

УДК 539.23:541.183.5:621.039.665

ЗАМЕЩЕНИЕ ТЯЖЁЛЫХ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В ВОЛЬФРАМОВЫХ СЛОЯХ ПРИ ВЫДЕРЖКЕ В ГАЗЕ

С.А. Крат, Я.А. Васина, А.С. Пришвицын, Е.А. Фефелова, М.А. Попова, Ю.М. Гаспарян, А.А. Писарев

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В настоящей работе методом термодесорбционной спектроскопии исследована эффективность удаления дейтерия из вольфрамовых соосаждённых слоёв в диапазоне температуры от 30 до 200 °С в вакууме и в атмосфере водорода ($8 \cdot 10^4$ Па). Исходные вольфрамовые слои толщиной 100 и 500 нм напылялись в магнетронном разряде в аргон-дейтериевой среде и содержали порядка 2% ат. дейтерия. Показано, что наличие водорода (протия) в ходе обезгаживания образцов увеличивает скорость удаления дейтерия. При этом в соосаждённых слоях захватывается дополнительное количество протия. Скорость удаления дейтерия растёт также с увеличением температуры. Выдержка при температуре 473 К в атмосфере водорода в течение 18 ч позволила удалить 99% захваченного дейтерия.

Ключевые слова: соосаждение, тонкие плёнки, накопление водорода, управляемый термоядерный синтез, термодесорбционная спектроскопия.

SUBSTITUTION OF HEAVY HYDROGEN ISOTOPES IN TUNGSTEN LAYERS DURING GAS EXPOSURE

S.A. Krat, Ya.A. Vasina, A.S. Prishvitsyn, E.A. Fefelova, M.A. Popova, Yu.M. Gasparyn, A.A. Pisarev

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

Efficiency of deuterium removal from tungsten co-deposited layers was studied by means of thermal desorption spectroscopy in the 30 to 200 °C temperature range in vacuum and hydrogen atmosphere ($8 \cdot 10^4$ Pa). Tungsten layers 100 nm and 500 nm thick were deposited in magnetron discharge in argon-deuterium environment and contained ~2% at. of deuterium. Presence of hydrogen (protium) during sample degassing increases the rate of deuterium removal. Simultaneously, an additional amount of protium is captured in the co-deposited layers. The rate of deuterium removal increases with temperature. Exposure at a temperature of 473 K in a hydrogen atmosphere for 18 hours allowed 99% of the captured deuterium to be removed.

Key words: co-deposition, thin films, hydrogen accumulation, fusion, thermal desorption spectroscopy.

DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-3-71-78

ВВЕДЕНИЕ

Тритий будет использован в качестве топлива в будущих термоядерных установках, и его накопление в установке представляет опасность с точки зрения радиационной безопасности. В строящемся токамаке ИТЭР ограничение по содержанию трития в установке составляет 1000 г трития, из которых 120 г приходится на накопление в крионасосах дивертора, 700 г составляет допустимый предел по содержанию непосредственно в камере и 180 г принимается за ошибки [1].

Накопление водорода в соосаждённых слоях, т.е. в слоях, растущих при одновременной бомбардировке поверхности частицами водорода и материалов стенки, — один из важнейших каналов накопления изотопов водорода в термоядерных установках [2—5]. Соосаждённые слои могут содержать большое количество изотопов водорода. В углеводородных слоях концентрация водорода может превышать 100% ат. [5, 6], а в бериллиевых плёнках она достигает 40% ат. [7, 8]. Даже в плёнках материалов с низкой растворимостью водорода, таких как вольфрам, который будет использован в качестве материала дивертора ИТЭР [9], при низких температурах подложки наблюдается содержание изотопов водорода на уровне нескольких атомных процентов [10—12]. Соосаждённые слои могут накапливаться в труднодоступных областях установок, таких как обратные стороны облицовочных тайлов и линии откачки, из которых их потом трудно удалять. Всё это делает разработку способов удаления накопленных в соосаждённых слоях изотопов водорода важной задачей.

Наиболее простой способ удаления водорода из материалов — это прогрев в вакууме. Чем больше температура, тем быстрее происходит обезгаживание материала. При этом максимальная температура ограничивается конструкционными особенностями конкретной установки и свойствами используемых материалов. Известно также, что экспозиция твёрдого материала, содержащего какой-либо изотоп водорода, в газе или в плазме другого изотопа водорода приводит к ускорению удаления первого изотопа из материала (изотопному обмену). В [13] было показано, что замещение дейтерия в вольфраме происходит при облучении в плазме протия даже вблизи комнатной температуры, а увеличение температуры приводит к ускорению процесса. В [14] эффективность удаления дейтерия из вольфрама вырастала и при экспозиции в газообразном H_2 .

