

М.В. ГРИШАЕВ^{1,2*}, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ¹, Ю.М. ГАСПАРЯН^{1,3},
А.С. МОСЯКОВА¹, Н.Е. ЕФИМОВ^{1,4}, И.А. НИКИТИН¹

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

² Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург

³ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований (ГНЦ РФ ТРИНИТИ), Москва

⁴ Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии "Росатом" "Проектный центр ИТЭР", Москва

*MVGrishaev@mephi.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ОПЭ НА ОСНОВЕ ЖИДКОГО ЛИТИЯ

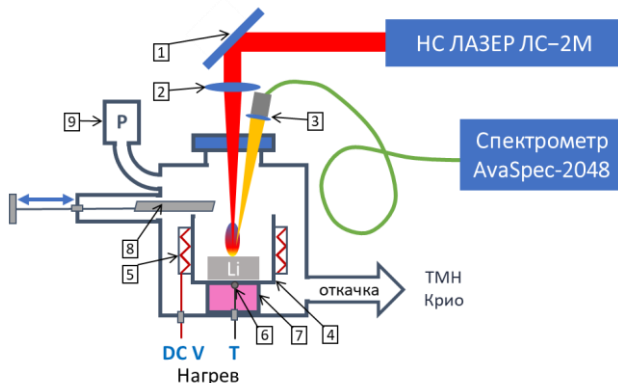
Выбор оптимальных материалов для обращённых к плазме элементов (ОПЭ) первой стенки остаётся ключевой задачей в проектировании термоядерных установок (ТЯУ). Наряду с разработкой новых материалов, значительное внимание уделяется технологиям защитных и возобновляемых покрытий. Одним из наиболее перспективных подходов является применение систем на основе жидкого лития [1].

Химическая активность лития, как щелочного металла, приводит к его интенсивному взаимодействию как с газами-примесями (O_2 , N_2 , H_2 , CO/CO_2), так и с загрязнениями контактирующих с литиевой поверхностью. Ключевой проблемой, возникающей в результате этого, является образование тугоплавких соединений (оксидов, нитридов, гидридов) с выделением твердой фазы [2].

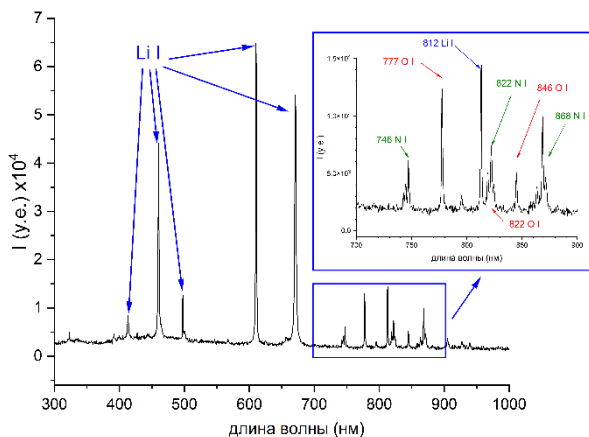
Данная работа посвящена исследованию влияния термического воздействия на состав поверхности лития. Анализ производился *in situ* методом лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии (ЛИЭС, LIBS), реализованной на установке для Лазерного Анализа Поверхности при Термических Испытаниях (ЛАПТИ). Схема установки представлена на рисунке 1. Экспериментальные параметры лазерного воздействия: энергия импульса – 56 мДж, радиус пятна на мишени - 0.75-3 мм, длительность импульса - 12 нс. Это обеспечивало энергетическую плотность (флюенс) $F = 0.1-2.4$ Дж/см² ($P = 10^{11}-10^{12}$ Вт/м²).

Для корректной интерпретации результатов был проанализирован оптический спектр. Из-за высокой интенсивности лития по сравнению с примесными атомами и склонности части интенсивных линий к самопоглощению в контексте контроля содержания кислорода и азота

наиболее перспективным представляется анализ спектрального диапазона 740–870 нм (рис.2). В качестве аналитических выбраны линии лития 812.6 нм и кислорода 777.2–777.5 нм.



