

С.А. РЯБЦЕВ, Ю.М. ГАСПАРЯН, В.С. ЕФИМОВ, З.Р. АРУТЮНЯН,
А.В. КАЗИЕВ, М.М. ХАРЬКОВ, А.А. ПИСАРЕВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

НАКОПЛЕНИЕ ГЕЛИЯ В ВОЛЬФРАМЕ ПРИ ИОННОМ И ПЛАЗМЕННОМ ОБЛУЧЕНИИ

Внедрение гелия (He), продукта D–T реакции, в обращенные к плазме материалы термоядерных реакторов может существенным образом влиять на структуру их поверхностного слоя и на накопление изотопов водорода в этих материалах.

Гелий практически не растворим в металлах, теплота растворения He в вольфраме (W) составляет по разным данным 5–8 эВ [1, 2]. В объеме металла атомы He легко диффундируют по междоузлиям, но сильно связываются с дефектами кристаллической решетки. Эксперименты показывают, что значительная часть He может удерживаться в W даже при температурах выше 2000 К. С другой стороны, в недавних экспериментах с облучением He плазмой [3] было показано, что значительная часть He может выходить из W при очень малых температурах. Таким образом, гелий демонстрирует очень разное поведение в зависимости от параметров облучения, и многие особенности взаимодействия гелия с вольфрамом на данный момент не имеют объяснения. Кроме того, можно заключить, что для получения наиболее полной картины десорбции и накопления He в W, необходимо обеспечить достаточную точность измерений в широком диапазоне температур.

В данной работе исследования проводились методом термодесорбционной спектроскопии (ТДС) в широком диапазоне параметров облучения. Внедрение He в материал проводилось посредством ионного и плазменного облучения на двух различных установках. В качестве образцов использовалась W фольга толщиной 25 мкм. Часть образцов была предварительно отожжена при температуре 2000 К в течение 30 мин, однако исследовались также и неотожженные образцы. В первой экспериментальной серии образцы W облучались на установке МЕДИОН (НИЯУ МИФИ, Москва) масс-сепарированным пучком ионов He⁺ с энергией 3 кэВ до доз 10¹⁹–10²² He/м² при комнатной температуре. Во второй серии проводилось облучение неотожженных образцов W плазмой He с энергией 200 эВ при температурах 900 К и 1250 К на установке с ВЧ-плазменным разрядом. Облученные на обеих установках образцы переносились в установку ТДС-стенд, где проводился ТДС-анализ. Как было сказано выше, He может удерживаться в W даже при очень высоких температурах, поэтому

перед началом экспериментальной кампании система нагрева образцов ТДС-стенда была модифицирована, что позволило провести уникальные измерения с линейным нагревом образцов вплоть до 2500 К и получить на спектрах высокотемпературные пики десорбции He из W.

Внедрение He в W при малых дозах облучения исследовалось в экспериментах с облучением ионным пучком. Полученные спектры для предварительно отожженных образцов, облученных до различных доз в диапазоне 10^{19} – 10^{21} He/m² представлены на рис. 1 для образца, предварительно отожженного при 2000 К в течение 30 мин. В спектрах можно выделить три основные температурные зоны выхода He: I – низкотемпературный выход (до 1300 К), II – узкий пик, наблюдаемый на спектрах для неотожженных образцов при температурах в диапазоне 1300–1500 К, III – высокотемпературная часть ($T > 1600$ К), присутствующая, как правило, на спектрах для отожженного W.

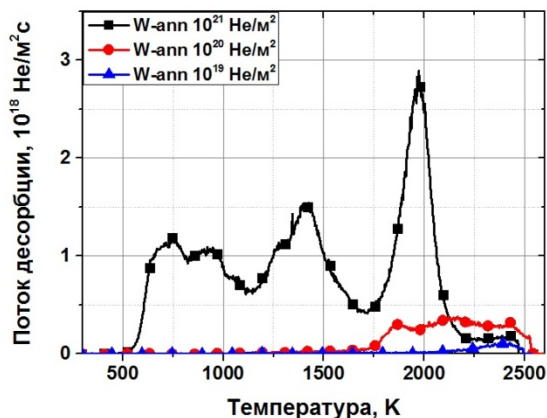


Рис. 1. ТДС-спектры выхода He из образцов W, отожженных при температуре 2000 К в течение 30 минут и облученных ионами с энергией 3 кэВ до доз 10^{19} – 10^{21} D/m².