Свойства соосаждённых слоёв могут существенно отличаться от свойств поликристаллического вольфрама [15—17], поэтому нельзя напрямую переносить результаты, полученные для поликристаллического вольфрама, на переосаждённые слои [14].

В данной статье представлены результаты исследования эффективности удаления дейтерия из вольфрамовых слоёв при длительной выдержке при повышенной температуре в атмосфере водорода и в вакууме методом термодесорбционной спектроскопии (ТДС).

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Соосаждённые слои получались на установке МР-2 [18] путём распыления вольфрамовой мишени (чистота вольфрама 99,999%) плазмой $Ar:D_2$ -смеси (чистота Ar 99,999%, изотопная чистота D_2 99,98%). Было проведено две серии экспериментов. В первой серии отношение $Ar:D_2$ было 3:1, общее давление 3,7 Па. Во второй серии отношение $Ar:D_2$ было 1:1, общее давление во время разряда 5,8 Па. Остаточное давление во всех экспериментах $5 \cdot 10^{-5}$ Па. Толщина осаждённых слоёв в первой серии экспериментов равнялась 100 ± 2 нм, во второй — 500 ± 2 нм. Скорость осаждения во всех сериях примерно одинакова $1,3 \text{ \AA}/с$. Аргон добавлялся в состав рабочего газа для повышения скорости осаждения. Концентрация аргона во всех соосаждённых слоях согласно данным ТДС составляла не более 0,02% ат.

Осаждение вольфрамовых слоёв проводилось на молибденовую подложку ($0,2 \times 10 \times 10$ мм), отожжённую в глубоком вакууме ($P_{\text{отжига}} \sim 10^{-6}$ Па) при температуре 1400 К в течение 7 ч. В предыдущих экспериментах было установлено, что при условии отжига подложки между осаждениями «эффект памяти» отсутствует [12]. Поэтому осаждение слоёв проводилось многократно на одну и ту же пластину, между напылениями подложка отжигалась при температуре 1350 К в течение 5 мин. Температура подложки во время осаждения контролировалась с помощью хромель-алюмелевой термпары, приваренной к задней стороне подложки. Из-за отсутствия активного охлаждения в ходе осаждения при минимальной температуре происходил постепенный нагрев подложки от 295 до 328 К (усреднённая по времени температура ~ 315 К) в первой серии экспериментов и от 295 до 355 К (усреднённая по времени температура ~ 340 К) во второй.

Содержание изотопов водорода в напылённом слое определялось с помощью ТДС в отдельной камере с низким уровнем фона, перенос образца в которую осуществлялся без взаимодействия с атмосферой. Фоновое давление в камере ТДС составляло $P_{\text{ТДС}} \sim 10^{-7}$ Па. Максимальная температура, достигаемая во время анализа, 1320 К, скорость нагрева 2 К/с, линейность нагрева обеспечивалась обратной связью между мощностью нагревателя и температурой образца.

Десорбция газов регистрировалась с помощью квадрупольного масс-спектрометра (КМС) Extort-100M. Количество дейтерия в соосаждённых слоях рассчитывалось по данным сигналов как 4 (D_2), так и 3 (HD) а.е.м. Сигналы тяжёлой воды также измерялись, но их вклад был незначителен. При подсчёте потока молекул HD из сигнала 3 а.е.м. вычитался «паразитный сигнал», пропорциональный сигналу 2 а.е.м. и наблюдаемый во всех экспериментах даже при подаче чистого протия в камеру ТДС (аналогично [19]). Данный сигнал существенно превышал сигнал, который можно было бы объяснить натуральным изотопным содержанием дейтерия в протии, и составлял $\sim 0,01$ от сигнала 2 а.е.м. Его уровень оценивался в начале каждого рабочего дня, перед проведением измерений. Оценка проводилась по ниж-

ней границе, из-за чего величина потока HD может быть несколько переоценена. Из сигнала водорода также вычитался фоновый сигнал, характерный для всех измерений и дающий наибольший вклад в области свыше 1070 К. Общее содержание изотопов водорода в осаждённом слое определялось по сигналам 4, 3 и 2 а.е.м. Количество газа рассчитывалось по интегралу потока десорбции в диапазоне от комнатной температуры до 1070 К, а эксперименты с дейтерием показывают, что данной температуры достаточно для выхода захваченного газа.

