

Н.С. СЕРГЕЕВ^{1,2}, И.А. СОРОКИН^{1,3}, Ф.С. ПОДОЛЯКО¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

³Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Россия, 141190, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЫ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА

Интенсивное плазменное воздействие на поверхность тугоплавких металлов, таких как вольфрам, позволяет создавать развитые высокопористые структуры на поверхности. Предлагаются различные способы применения подобных структур, в частности, в качестве облицовочных материалов для нужд термоядерной энергетики [1].

Как правило исследование условий формирования подобных структур на поверхности металлов под действием плазмы проводится в линейных плазменных симуляторах типа PIECES-B, PILOT-PSI [2] или ВЧ генераторах плазмы [3]. Указанные источники плазмы имеют ряд недостатков, таких как низкая энергоэффективность (в случае дуговых источников в линейных симуляторах) или относительно высокое рабочее давление (в случае ВЧ). Использование пучково-плазменного разряда (ППР) с ионизацией рабочего газа с помощью мощного электронного пучка [4] и развитием двухпотоковой неустойчивости, значительно увеличивает энергоэффективность ионизации рабочего газа. Это позволяет изучать процессы происходящие при взаимодействии плазмы с поверхностью в широком диапазоне параметров плазмы. Также, наличие электронной пушки дает возможность имитировать мощные тепловые нагрузки на поверхность. Однако наличие высокоэнергетичных электронов в плазме ППР приводит к ограничениям по применимости данного типа разряда.

В работе проводилось исследование режимов ионно-плазменной обработки поверхности. Исследуются условия формирования развитой поверхности вольфрама под действием гелиевой плазмы ППР. На рисунке 1 представлена фотография и пример изображения поперечного сечения облученной вольфрамовой фольги (50 мкм) полученного с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ).

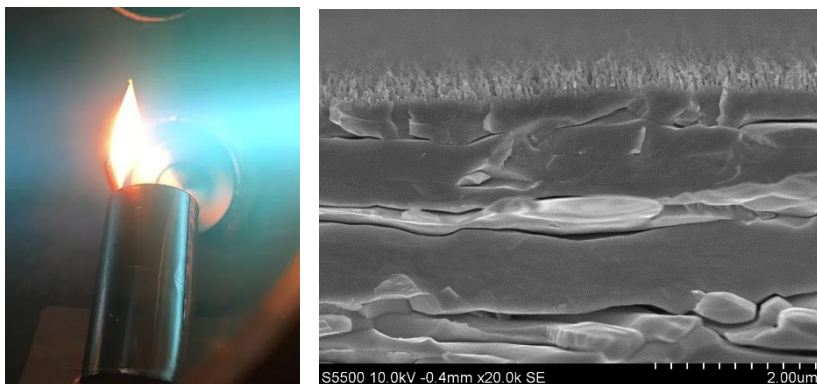


Рисунок 1. Фотография образца из W в процессе экспонирования в плазме ППР (слева), СЭМ-изображение модифицированной поверхности (справа).

Определены параметры для достижения требуемых условий возникновения исследуемого типа модификации поверхности [5-6]. Необходимые температурные условия достигались изменением положения образца относительно области максимальной плотности плазмы ППР. Основные параметры плазмы контролировались с помощью подвижного одиночного зонда Ленгмюра. Плотность ионного потока на поверхность образца оценивалась по показаниям ионного тока насыщения на зонд в соответствующем ему положении образца.

Отработаны режимы ППР, обеспечивающие ионный поток гелия до 10^{21} м^{-2} при вкладываемой мощности разряда – 300 Вт. Показано значительное влияние наличия высокоэнергетичной электронной компоненты на характер поверхностной модификации.

- [1] Pablo Díaz-Rodríguez et al. Highly porous tungsten for plasma-facing applications in nuclear fusion power plants: a computational analysis of hollow nanoparticles // 2020 Nucl. Fusion 60 096017
- [2] L. Buzi et al. Response of tungsten surfaces to helium and hydrogen plasma exposure under ITER relevant steady state and repetitive transient conditions // 2017 Nucl. Fusion 57 126009
- [3] Kharkov M.M et al. Effects of Ar ion irradiation in an ICP discharge on the titanium surface topology // Applied Surface Science, 2020, 527, 146902
- [4] Isaev N.V. et al. A plasmachemical reactor based on a beam-plasma discharge // Instruments and Experimental Techniques. 2014. Т. 57. № 1. С. 82
- [5] M. Miyamoto et al. In situ transmission electron microscope observation of the

formation of fuzzy structures on tungsten // *Physica Scripta*. 2014. T159. – 014028.

[6] K.B. Woller et al. Dynamic measurement of the helium concentration of evolving tungsten nanostructures using Elastic Recoil Detection during plasma exposure // *Journal of Nuclear Materials*. 2015. Vol. 463. pp. 289-293.

[7] M. Miyamoto et al. Systematic investigation of the formation behavior of helium bubbles in tungsten // *Journal of Nuclear Materials*. 2015. Vol. 463. - pp. 333-336.