По рис. 1 можно проследить некоторые характерные особенности трансформации спектров десорбции He из W при малых дозах облучения. В частности, видно, что при малых дозах облучения, He начинает покидать образец только при температурах свыше 1300 К, что соответствует большой энергии связи с дефектами. При увеличении дозы облучения на спектрах появляются низкотемпературные пики и десорбция начинается уже при температуре 500 К. Это свидетельствует о возникновении слабосвязанных состояний для гелия в поверхностном слое.

Облучение плазмой проводилось при существенно больших температурах, 900–1250 К. Несмотря на это, на спектрах наблюдаются те же низкотемпературные пики, что и в случае ионного облучения при комнатной температуре. Эта особенность поведения гелия в вольфраме, которая не наблюдалась в экспериментах с водородом, свидетельствует о перестроении гелия или самой структуры вольфрама при охлаждении.

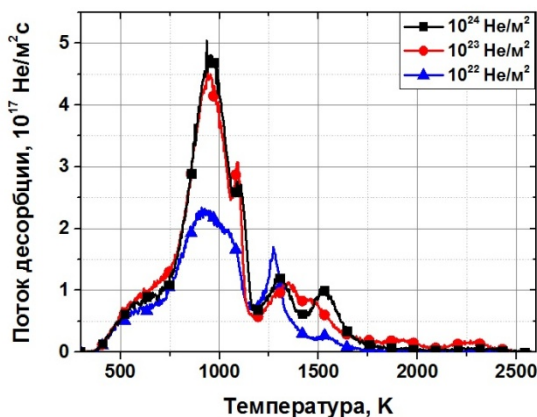


Рис. 2. ТДС-спектры выхода He из образцов W, облученных плазмой с энергией 200 эВ до доз 10^{22} – 10^{24} D/m².

Интегральное количество захваченного гелия, согласно данным термодесорбции, соответствует практически 100% захвату внедренных частиц при дозах облучения 10^{19} – 10^{20} He/m². При дальнейшем увеличении дозы наблюдается тенденция к насыщению (см. рис. 3).

Интегральное накопление гелия при плазменном облучении меньше, чем при ионном, что объясняется меньшей энергией внедряемых частиц. Кроме того, были использованы образцы без предварительного отжига, что дополнительно осложняло транспорт гелия в объем материала. Увеличение дозы облучения от 10^{22} до 10^{24} He/m² не привело к существенному увеличению накопления как при 900 К, так и при 1250 К, что свидетельствует об очень медленном распространении гелия вглубь образца. При дальнейшем увеличении дозы плазменного облучения при 1250 К происходит резкий скачок величины суммарного захвата. Это сопровождается появлением на поверхности, так называемого «вольфрамового пуха», что подтверждается данными электронной микроскопии и согласуется с наблюдениями в других работах [4, 5].

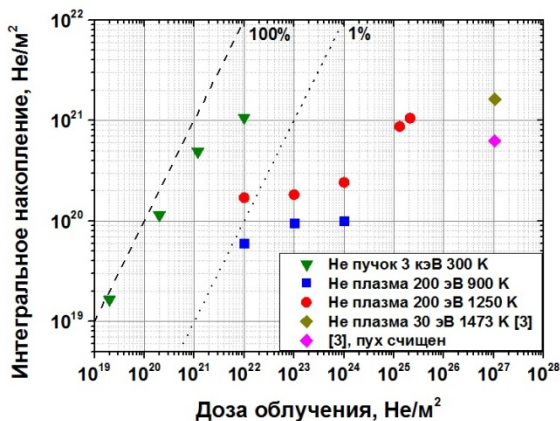


Рис. 3. Суммарное количество He, захваченного образцами W при ионном и плазменном облучении. Также приведены данные из работы [3] для образцов с «пухом», в одном случае «пучок» был счищен.

На рис. 3. приведены также данные из наших предыдущих экспериментов [3] при больших дозах облучения. В этих экспериментах анализировались, в том числе, образцы после удаления «пуха» с поверхности. Можно видеть, что большая часть гелия находится не в «пухе», а в поверхностном слое. Из этого можно сделать вывод о том, что резкое увеличение концентрации гелия в вольфраме вызвано трансформацией структуры самого слоя, которая уже далее инициирует рост пуха.

[1] H. Ullmaier, Nuclear Fusion, 24 (1984).

[2] C.S. Becquart, C. Domain, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 255 (2007) 23–26.

[3] Yu. Gasparyan, V. Efimov, K. Bystrov, Nuclear Fusion, 56 (2016) 054002.

[4] K.B. Woller, D.G. Whyte, G.M. Wright, Journal of Nuclear Materials, 463 (2015) 289–293.

[5] R.P. Doerner et. al., Nuclear Materials and Energy, 12 (2017) 372–378.