Для изучения изотопного обмена в камеру напыления вводился протий (натуральный изотопный состав, чистота 99,999%) до давления $8 \cdot 10^4$ Па, после чего подложка с осаждённым W—D-слоем оставалась в контакте с протием (водородом с натуральным содержанием дейтерия) на 18 ч при температуре от комнатной до 473 К. Радиационный нагреватель представлял собой галогеновую лампу (накальная спираль в кварцевой колбе) стандарта G6.35. За счёт наличия кварцевой колбы предотвращалась атомизация водорода на горячей спирали, что могло бы привести к повышенной эффективности сорбции водорода и исказить результаты эксперимента.

Между экспериментами по изотопному обмену проводились контрольные осаждения, в которых ТДС-анализ проводился спустя 1 ч после осаждения. Данные контрольных экспериментов были усреднены и использованы в качестве опорных для характеристики эффекта изотопного замещения.

Помимо выдержки в газе, в первой серии экспериментов проводились эксперименты с выдержкой образцов в остаточном вакууме при температурах 295, 373, 473 К для контроля влияния десорбции изотопов водорода с течением времени.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Зависимости содержания дейтерия в соосаждённых W—D-слоях после выдержки в атмосфере протия и в вакууме при различных температурах представлены на рис. 1.

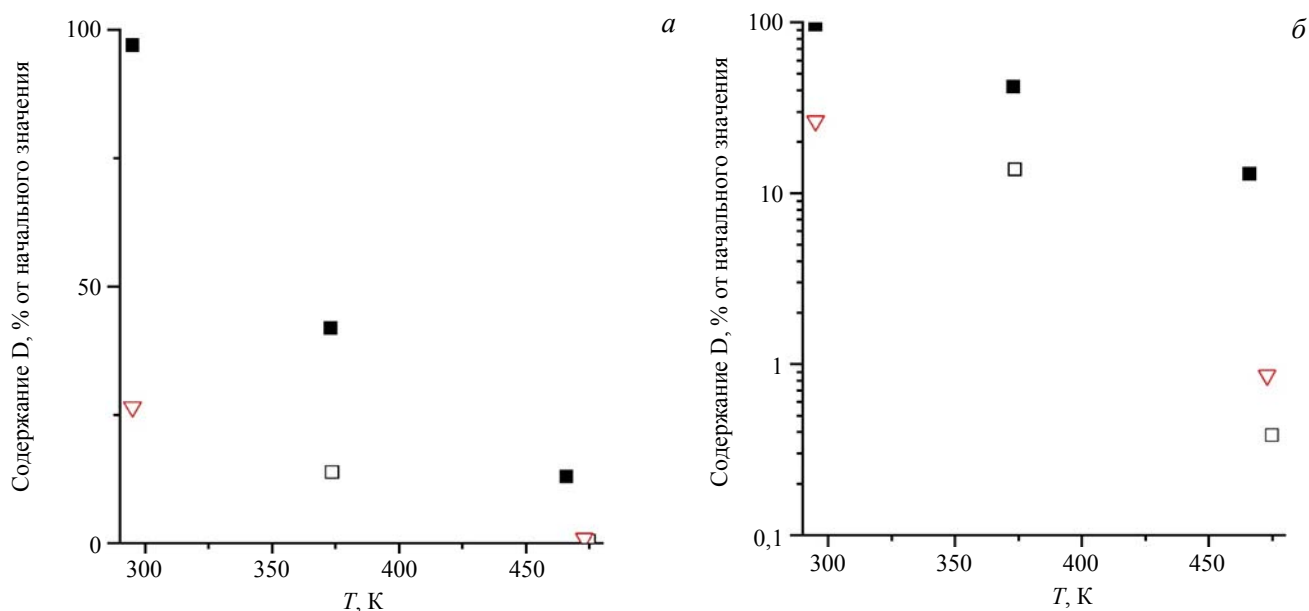


Рис. 1. Полное содержание атомов дейтерия в соосаждённых W—D-слоях в зависимости от температуры выдержки в вакууме и газе. Первая серия экспериментов (100 нм): ■ — выдержка в вакууме, □ — выдержка в водороде; ▽ — вторая серия экспериментов (500 нм), выдержка в водороде; а — линейный масштаб, б — логарифмический масштаб

Из экспериментов со слоями толщиной 100 нм можно видеть, что длительная выдержка при комнатной температуре в течение 18 ч в вакууме не приводила к заметному снижению содержания дейтерия в соосаждённой плёнке по сравнению с уровнем опорных экспериментов, выполненных спустя 1 ч после осаждения. Увеличение температуры выдержки до 373 К (100 °С) привело к снижению количества дейтерия на 55% при выдержке в вакууме. Аналогичная выдержка в атмосфере H_2 была более эффективной

и привела к удалению 75% дейтерия при комнатной температуре. Выдержка при максимальной температуре 473 К (200 °С) в атмосфере H_2 позволила удалить свыше 99% захваченного дейтерия.

