Н.Н. БУТРОВА*, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, С.С. ДОВГАНЮК,
М.А. КРАПИВИН
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
**nnbutrova@mephi.ru*

ОСОБЕННОСТИ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ СЛОЁВ НА ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМА, СФОРМИРОВАННЫХ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ ПЛАЗМЫ

Для Международного Термоядерного Экспериментального Реактора (ИТЭР) [1-3] и на первом этапе для Токамака с Реакторными Технологиями (ТРТ) [4] в качестве контактирующих с плазмой материалов выбраны бериллий и вольфрам. В процессе работы реакторов распыленные плазмой атомы поверхности бериллиевой первой стенки будут осаждаться, в частности, на вольфрамовом диверторе, формируя на его поверхности покрытие, содержащее Be. Свойства образующихся слоев, взаимодействие их с плазмой и последующее влияние на параметры плазмы недостаточно изучены. Представленная работа посвящена имеющему научную значимость и чрезвычайно актуальному в настоящее время исследованию свойств поверхностных слоёв, содержащих бериллий.

Соединения бериллия являются высокотоксичными материалами [5], работа с которыми не допускается в условиях университетской лаборатории. Вместе с тем, физико-химические свойства бериллия и алюминия во многом сходны [6]. В частности, в работах [7, 8] было обнаружено сходство закономерностей удержания водорода в слоях, образующихся при осаждении атомов алюминия и бериллия на вольфрам. Поэтому для проведения экспериментов был выбран алюминий в качестве ближайшего химического аналога бериллия.

В представляемой работе проведено исследование особенностей формирования W-Al слоев при осаждении атомов алюминия на вольфрам и характера их трансформации при термическом воздействии, а также исследование образования поверхностных слоёв на вольфраме при ассистированном ионным облучением напылении атомов алюминия.

В работе показано, что осаждение до 9×10^{18} ат/см^2 атомов алюминия, распыленных в аргоновой плазме, не привело к образованию слоя алюминия на вольфрамовой подложке при температуре подложки 450–500 K. Между тем, алюминий проникал в вольфрам на глубину не менее 260 мкм. Получено доказательство образования, из-за диффузии атомов Al в W в процессе

осаждения, интерметаллидного слоя $Al_{12}W$, захватывающего аргон и водород остаточного газа. Также были обнаружены кристаллы вольфрама, различающиеся как по структуре, так и по содержанию алюминия - «разрушенные» кристаллы и кристаллы с градиентным содержанием алюминия.

При нагреве до 900 К поверхностный бериллийсодержащий слой образцов слабо изменялся. Рекристаллизация интерметаллида с образованием структуры, по-видимому, состава Al_5W происходила при температуре 1020 К и сопровождалась интенсивной кратковременной десорбцией аргона, захваченного во время напыления алюминия.

В диапазоне температур 1300–1500 К происходил распад интерметаллида с выделением захваченного водорода, алюминия и оставшегося аргона. Концентрация алюминия в приповерхностной области, упала в среднем до 2 ат. %. Около 47 % атомов алюминия испарялось с поверхности. Не более 10 % сохранившегося в вольфраме алюминия находилось в приповерхностной области, а оставшиеся 43 % — в объёме образца.

Облучение поверхности вольфрама ионами аргона в процессе осаждения инициировало диффузию атомов алюминия в глубину вольфрама вне зависимости от энергии облучения (50 и 650 эВ) и плотности тока ионов (1,5 и 3 мА/см^2). При этом во всех случаях на поверхности не образовывался интерметаллидный алюминий-вольфрамовый слой, в отличие от экспериментов по осаждению атомов Al на W без ассистирования ионным облучением.

При ионном ассистировании осаждения с энергией 50 эВ только часть напыляемого алюминия проникает в вольфрам, остальное под действием облучения ионами аргона распыляется. Причем при плотности тока 1,5 мА/см^2 проникает 20 % осаждаемых атомов, а при 3 мА/см^2 – 56 %. Большая часть алюминия содержится в поверхностном слое толщиной 800 нм в виде раствора с концентрацией ≈ 15 ат. %. При ассистировании напыления ионами с энергий 650 эВ происходило преимущественно распыление вольфрамового образца. При этом алюминий обнаруживался в межзёренных областях в виде раствора с концентрацией 2 ат. %.

Литература

[1] Loarte A., Lipschultz B., Kukushkin A.S., et al. // Nucl. Fus. 2007, Vol. 47. P. S203

[2] Rieth M., Armstrong D., Dafferner B., et al. // Adv. Sci. Technol. 2010. Vol. 73. P. 11-21

[3] Rieth M., Dudarev S.L., de Vicente S.M.G., et al. // J. Nucl. Mater. 2013. Vol. 432. P. 482-500

[4] И. В. Мазуль, Р. Н. Гиниятулина, А. А. Кавина и др. Обращенные к плазме компоненты токамака TRT // Физика плазмы. - 2021 г. - Т.47. – Н.12. – С.1103-1122.

[5] Новоселова А.В., Бацанова Л.Р. Аналитическая химия бериллия. - М.: Наука., 1966. - 226 с

[6] Marot L., Linsmeier C., Erena B., Moser L. et al. // Fusion Engineering and Design 2013

[7] Kaplevsky A., Begrambekov L., Evsin A., Dovganyuk S. // XXI Conference "Plasma-Surface Interaction", January 24 - 25, 2018, MEPhI

[8] Begrambekov L., Kaplevsky A., Dovganyuk S., Kasimova N. Thermal desorption study of hydrogen isotopes trapping and its diffusion in tungsten coated with aluminum/beryllium layer during plasma irradiation // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. Vol. 1396