- 1 – лазерное зеркало; 2 – фокусирующая линза ($f = 20$ см);
 3 – коллиматорная линза; 4 – тигель; 5 – нагреватель;
 6 – термопара ХА; 7 – керамическая подставка; 8 – заслонка;
 9 – вакуумметр (Pfeiffer PKR 251)
 Рисунок 1 – Схема установки ЛАПТИ



синий – литий; красный – кислород; зеленый – азот

Рисунок 2 – Идентификация линий элементов в обзорном спектре лития при атмосферном давлении

Исследовались образцы, предварительно окисленные в ходе переноса по атмосфере (кратковременное (3–5 мин) воздействие атмосферного воздуха 1атм). Для работы с чистым литием предусмотрена процедура вакуумной очистки.

Было обнаружено, что нагрев до максимальной для данных экспериментальных условий температуры 420 °С не приводил к полному исчезновению сигнала кислорода с поверхности, подвергнутой атмосферному воздействию. Это свидетельствует о формировании термически стабильных при такой температуре лития оксидных плёнок, не удаляемых путём испарения или растворения в объёме в данных условиях.

На очищенной поверхности (прогрев + механическая очистка), остывающей в вакууме $\sim 4 \times 10^{-6}$ мбар, сигнал кислорода фиксируется только после полной кристаллизации (рис 3 - б). Толщина кислородсодержащего слоя, оценённая по порогу его обнаружения при последовательных лазерных импульсах, не превышает глубину кратера от одиночного импульса (~ 350 нм, согласно моделированию). Для удаления таких тонких плёнок эффективно воздействие, приводящее к фрагментации и перемешиванию.

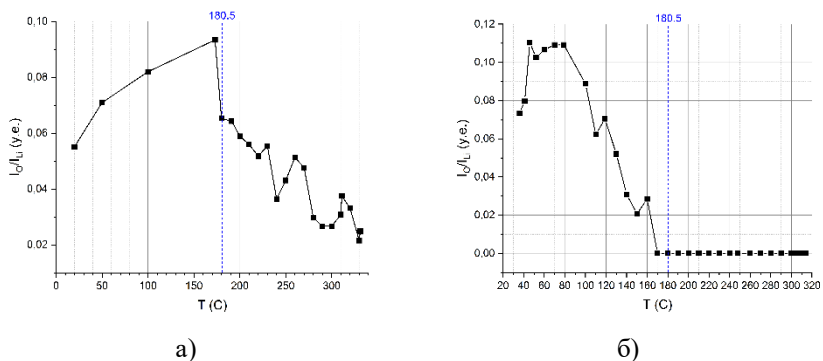


Рисунок 3 Изменение отношения сигналов линии кислорода (777,5 нм) к линии лития (812,6 нм) в ходе нагрева а) и остывания б) чистой поверхности лития при давлении 4×10^{-6} мбар

Полученные данные показывают, что для очистки поверхности лития

недостаточно одной вакуумной термообработки. Требуется прямое физическое удаление оксидной фазы (механическое, лазерное) или её диспергирование в объёме. При этом в условиях экспериментального вакуума ($\sim 10^{-6}$ мбар) неизбежно происходит быстрое (минуты) формирование тонких (≤ 1 мкм) оксидных плёнок на очищенной поверхности в процессе её остывания, что необходимо учитывать при планировании операций с активным литием.

Работа была выполнена при поддержке министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSWU-2024-0001)

Литература

[1] Nygren R.E., Tabarés F.L. Liquid surfaces for fusion plasma facing components—A critical review. Part I: Physics and PSI // Nuclear Materials and Energy, 2016, Т. 9, Liquid surfaces for fusion plasma facing components—A critical review. Part I, С. 6-21.

[2] Люблинский И.Е., Вертков А.В., Евтихин В.А. Физико-химические основы использования лития в жидкометаллических системах термоядерного реактора: Термоядерный синтез // Вопросы атомной науки и техники, 2007, № 4, С. 13-44.