В плёнках большей толщины (500 нм) изотопное замещение также было эффективным, как видно на рис. 1. Напомним, что доля содержания дейтерия отсчитывается во всех экспериментах от уровня опорных экспериментов, сделанных спустя 1 ч после осаждения, и для плёнок различной толщины она может быть несколько разной по отношению к количеству захваченного дейтерия сразу после осаждения.

ТДС-спектры дейтерия, десорбирующегося из 500 нм W—D-слоёв до и после выдержки в атмосфере протия, представлены на рис. 2. На контрольном спектре (чёрная линия) термодесорбции можно выделить, по крайней мере, два основных пика с максимумом при температурах около 470 и 610 К, можно выделить также слабо заметное плечо в области 700—800 К.

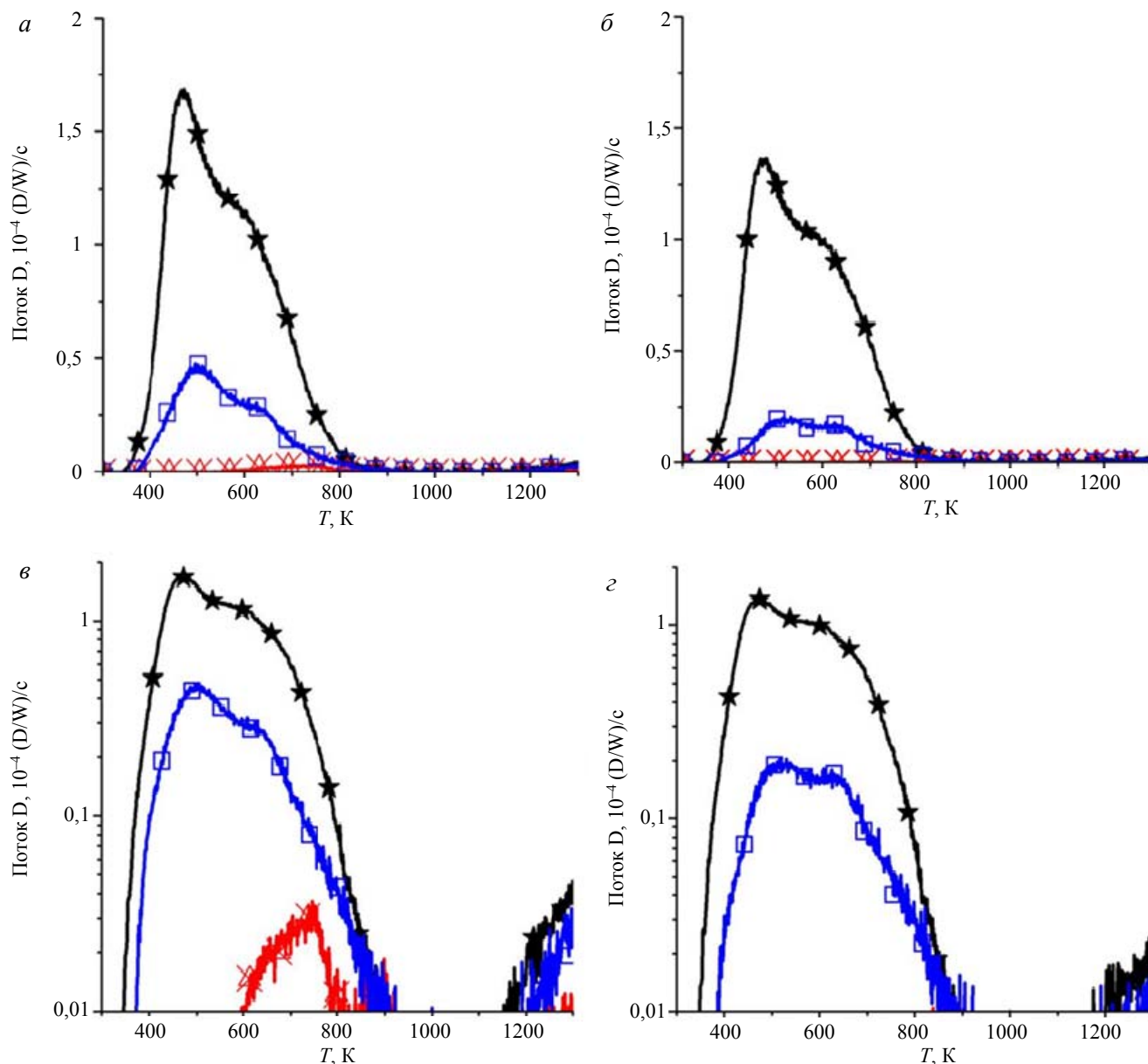


Рис. 2. ТДС-спектры дейтерий-содержащих молекул, десорбирующихся из соосаждённых слоёв W—D: а, в — сумма сигналов 4 а.е.м. (D_2 в пересчёте на атомы D) и 3 а.е.м. (HD); б, г — только сигнал 4 а.е.м.; а, б — линейный масштаб; в, г — логарифмический; ★ — без выдержки в протии; □ — выдержка при 295 К (комнатная температура); ✕ — 473 К (200 °С)

Длительная выдержка в водороде при комнатной температуре (синяя линия) приводит к уменьшению не только низкотемпературной части спектра, но и высокотемпературной. После выдержки в водороде при максимальной температуре 473 К (красная линия) можно видеть только один пик с максимумом при температуре 770 К, который был слабо заметен на исходном спектре. Этот пик целиком обусловлен десорбцией молекул HD.

На рис. 3 представлены ТДС молекул H_2 и HD . Из сравнения рис. 2 и 3 видно, что после выдержки в атмосфере H_2 при комнатной температуре количество протия в образце примерно на порядок больше, чем количество дейтерия, т.е. одновременно с потерей дейтерия происходит наполнение образцов протием. Десорбция небольшого количества водорода наблюдается и на контрольных спектрах без выдержки в водороде, что, вероятно, связано со взаимодействием осаждаемого слоя с остаточным газом во время и после осаждения. Положение пиков (479 и 610 K) десорбции дейтерия (см. рис. 2) после выдержки при комнатной температуре практически совпадает с положением пиков протия (см. рис. 3), т.е. протий и дейтерий находятся в плёнках в идентичных ловушках.

