. В случае облучения при 1200 K (рис. 1 в), модифицированный слой толще, а пузыри сильно различаются по диаметру. Наблюдаются сильные повреждения образца на глубине вплоть до 100 нм с крупными пузырями внутри, в то время как маленькие пузыри диаметром менее 100 нм различимы на глубине до 500 нм. Такая более глубокая модификация поверхностного слоя при 1200 K, вероятно, связана с более высокой подвижностью вакансий и кластеров вакансий (как с захваченным He, так и без него) при высоких температурах.

Зависимость интегрального накопления He от дозы облучения при различных температурах облучения представлена на рис. 2 вместе с некоторыми данными из наших предыдущих работ [4–6]. Видно, что в случае облучения при 1000 K интегральное накопление близко к 100% (с учетом коэффициента отражения) вплоть до дозы облучения порядка 10^{21} м$^{-2}$ и имеет тенденцию к насыщению при увеличении дозы облучения до 10^{22} м$^{-2}$, оставаясь приблизительно на том же уровне в 10^{21} м$^{-2}$.

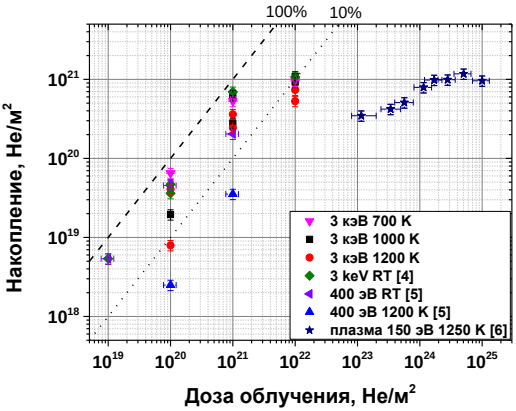

Рис. 2. Зависимость интегрального накопления He от дозы облучения ионами He^+ при различных температурах.

Высокая эффективность захвата при низких дозах облучения объясняется высокой концентрацией ловушек и высокой энергией связи He с дефектами, тогда как насыщение накопление может быть связано с насыщением концентрации дефектов в зоне внедрения и их низкой подвижностью при небольших температурах. Увеличение температуры облучения до 1200 K приводит к снижению эффективности захвата He из-за частичного отжига дефектов. Выход He из точечных дефектов и кластеров при 1200 K все еще не происходит, и концентрация He в поверхностном слое постепенно увеличивается с увеличением дозы облучения, достигая примерно одного и того же уровня в 10^{21} м$^{-2}$ для всех исследуемых температур. Из рис. 2 также видно, что доза облучения, при которой происходит насыщение накопления He, увеличивается с уменьшением энергии ионов He. Можно предположить, что ионы с более высокой энергией производят больше дефектов в образце, что приводит к более быстрому насыщению поверхностного слоя дефектами.

В работе также представлены результаты экспериментальной серии по последовательному облучению W ионными пучками He^+ и D_3^+ на сверхвысоковакуумной установке «Медион» без выноса образцов на атмосферу с целью исследования влияния вызываемых He изменений морфологии поверхности W на накопление дейтерия. Образцы W предварительно облучались ионами He с энергией 3 кэВ до доз 10^{19}–10^{22} м$^{-2}$, а затем проводилось ионное внедрение D посредством облучения пучком ионов D_3^+ с энергией 2 кэВ до дозы 3×10^{19} м$^{-2}$ с последующим линейным нагревом до температуры 873 K и термодесорбционной спектроскопией. Было выявлено, что предварительное облучение He снижает захват дейтерия в W даже при малых дозах облучения.

Список литературы

[1] Yu. Gasparyan, V. Efimov, K. Bystrov, Nuclear Fusion 56 (2016) 054002.
[2] M.J. Baldwin et. al., Journal of Nuclear Materials 415 (2011) S104–S107.
[3] M. Yajima et. al., Journal of Nuclear Materials 449 (2014) 9–14.
[4] S.A. Ryabtsev et. al., Physics of Atomic Nuclei 81 (2018).
[5] S. Ryabtsev et. al., to be published in Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 2019.
[6] Yu. Gasparyan et. al., in preparation.