

Е.А. ФЕФЕЛОВА*, С.А. КРАТ, Ю.М. ГАСПАРЯН, В.С. ЕФИМОВ, М.М. ЗАРИПОВА, М.Г. ИСАЕНКОВА, А.А. ПИСАРЕВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
eafefelova@email.com

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСИ ГЕЛИЯ НА СВОЙСТВА СООСАЖДЕННЫХ ВОЛЬФРАМ-ДЕЙТЕРИЕВЫХ СЛОЁВ И УДЕРЖАНИЕ ДЕЙТЕРИЯ В НИХ

Накопление изотопов водорода в материалах реактора является одной из основных проблем на пути к коммерческому термоядерному реактору. В ИТЭР в качестве топлива будет использоваться дейтерий-тритиевая смесь; накопление радиоактивного трития в материалах стенки реактора представляет проблему с точки зрения радиационной безопасности. Одним из основных механизмов накопления изотопов водорода в реакторе является соосаждение с материалами обращенных к плазме элементов [1,2]. В ИТЭР в качестве материала наиболее нагруженной области первой стенки – дивертора, выбран вольфрам. Понимание процесса соосаждения изотопов водорода с этим металлом необходимо для количественной оценки удержания трития в ОПЭ.

На содержание водорода в соосаждённых слоях влияет наличие и состав примесей в водородной плазме. В дейтерий-тритиевой смеси результатом термоядерной реакции является образование гелия. В результате внедрения гелия в материалы первой стенки образуются дополнительные дефекты, которые могут быть заполнены водородом [3]. Можно предположить, что наличие гелия приведет к изменению накопления трития в соосажденных слоях из-за изменения морфологии поверхности. В экспериментах по соосаждению в Ar-D₂ было обнаружено влияние морфологии на накопление водорода [4]. Необходимо изучить влияние гелия на соосаждение трития с материалами стенки камеры для дальнейшей оценки удержания трития в материалах ИТЭР.

В рамках данной работы проводились серии экспериментов по соосаждению дейтерия с вольфрамом на экспериментальной установке МР-2 [5]. Примесь гелия в газовой смеси составляла 0, 5 и 20% от рабочего давления дейтерия (2,8 Па), осаждение проводилось методом магнетронного распыления для трёх температур 400 К, 500 К и 800 К. Полученные образцы исследовались методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) с использованием микроскопа модели Vega 3 Tescan. Все изображения были

получены в отражённых электронах. Образцы имели аморфный рельеф поверхности с единичными дефектами в виде трещин и пылинок, не превышающих размеры 20 мкм. В [6] при соосаждении вольфрама в чисто гелиевой плазме были обнаружены пузырьки размером до 20 нм. Пузырей размером ~ 1 мкм и более не обнаружено.

Также был проведен рентгеновский анализ фазового состава полученных вольфрамовых плёнок. Запись дифракционных спектров для определения фазового состава образцов и оценки их структурного состояния проводилась на дифрактометре Bruker D8 Discover при использовании $\text{Cu K}\alpha$ излучения и позиционно-чувствительного детектора LynxEye. Покрытия преимущественно имеют ОЦК-решетку, мелкодисперсны и имеют постоянную решетки от 3,1757 до 3,2051 Å для разных плёнок, в то время как для монокристаллического вольфрама постоянная решетки равна 3,160 Å. Большая постоянная решетки может быть объяснена большим количеством атомов газа в соосажденной плёнке.

Ранее проведенные эксперименты по влиянию гелия на накопление дейтерия в соосажденных вольфрамовых слоях показали, что присутствие значительного количества гелия в целом подавляет накопление дейтерия в плёнке, а незначительная добавка в газовую смесь почти не влияет на накопление дейтерия в плёнке. Это может быть объяснено тем, что гелий и дейтерий конкурируют за одни и те же дефекты с определенными энергиями связи (типы ловушек).

Список использованных источников

- [1] Roth J. и др. Tritium inventory in ITER plasma-facing materials and tritium removal procedures // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2008. Т. 50, № 10. С. 103001.
- [2] Widdowson A. и др. Overview of fuel inventory in JET with the ITER-like wall // *Nucl. Fusion*. IOP Publishing, 2017. Т. 57, № 8.
- [3] Bernard E. и др. Tritium retention in W plasma-facing materials: Impact of the material structure and helium irradiation // *Nucl. Mater. Energy*. Elsevier, 2019. Т. 19, № August 2018. С. 403–410.
- [4] Alimov V.K. и др. Temperature dependence of surface morphology and deuterium retention in polycrystalline ITER-grade tungsten exposed to low-energy, high-flux D plasma // *J. Nucl. Mater.* Elsevier B.V., 2012. Т. 420, № 1–3. С. 519–524.
- [5] Krat S.A. и др. A setup for study of co-deposited films // *J. Instrum.* 2020. Т. 15, № 1.
- [6] Katayama K. и др. Deuterium and Helium Release and Microstructure of Tungsten Deposition Layers Formed by RF Plasma Sputtering DEUTERIUM AND HELIUM RELEASE AND MICROSTRUCTURE OF TUNGSTEN DEPOSITION LAYERS. 2017. Т. 1055.