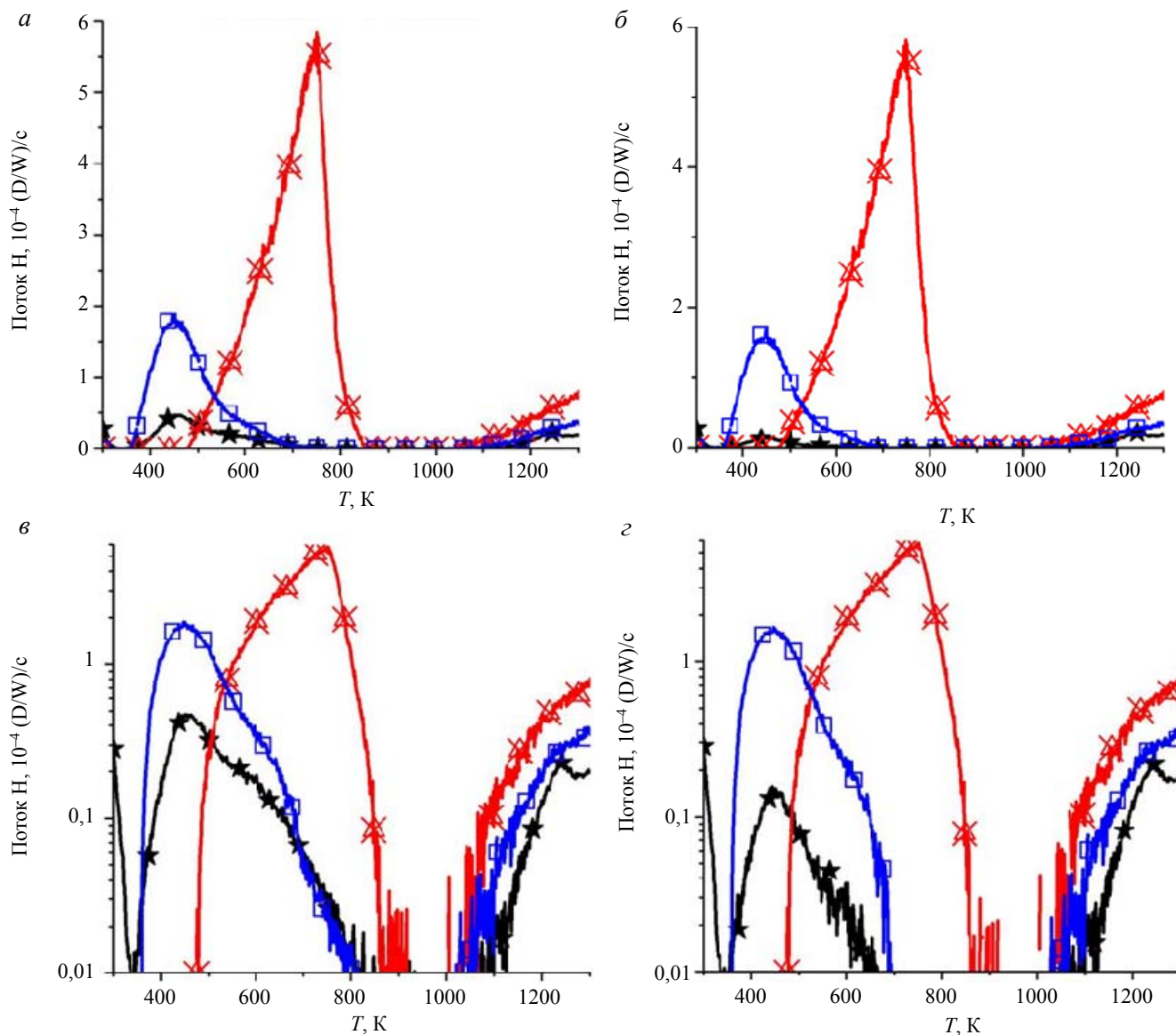


Рис. 3. ТДС-спектры протия, десорбирующегося из соосаждённых слоёв W—D: а, б — сумма сигналов 2 а.е.м. (H_2) и 3 а.е.м. (HD); в, г — только сигнал 2 а.е.м.; а, б — линейный масштаб; в, г — логарифмический; ★ — без выдержки в протии; □ — выдержка при 295 K (комнатная температура); × — 473 K (200 °C)

При максимальной температуре выдержки 473 K на спектрах термодесорбции протия на рис. 3 преобладает наиболее высокотемпературный пик с максимумом при 750 K. При этой же температуре наблюдаются пики на спектрах HD (см. рис. 2). Кроме пика 750 K, на спектрах H_2 присутствует плечо, которое соответствует пику 610 K на спектрах D_2 . При увеличении температуры выдержки в протии количество протия в образце возрастает, что связано с увеличением растворимости и коэффициента диффузии протия в вольфраме. Амплитуда высокотемпературного пика десорбции протия оказывается заметно больше, чем пик дейтерия в этой области для контрольного образца. Это может говорить о том, что при этой температуре становится возможной кластеризация исходных дефектов. Согласно [20, 21]

начало кластеризации ожидается в диапазоне температуры 600—700 К, однако время выдержки при температуре в нашей работе было гораздо больше. Снижение температуры кластеризации может быть связано также с особенностями структуры напылённого слоя по сравнению с поликристаллическим вольфрамом.

Полученные результаты хорошо согласуются также с данными [14], где в атмосфере водорода наблюдалось существенное ускорение выхода дейтерия из поликристаллического вольфрама при температуре 473 К и выше. Доля оставшегося в вольфраме дейтерия после выдержки была несколько больше, что может быть связано с различной структурой дефектов в материалах.

ОБСУЖДЕНИЕ

Как можно видеть из экспериментальных данных, добавление водорода увеличивает скорость выхода захваченного дейтерия для исследованных температур. Однако механизм замещения дейтерия протием может быть разный. Вольфрам обладает очень высокой теплотой растворения водорода ($Q_s = 1,03$ эВ [22]), и при комнатной температуре вероятность проникновения водорода в объём материала из газа очень мала. При этом вероятность адсорбции на поверхность гораздо больше. Поэтому можно предположить, что основной вклад водорода в ускорение десорбции дейтерия при комнатной температуре — это ускорение десорбции с поверхности.

