

С.А. КРАТ^{1*}, Д.А. БУТНЯКОВ¹, А.С. ПРИШВИЦЫН¹, Н.Е. ЕФИМОВ¹,
Ю.М. ГАСПАРЯН¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²ФГУП ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

*sokrat@mephi.ru

ЗАВИСИМОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ ДЕЙТЕРИЯ В СООСАЖДЁННЫХ ЛИТИЕВЫХ СЛОЯХ ОТ ПОТЕНЦИАЛА СМЕЩЕНИЯ ПОДЛОЖКИ ВО ВРЕМЯ ОСАЖДЕНИЯ

Накопление водорода в осаждённых из плазмы слоях лития – потенциальная угроза для реализации концепции жидкометаллических обращённых к плазме элементов в термоядерных установках, так как в результате такого накопления может происходить выпадение твёрдых фаз, например гидридов, в жидком литии, а также будет осуществляться накопление радиоактивного трития.

Как известно, содержание, механизмы удержания водорода в соосаждённых слоях, свойства получаемых слоёв сильно зависят от условий осаждения, таких как температура подложки и характерная энергия частиц водорода, внедряемых в растущую плёнку.

В ходе работы было проведено исследование влияния напряжения смещения подложки, иными словами характерных энергий имплантируемого в растущую плёнку ионов дейтерия, на содержание и характер накопления дейтерия в литий-дейтериевых соосаждённых плёнках. Для этого плёнки были получены в установке МР-2 [1] методом магнетронного распыления капиллярно-пористой мишени дейтериевой плазмой при рабочем давлении ~5 Па. Температура подложки (поликристаллического отожжённого вольфрама) варьировалась от ~ 350 К до ~ 700 К с шагом ~100 К. К подложке прикладывались потенциалы -500 В, -250 В, +5 В (для экранировки положительных ионов). Толщина осаждённых плёнок колебалась от ~ 100 нм до ~ 1 мкм. Анализ содержания дейтерия в плёнках производится при помощи in-vacuo термодесорбционной спектрометрии (ТДС) с нагревом образца до 1200 К. Во время процедуры ТДС также измерялась скорость испарения материала с поверхности образца [1] для того, а по завершении анализа определялось полное количество испарённого материала для контроля эффективности осаждения плёнки (сбора лития) на подложке в заданных условиях.

Было установлено (рисунок 1), что эффективность сбора лития на вольфрамовую подложку при положительном смещении подложки и при

плавающем потенциале определялись скоростью испарения металлического лития, а при подаче смещения -500 В эффективность осаждения лития была существенно ниже, ~ 50 %. Такое снижение эффективности не может быть объяснено механизмами физического распыления или отражения ионов лития от поверхности, исходя из литературных данных о коэффициентах распыления $\text{Li} \rightarrow \text{Li}$, $\text{D} \rightarrow \text{Li}$ и о коэффициенте отражения ионов лития от литиевой или вольфрамовой поверхности [2].

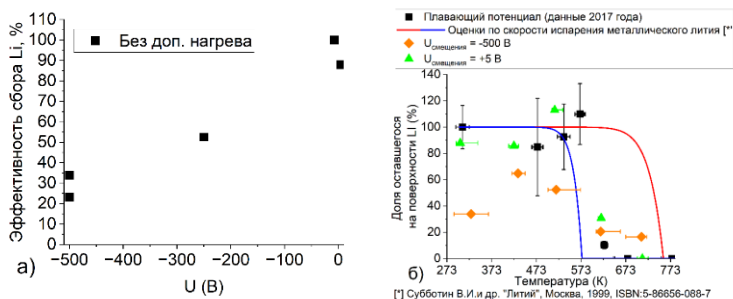


Рисунок 1 - Зависимости эффективности сбора лития на подложку от а) напряжения смещения подложки во время осаждения при экспериментах без доп. подогрева подложки, б) от температуры подложки для серий экспериментов с плавающим потенциалом подложки (чёрные квадраты [3]), смещением подложки -500 В (оранжевые ромбы) и смещением подложки $+5$ В (зелёные квадраты). Красная и синяя кривые на рисунке б – оценки эффективности сбора лития на подложку, предполагая, что плёнка испаряется так же, как испаряется металлический литий в вакуум

В части вопроса содержания дейтерия в соосаждённых слоях, было установлено (рисунок 2а), что как при температуре подложки близкой к комнатной содержание дейтерия в плёнке растёт с падением потенциала подложки, а при подаче положительного потенциала резко падает до уровня ~ 1 ат.%. Это может говорить о доминирующей роли ионов в накоплении водорода в литий-дейтериевых соосаждённых плёнках. При этом, при увеличении температуры подложки (рисунок 2б), содержание дейтерия как в плёнках с большим по абсолютной величине потенциалом смещения (-500 В), так и с положительным потенциалом смещения, оказывается существенно меньше, чем таковое для плавающего потенциала (~ -8 В). Несмотря на схожий эффект, механизмы, объясняющие уменьшение содержания дейтерия для этих двух условий осаждения вероятно различны. Для положительного потенциала смещения наиболее важной, скорее всего, является экранировка

ионов от подложки. Для большого отрицательного смещения возможно, что распыление дейтерия с поверхности растущей плёнки при температурах близких или превышающих температуру плавления лития, в том числе по механизмам химического распыления, может объяснять уменьшение содержания дейтерия. Стоит отметить, что ранее результаты, схожие с полученными для большого потенциала смещения, были получены на токамаке T-11M, для которого можно ожидать более высоких энергий частиц дейтерия, имплантирующегося в поверхность во время роста соосаждённой плёнки [4,5].

