

А.М. ДМИТРИЕВ^{1,2,4*}, А.Г. РАЗДОБАРИН¹, Л.А. СНИГИРЕВ¹, Д.И.ЕЛЕЦ^{1,4},
И.М. БУКРЕЕВ¹, А.П. ЧЕРНАКОВ^{1,2}, Е.Е. МУХИН¹, С.Ю. ТОЛСТЯКОВ¹,
И.Б. КУПРИЯНОВ³, В.Л. БУХОВЕЦ⁵, А.Е. ГОРОДЕЦКИЙ⁵, А.В.

МАРКИН⁵, Р.Х. ЗАЛАВУТДИНОВ⁵

¹ФГБУН ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

²АО «Спектрал-Тех», Санкт-Петербург

³АО «ВНИИНМ им. А.А. Бочвара», Москва

⁴Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

⁵ФГБУН ИФХЭ им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва

*artem.dmitriev@mail.ioffe.com

МАГНЕТРОННОЕ ОСАЖДЕНИЕ БЕРИЛЛИЯ И ЦИКЛИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ОКОН В ПЛАЗМЕ ВЧ РАЗРЯДА

Обращенные к плазме первые зеркала и защитные окна оптических диагностик токамака-реактора ITER и стойкость их параметров при длительной эксплуатации находятся в центре внимания обширной программы исследований [1], включающей лабораторные исследования и испытания в работающих токамаках. Осаждение материалов, состоящих из продуктов эрозии материалов первой стенки (в основном – бериллий и вольфрам) и окружающих элементов конструкции может оказать существенное влияние на параметры оптических компонентов, расположенных вблизи первой стенки. Ввиду ограниченного доступа к обращенным к плазме оптическим элементам необходима in-situ система восстановления их оптических характеристик. Система плазменной очистки, основанная на емкостном высокочастотном разряде, в котором очищаемое зеркало или окно играет роль нагруженного электрода, показала свою эффективность для удаления пленок углеводородов, металлов и их оксидов [2-6] и предлагается для использования в ITER [1]. Принцип работы системы плазменной очистки основан на физическом и/или химическом распылении загрязняющих осадений потоком ионов, формируемых в приэлектродном слое ВЧ разряда. Продолжительная ионная бомбардировка, однако, может привести к повреждению поверхности очищаемого элемента. В связи с этим существует необходимость реализации системы контроля процесса очистки с обратной связью, предоставляющей информацию о состоянии разряда и параметрах оптической поверхности.

По причине высокой токсичности бериллия большинство исследований процесса плазменной очистки зеркал проводилось с использованием модельных осадений: Al, Al₂O₃, Au и т.д. Изучение взаимодействия бериллийсодержащих пленок с поверхностью оптических элементов и

процесса их распыления имеет, тем не менее, определяющее значение для верификации эффективности системы плазменной очистки. В докладе представлены результаты циклических экспериментов по осаждению бериллийсодержащих пленок и их распылению с поверхности перспективных материалов защитных окон и первого зеркала диагностики томсоновского рассеяния в диверторе токамака ИТЕР. В качестве таких материалов использовались окна из плавленного кварца, монокристаллического сапфира, боросиликатного стекла, а также зеркала из монокристаллического молибдена. Формирование бериллийсодержащих пленок осуществлялось при помощи ВЧ магнетрона, работающего на частоте 13,56 МГц. Бериллиевая мишень была изготовлена из российской марки бериллия ТГП-56ПС, одобренной для применению в ИТЭР. Полученные пленки бериллия были охарактеризованы при помощи сканирующей электронной микроскопии (SEM), энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX), рентгеновская фотоэлектронной спектроскопии (XPS) и др. In-situ плазменная очистка осуществлялась при помощи ВЧ емкостного разряда с частотой 81 МГц в гелии при давлении 2 Па. Процесс очистки контролировался путем мониторинга интенсивности отражения лазерного излучения на длине волны 532 нм от поверхности кварцевого образца. Оптические характеристики образцов контролировались в промежутках между циклами осаждения/удаления и по завершению экспериментальной кампании. Всего было совершено 15 циклов осаждения и очистки. По итогам экспериментальной кампании обсуждается эффективность плазменной очистки и стойкость материалов зеркал и окон.

Список использованных источников

- [1] P. Shigin et al., *Fus. Eng. Des.* 146 (2021), 112162
- [2] A.E. Gorodetskii et al., *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.* 47, 540 (2011)
- [3] E.E. Mukhin et al., *J. Nucl. Fusion* 52 (2012) 013017
- [4] A.G. Razdobarin et al., *J. Nucl. Fusion* 55 (2015) 093022
- [5] L. Moser et al., *J. Nucl. Fusion* 55 (2015) 063020
- [6] A.M. Dmitriev et al., *Fusion Eng. Des.* 146 Part A (2019) 1390-1393