Обычно считается, что коэффициент рекомбинации дейтерия на чистой поверхности вольфрама очень большой и не ограничивает скорость выхода частиц из объёма материала даже при комнатной температуре. В экспериментах по облучению вольфрама ионным пучком [23], например, выход дейтерия продолжался длительное время после остановки облучения, и за первые 3 ч вышло около 60% захваченного дейтерия. Можно предположить, что и в наших экспериментах дейтерий из растворённого состояния и наиболее слабых ловушек покидает образец в течение первого часа, который проходил между напылением и ТДС-анализом в контрольных экспериментах. Отсутствие дополнительного снижения концентрации дейтерия при выдержке в вакууме ($5 \cdot 10^{-5}$ Па) в течение 18 ч может говорить о снижении эффективности рекомбинации в условиях нашего эксперимента за счёт окисления поверхности либо о том, что весь дейтерий из ловушек с низкой энергией покидал плёнку за первый час, что приводило к существенному уменьшению концентрации растворённого водорода и водорода в адсорбированном состоянии. В случае, если причиной остановки десорбции при выдержке в вакууме является окисление поверхности, роль протия вполне возможно заключается в предотвращении окисления поверхности и увеличении скорости рекомбинации, что и приводит к дополнительному выходу дейтерия при комнатной температуре. Если десорбция прекращается из-за опустошения ловушек с низкой энергией связи, присутствие протия может приводить к упрощённому выходу водорода из ловушек, однако требуется проникновение значительного количества водорода в объём вольфрама уже при этой температуре.

Было проведено моделирование в одномерном диффузионном коде TMAP7 в предположении одного типа равномерно распределённых ловушек, бесконечной скорости рекомбинации на чистой поверхности (нулевой концентрации дейтерия на поверхности), запертой границы с подложкой и коэффициента диффузии из работы [22]. Для трёх различных температур (293, 393, 473 К) была найдена энергия выхода дейтерия из дефекта, при которой из полностью заполненных ловушек с концентрацией 2% ат. за 18 ч выходит 90% частиц. Для выдержки при температуре 293 К энергия выхода дейтерия из ловушек составила 0,87 эВ, для 373 К — 1,2 эВ, для 473 К — 1,4 эВ. Это хорошо согласуется со сделанными в [12] оценками энергий выхода дейтерия из ловушек ($0,74 \pm 0,08$, $1,18 \pm 0,12$ и $1,56 \pm 0,16$ эВ) для соосаждённых в аналогичных условиях W—D-плёнок, полученными на основании температурной зависимости интегрального накопления дейтерия. Таким образом, в случае если поверхность плёнки остаётся чистой в течение длительного времени, при комнатной температуре возможен активный выход из ловушек первого типа (с энергией $\sim 0,8$ эВ), а при температуре 373 К — из ловушек и первого, и второго типа (с энергией $\sim 1,2$ эВ). Выход дейтерия из ловушек третьего типа (с энергией $\sim 1,6$ эВ) и, возможно, присутствующих в плёнке в небольшой концентрации более высокоэнергетичных ловушек, а также из ловушек второго типа при комнатной температуре требует предположения дополнительных механизмов.

Можно предположить, что дополнительный механизм замещения дейтерия протием связан со снижением энергии связи ловушек по мере их заполнения водородом (подробно рассмотрено в [24]). С увеличением температуры растёт эффективность абсорбции водорода в объём материала. Это хорошо видно по резкому увеличению количества протия в образцах после выдержки при максимальной температуре. Растёт также скорость диффузии, что даёт возможность протию насыщать соосаждённый слой целиком. Увеличение суммарной концентрации двух изотопов в вольфраме и захват протия в ловушки, заполненные дейтерием, может привести к снижению энергии связи дейтерия с ловушками, что облегчает его выход из ловушек.

Остаётся не до конца ясным, почему происходит снижение амплитуды высокотемпературных пиков даже при выдержке в водороде при комнатной температуре. Подобное явление наблюдалось в [23] и для поликристаллического вольфрама.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование эффективности удаления дейтерия из вольфрамовых слоёв в вакууме и в атмосфере водорода. Показано, что с ростом температуры эффективность удаления дейтерия растёт, наличие протия ускоряет этот процесс для всех исследованных температур, начиная с комнатной. При выдержке соосаждённых слоёв толщиной 100 и 500 нм в течение 18 ч в атмосфере протия при температуре 473 К наблюдалось практически полное удаление дейтерия из них. При этом осаждённые слои накапливали протий, и его содержание в плёнке возрастало с температурой.

На основе моделирования был проведён анализ скорости выхода дейтерия из дефектов с различной энергией связи. Показано, что из большей части ловушек, характерных для исследуемых слоёв, дейтерий может выходить при температуре 373 К при условии чистой поверхности. Поэтому предполагается, что одним из основных факторов ускорения выхода дейтерия было ускорение десорбции с поверхности. Дополнительным фактором, обеспечивающим выход дейтерия из наиболее сильных ловушек, может быть снижение энергии связи дейтерия с ними при большой концентрации водорода в них.

