А.С. ПОПКОВ, С.А. КРАТ, Ю.М. ГАСПАРЯН, А.А. ПИСАРЕВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИЗУЧЕНИЕ СООСАЖДЕНИЯ ДЕЙТЕРИЯ С ЛИТИЕМ В МАГНЕТРОННОМ РАЗРЯДЕ

При разработке термоядерных установок одним из ключевых является вопрос выбора материалов конструкционных элементов, обращенных к плазме. Литий рассматривается в качестве одного из возможных материалов, контактирующих с плазмой токамака. При выборе материалов стенок термоядерных установок учитываются разные аспекты взаимодействия плазмы с материалами, в том числе распыление и переосаждение материала, а также накопление изотопов водорода в переосаждённых слоях. На данный момент уже были проведены эксперименты с литием на таких токамаках, как T-11M, EAST и FTU. В этих экспериментах было показано положительное влияние лития, которое проявляется в уменьшении эффективного заряда плазмы, уменьшении рециклинга водорода, уменьшении примесей и увеличении времени удержания частиц [1].

В данной работе исследовалось накопление дейтерия в переосажденных слоях в ходе магнетронного разряда с литиевым катодом.

Лабораторные эксперименты с литием осложнены тем, что литий очень активно реагирует с атмосферными газами (азот, кислород, пары воды). Поэтому эксперименты должны проводиться в хорошем вакууме, а анализ образцов должен проводиться непосредственно после экспериментов, без контакта с воздухом. Поэтому для экспериментов была разработана экспериментальная установка на основе цилиндрического планарного магнетрона постоянного тока, при помощи которой производилось распыление расплавленного лития дейтериевой плазмой с последующим анализом полученных слоёв при помощи термодесорбционной спектроскопии.

Установка (рис.1) состоит из двух вакуумных камер - камеры напыления (1) и камеры анализа (2), которые установлены соосно. В камере ТДС-анализа установлен квадрупольный масс-спектрометр (11). Газовая течь (16) позволяет следить за составом газа во время напыления. Образец (14) может перемещаться между камерами напыления и анализа при помощи линейного ввода движения (8). Клапан (10) между камерами позволяет вакуумно изолировать камеры друг от труда после перемещения образца из одной камеры в другую. Отсоединять образец от линейного ввода для

вакуумной изоляции при анализе позволила конструкция держателя образца. Держатель образца может привинчиваться и отвинчиваться от конца линейного ввода движения для перемещения образца между камерами. На держателе предусмотрены измерение температуры образца и подача потенциала на образец. Для предотвращения напыления на держатель образца в камере напыления были установлены две диафрагмы: диафрагма над катодом и диафрагма вокруг образца, которая крепится на вводе вращения, что позволяет отодвигать ее в сторону для перемещения образца в камеру ТДС, а также защиты образца от напыления до момента плавления лития. На диафрагмы устанавливаются дополнительные образцы для контроля толщины пленки.

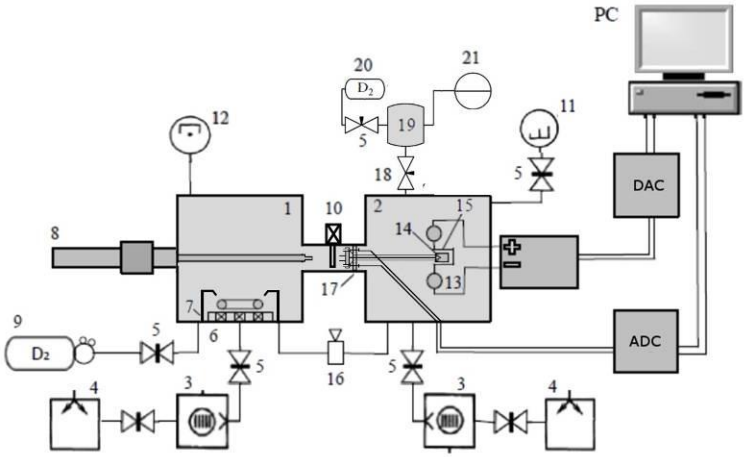


Рис.1. схема установки МР-2: 1 – камера напыления, 2 – камера ТДС, 3 – турбомолекулярный насос, 4 – мебранный форвакуумный насос, 5 – клапан, 6 – магнетрон, 7 – кожух магнетрона, 8 – вакуумный ввод, 9 – газовый баллон, 10 – шибер, 11 – квадрупольный масс-спектрометр, 12 – комбинированный магниторазрядный вакуумметр, 13 – охлаждаемый токовводы, 14 – экспериментальный образец, 15 – нагреватель, 16 – калиброванная течь, 17 – стационарная часть держателя образцов, 18 – прецезионный натекатель, 19 – калибровочный объём, 20 – калибровочнй баллон, 21 - баротрон

Рабочим газом разряда является дейтерий. Вследствие переходных процессов ток и напряжение во время разряда меняются, поэтому стабилизация питания производится по мощности. До начала плавления лития

разряд находится в фазе поджига, цвет разряда - бело-голубой, напряжение составляет около 300 В, а давление поддерживается на уровне 2×10^{-2} мбар. В момент плавления лития цвет разряда меняется на алый, наблюдается резкий скачок давления. После стабилизации разряда напряжение разряда составляет 100-150 В, а давление 9×10^{-3} мбар. Когда литиевый образец полностью распыляется, цвет разряда вновь становится бело-голубым.

