

А.М. ДМИТРИЕВ<sup>1,2\*</sup>, А.Г. РАЗДОБАРИН<sup>1</sup>, Л.А. СНИГИРЕВ<sup>1</sup>, Д.И.ЕЛЕЦ<sup>1,4</sup>,  
О. С. МЕДВЕДЕВ<sup>1,2,4</sup>, И.М. БУКРЕЕВ<sup>1</sup>, А.П. ЧЕРНАКОВ<sup>1,2</sup>, Е.Е. МУХИН<sup>1</sup>,  
С.Ю. ТОЛСТЯКОВ<sup>1</sup>, И.Б. КУПРИЯНОВ<sup>3</sup>, В.Л. БУХОВЕЦ<sup>5</sup>, А.Е.

ГОРОДЕЦКИЙ<sup>5</sup>, А.В. МАРКИН<sup>5</sup>, Р.Х. ЗАЛАВУТДИНОВ<sup>5</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>АО «Спектрал-Тех», Санкт-Петербург

<sup>3</sup>АО «ВНИИНМ им. А.А. Бочвара», Москва

<sup>4</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

<sup>5</sup>ФГБУН ИФХЭ им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва

\*artem.dmitriev@mail.ioffe.com

## МАГНЕТРОННОЕ ОСАЖДЕНИЕ БЕРИЛЛИЯ И ЦИКЛИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА МАТЕРИАЛОВ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ОКОН

Бериллий является перспективным материалом первой стенки перспективных термоядерных установок, таких как ИТЭР и ТРТ [1]. Площадь бериллиевой облицовки в ИТЭР составляет около 680 м<sup>2</sup>. На облицовку будут воздействовать высокие тепловые нагрузки, транзитные плазменные нагрузки (ELM-ы, срывы плазмы), а также высокие потоки ионизирующего излучения [2]. Комбинация данных нагрузок будет приводить к деградации поверхности и структуры бериллиевой облицовки, переосаждению приповерхностных слоев и накоплению в переосажденных слоях термоядерного топлива [3]. Осаждение материалов, состоящих из продуктов эрозии материалов первой стенки (в основном – бериллий и вольфрам может оказать существенное влияние на параметры оптических компонентов, расположенных вблизи первой стенки. По причине высокой токсичности бериллия значительное количество исследований по накоплению изотопов водорода и влиянию осадений на параметры обращенных к плазме оптических компонентов проводятся с использованием модельных материалов [4, 5]. Тем не менее, несомненно, важной является возможность проведения лабораторных исследований бериллийсодержащих пленочных осадений и их взаимодействия с другими материалами внутривакуумных компонентов токамаков ИТЭР и ТРТ.

Для решения этой задачи на базе ВНИИНМ им. А.А. Бочвара была создана установка, позволяющая проводить осаждение бериллийсодержащих пленок методом магнетронного осаждения. Формирование бериллийсодержащих пленок осуществляется при помощи ВЧ магнетрона, работающего на частоте 13,56 МГц. Бериллиевая мишень была изготовлена из российской марки бериллия ТГП-56ПС, одобренной для применения в токамаке ИТЭР.

Полученные пленки бериллия были охарактеризованы при помощи сканирующей электронной микроскопии (SEM), энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX), рентгеновская фотоэлектронной спектроскопии (XPS) и других методов исследования поверхности. Представлены основные результаты циклических экспериментов по осаждению бериллийсодержащих пленок и их удалению с поверхности перспективных материалов защитных окон и первого зеркала диагностики томсоновского рассеяния в диверторе токамака ITER. В качестве таких материалов использовались окна из плавленого кварца, монокристаллического сапфира, боросиликатного стекла, а также зеркала из монокристаллического молибдена. Для удаления бериллийсодержащих осадений использовалось два метода – плазменная и лазерная очистка. In-situ плазменная очистка осуществлялась при помощи ВЧ емкостного разряда с частотой 81 МГц в гелии при давлении 2 Па. In-situ лазерная очистка осуществлялась при помощи Nd:YAG лазера с длительностью импульса 12 нс, энергией в импульсе 0,2 Дж и частотой следования импульсов 100 Гц. Процесс напыления и чистки 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. По итогам экспериментальной кампании обсуждается эффективность плазменной и лазерной очистки, стойкость материалов зеркал и окон, а также возможность применения данной установки для формирования модельных образцов для отработки диагностики состояния первой стенки токамака и накопления изотопов водорода в переосажденных слоях.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда 22-12-00360, <https://rscf.ru/project/22-12-00360/>

## Литература

- [1] I.B. Kupriyanov et al., *Fus. Eng. Des.* 124 (2017), 1004-1010
- [2] R. Mitteau et al., *Fus. Eng. Des.* 85 (2010), 2049-2053
- [3] А.Г. Раздобарин и др., *Физика плазмы* т.48, №12 (2022), 1216-1232
- [4] A.M. Dmitriev et al., *Nucl. Mater. & Energy* 30(1) (2022): 101111
- [5] A.G. Razdobarin et al., *J. Nucl. Fusion* 55 (2015) 093022