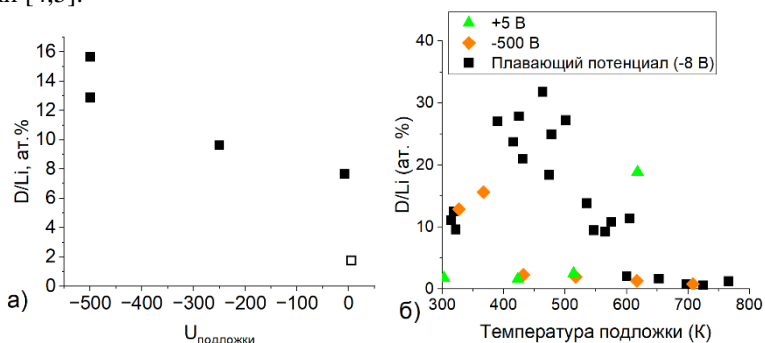


Рисунок 2 - Зависимость содержания дейтерия в литий-дейтериевой соосаждённой плёнке от а) потенциала смещения подложки при близкой к комнатной температуре осаждения; б) от температуры для трёх серий экспериментов: чёрные квадраты – плавающий потенциал подложки, оранжевые ромбы – потенциал смещения – 500 В, зелёные треугольники – потенциал смещения + 5 В. Пустотелая точка на рисунке а – потенциал смещения +5 В

Качественно, как можно видеть на спектрах десорбции дейтерия из плёнок (рисунок 3), изменение потенциала подложки влияет в первую очередь на низкотемпературную (от температуры плавления лития до температуры ~ 700 К наиболее характерного пика десорбции) составляющую. Можно предположить, что дейтерий с высокой энергией имплантации накапливается в литиевой плёнке в виде твёрдого раствора и легко покидает плёнки после её плавления. Не было обнаружено каких-либо существенных дополнительных пиков десорбции при подаче смещения, то есть, вероятно, не образуется новых типов центров захвата в плёнке или новых видов химических соединений.

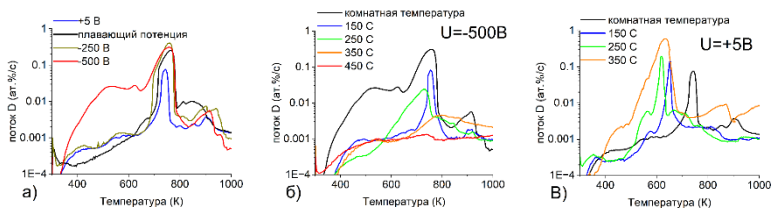


Рисунок 4.19 - Спектры десорбции дейтерия из плёнок лития для трёх серий экспериментов: а – для экспериментов без подогрева подложки с варьируемым потенциалом мишени, б – для экспериментов с потенциалом подложки -500 В, в – для экспериментов с потенциалом подложки $+5$ В

Литература

- [1] Krat S. A. и др. A setup for study of co-deposited films // J. Inst. 2020. Т. 15, № 01. С. P01011–P01011.
- [2] ALADDIN, A Labelled Atomic Data INterface [Электронный ресурс]. URL: <https://www-amdis.iaea.org/ALADDIN/>.
- [3] Krat S. A. и др. Lithium-deuterium co-deposition // Journal of Nuclear Materials. Netherlands: Elsevier BV, 2023. Т. 584. С. 154598–154598.
- [4] Shcherbak A. N. и др. INVESTIGATION OF DEPENDENCE OF LITHIUM AND HYDROGEN COLLECTION BY COLLECTOR TARGET ON TEMPERATURE OF TARGET SURFACE IN EMITTER-COLLECTOR SYSTEM ON T-11M TOKAMAK // The book of abstracts and scientific programme of the 5th International Symposium on Liquid Metal Applications for Fusion / под ред. Kurnaev V. A., Gasparyan Yu. M., Krat S. A. Moscow: NRNU MEPhI, 2017. С. 29.
- [5] Shcherbak A. N. и др. Experiments on the Capture of Li, H, and D by Lithium Collectors at Different Surface Temperatures at the T-11M Tokamak // Plasma Physics Reports. 2018. Т. 44, № 11. С. 1001–1008.