Литиевая пленка наносилась на молибденовую подложку. После осаждения образец, установленный на держателе, переносился в камеру анализа для проведения ТДС. Максимальная температура нагрева была 1100 К. На рис.2 представлены типичные ТДС-спектры литиево-дейтериевой пленки.

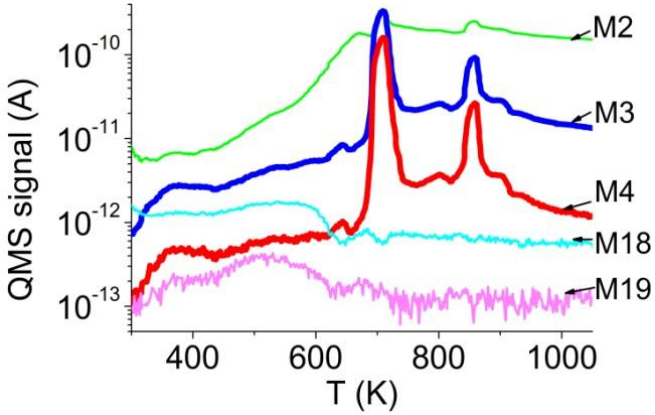


Рис.2. Типичные ТДС-спектры различных масс для литиево-дейтериевой пленки

На спектрах D_2 (4ая масса) и HD (3^{я} масса) наблюдаются два ярко выраженных пика с максимумами при 710 К и 850 К. Пик при 710 градусах, возможно, обусловлен плавлением гидроксида лития, так как эта температура близка к температуре разложения гидроксида, равной 720 К. Однако, как было показано в [3], десорбция из гидроксида происходит преимущественно в виде воды. Возможно, гидроксид образуется лишь на поверхности пленки, а сама пленка в целом состоит из металлического лития с растворённым в нём дейтерием. Пик при 850 К, возможно, связан с разложением гидрида лития, однако эта температура меньше температуры разложения гидрида (920К). Вид термодесорбционного спектра дейтерия схож со спектром, полученном на токамаке Т11-М [1]. Стоит отметить, что ли-

тиевая пленка полностью покидала образец после нагрева до 1100 К во всех экспериментах.

Была проведена оценка концентрации дейтерия в пленке. Содержание дейтерия в пленке определялось из термодесорбционных спектров интегрированием. Содержание лития определялось на основе изображения разлома пленки, полученного при помощи растрового электронного микроскопа. Концентрация лития предполагалась равной 4×10^{22} ат/см^3, что является средним значением для Li, LiH, LiOH, Li_2CO_3. Оценки показали, что относительное содержание дейтерия в литии составляет 5÷18%. Измерение концентрации водорода в пленке было осложнено высоким уровнем фонового газовыделения. Вычитание сигнала, полученного при повторном нагреве, дает концентрацию водорода H/Li=23-52%. Однако, реальное значение должно быть меньше, так как фоновый сигнал в ходе основного нагрева всегда больше, чем в ходе повторного.

Был проведен эксперимент с выносом образца на атмосферу на трое суток. Поведение всех масс в ходе ТДС сильно отличается от эксперимента без выноса на атмосферу, что еще раз подтверждает необходимость проведения экспериментов с литием без контакта с атмосферой. Сигнал дейтерия в этом эксперименте был на уровне фона. Стоит отметить, что после извлечения образца из вакуумной камеры на нём были обнаружены остатки литиевой пленки, чего не наблюдалось в экспериментах без выноса на атмосферу. Таким образом, взаимодействие с атмосферой приводит к образованию новых химических соединений в пленке, в ходе образования которых происходит выход дейтерия.

Активный выход дейтерия наблюдался непосредственно в камере напыления при напуске паров воды до давлений порядка 10^{-3} мбар. Выход дейтерия происходил как в виде молекул водорода (HD, D_2), так и в составе молекул тяжёлой воды (HDO, D_2O). Для напуска паров воды использован термохимический источник паров воды, аналогичный использованному в работе [4].

Работа выполнена в рамках госконтракта №Н.4х.44.90.13.1105 по заказу госкорпорации «Росатом».

[1] В.А. Евтихин и др, ВАНТ Сер. Термоядерный синтез №1-2 (2002)17.
[2] M.J. Baldwin et al, Fus. Eng. Des. 61 (2002) 231.
[3] Y.Furuyama et al, J. Nucl. Mater. 313-316 (2003) 288.
[4] V. Kurnaev et al, Fus. Eng. Des 88 (2013) 1414.