

И.А. СОРОКИН<sup>1</sup>, А.А. ЕКСАЕВА<sup>1,2</sup>, Е.Д. МАРЕНКОВ<sup>1</sup>, К.М. ГУТОРОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

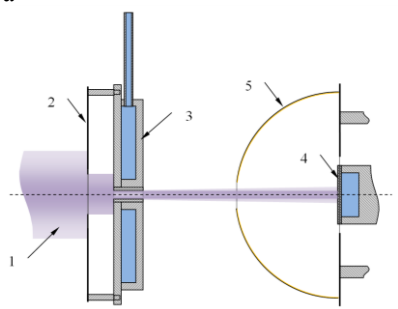
<sup>2</sup>Научно-Исследовательский центр Юлих, Юлих, Германия

## **УГЛОВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АТОМОВ ВОЛЬФРАМА, РАСПЫЛЕННЫХ В УСЛОВИЯХ ДИВЕРТОРНОЙ ПЛАЗМЫ ТОКАКА ИТЕР**

Одним из конструктивных элементов токамака ИТЕР является дивертор, предназначенный для ограничения контакта плазмы со стенкой и снижения нагрузок на нее. В качестве материала дивертора был выбран вольфрам благодаря низкому распылению, высокой температуре плавления и малому удержанию трития [1]. Однако, вследствие большой атомной массы вольфрама, даже небольшое его количество, попавшее в область центральной плазмы, может привести к значительным потерям энергии на излучение. Транспорт распыленного вольфрама в большой степени определяется угловыми распределениями распыленных атомов в момент распыления. На сегодняшний день данных о таких распределениях для низких энергий налетающих ионов 50÷300 эВ в литературе очень мало. В предыдущих экспериментальных исследованиях было показано, что в области энергий налетающих ионов 50÷300 эВ угловое распределение имеет вид «бабочки» с максимальной интенсивностью распыления в угол  $< \pi/2$  [2]. Было также показано, что направление максимального распыления меняется в зависимости от точного значения энергий бомбардирующих частиц. Частично вид этих распределений был предсказан при помощи моделирования экспериментов на линейной плазменной установке PSI-2 в коде ERO [3].

В настоящей работе представлены результаты экспериментов по изучению формы распределения по углу вылета распыленных атомов вольфрама. Распыление проводилось ионами аргона для диапазона энергий 50÷300 эВ на линейном симуляторе пристеночной плазмы ТЯУ ПР-2 (НИЯУ МИФИ) [4] в режиме пучково-плазменного разряда. Схема эксперимента и общий вид коллекторной системы представлены на рисунке 1. Распыляемый вольфрамовый образец (4) был установлен в торце установки и охлаждался водой. Распылению подвергалась центральная часть образца, периферия была экранирована от попадания плазмы с помощью системы диафрагм (2, 3). Размер области распыления составил  $\sim 3$  см<sup>2</sup>. Непосредственно вокруг распыляемого образца была установлена коллекторная система в виде дуг полусферы с отверстием для ввода пучка плазмы (5), на сменные медные пластины которой происходит осаждение распыленного материала. Давление остаточного газа в камере составляло  $10^{-4}$  Па, рабочее давление - 0.1 Па.

а



б

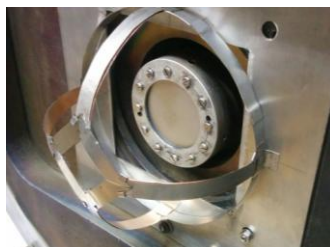


Рис. 1. Схема эксперимента (а) и внешний вид коллекторной системы (б); 1 - плазменный шнур, 2 - диафрагма периферии разряда ( $\varnothing$  40 мм), 3 - водоохлаждаемая диафрагма ( $\varnothing$  10 мм), 4 - распыляемый образец, 5 - система сбора распыленного материала.

Энергия распыляющих ионов определялась потенциалом смещения образца. Состав ионного потока контролировался с помощью встроенного масс-анализатора. Величина ионного потока определялась током на образец и во всех экспериментах составляла  $\sim 10^{20} \text{ с}^{-1} \text{ м}^{-2}$ .

Определение толщины осажденных слоев вольфрама на поверхности медных образцов оценивалась с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии по относительному процентному содержанию вольфрама при одинаковой энергии электронного пучка растрового электронного микроскопа. Необходимая доза облучения распыляемого образца была рассчитана по известным значениям коэффициента распыления и минимальной границей чувствительности выбранного метода анализа осаждаемых слоев ( $\sim 100 \text{ нм}$ ) во всем доступном для анализа диапазоне углов распыления (от  $5$  до  $72^\circ$ ).

Полученная в ходе экспериментов форма угловых распределений качественно совпадает с имеющимися литературными данными и предсказаниями моделирования при помощи кода ERO. Для уточнения модельных представлений о форме углового распределения вольфрама в заявленном диапазоне энергий необходимо провести аналогичные эксперименты для других сортов ионов (неон, гелий, водород).

### Список литературы:

- [1] Pitts R. A. et al. Journal of Nuclear Materials (2013)
- [2] D. Nishijima, et al. Journal of Nuclear Materials (2011).
- [3] E. Marenkov, et al. Journal of Nuclear Materials (2015).
- [4] Gutorov K.M. et al. // J. Surf. Investig. 2016. Vol. 10, № 3. P. 612–616.