Можно сделать вывод, что технология изотопного замещения может быть эффективной для удаления трития из соосаждённых слоёв в термоядерных установках даже при относительно небольших температурах порядка 200 °C

Работа была выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 17-72-20191.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Roth J. et al. Recent analysis of key plasma wall interactions issues for ITER. — J. Nucl. Mater., 2009, vol. 390—391, p. 1—9.
2. Widdowson A. et al. Overview of fuel inventory in JET with the ITER-like wall. — Nucl. Fusion., 2017, vol. 57, № 8, p. 086045.
3. Widdowson A. et al. Deposition of impurity metals during campaigns with the JET ITER-like wall. — Nucl. Mater. Energy, 2019, vol. 19, p. 218—224.
4. Doerner R.P., Tynan G.R., Schmid K. Implications of PMI and wall material choice on fusion reactor tritium self-sufficiency. — Nucl. Mater. Energy, 2019, vol. 18, p. 56—61.
5. Roth J. et al. Tritium inventory in ITER plasma-facing materials and tritium removal procedures. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2008, vol. 50, № 10, p. 103001.
6. Krat S. et al. Hydrocarbon film deposition inside cavity samples in remote areas of the JET divertor during the 1999—2001 and 2005—2009 campaigns. — J. Nucl. Mater., 2015, vol. 463, p. 822—826.
7. De Temmerman G. et al. An empirical scaling for deuterium retention in co-deposited beryllium layers. — Nucl. Fusion, 2008, vol. 48, № 7, p. 075008.
8. Bulgadaryan D. et al. Facility and the method for MEIS analysis of layers redeposited in plasma devices. — J. Phys. Conf. Ser., 2016, vol. 748, № 1, p. 012016.
9. Pitts R.A. et al. A full tungsten divertor for ITER: physics issues and design status. — J. Nucl. Mater., 2013, vol. 438, p. S48—S56.
10. De Temmerman G., Doerner R.P. Deuterium retention and release in tungsten co-deposited layers. — J. Nucl. Mater. Elsevier B.V., 2009, vol. 389, № 3, p. 479—483.
11. Alimov V.K. et al. Deuterium trapping in tungsten deposition layers formed by deuterium plasma sputtering. — J. Nucl. Mater., 2010, vol. 399, № 2—3, p. 225—230.
12. Krat S. et al. Tungsten-deuterium co-deposition: experiment and analytical description. — Vacuum, 2018, vol. 149, p. 23—28.
13. Roth J. et al. Hydrogen isotope exchange in tungsten: discussion as removal method for tritium. — J. Nucl. Mater., 2013, vol. 432, № 1—3, p. 341—347.

14. **Ahlgren T. et al.** Hydrogen isotope exchange in tungsten during annealing in hydrogen atmosphere. — Nucl. Fusion, 2019, vol. 59, № 2, p. 026016.
15. **Krat S. et al.** Comparison of erosion and deposition in JET divertor during the first three ITER-like wall campaigns. — Phys. Scr., 2020, vol. T171, p. 014059.
16. **Ruset C. et al.** The emissivity of W coatings deposited on carbon materials for fusion applications — Fusion Eng. Des., 2017, vol. 114, p. 192—195.
17. **Grigore E. et al.** The structure of the tungsten coatings deposited by combined magnetron sputtering and ion implantation for nuclear fusion applications. — Fusion Eng. Des., 2015, vol. 98—99, p. 1314—1317.
18. **Krat S.A. et al.** A setup for study of co-deposited films. — J. Instrum., 2020, vol. 15, № 01, p. P01011—P01011.
19. **Rusinov A.A. et al.** A setup for thermodesorption measurements. — Instruments Exp. Techn., 2009, vol. 52, № 6, p. 871—876.
20. **Elefeld H., van Veen A.** Void growth and thermal desorption of deuterium from voids in tungsten. — J. Nucl. Mater., 1994, vol. 212—215, p. 1421—1425.
21. **Ryabtsev S.A. et al.** On the annealing of radiation-induced point defects in tungsten. — J. Surf. Investig., 2016, vol. 10, № 3, p. 658—662.
22. **Frauenfelder R.** Solution and diffusion of hydrogen in tungsten. — J. Vac. Sci. Technol., 1969, vol. 6, № 3, p. 388—397.
23. **Moshkunov K.A. et al.** Air exposure and sample storage time influence on hydrogen release from tungsten. — J. Nucl. Mater., 2010, vol. 404, № 3, p. 174—177.
24. **Schmid K., von Toussaint U., Schwarz-Selinger T.** Transport of hydrogen in metals with occupancy dependent trap energies. — J. Appl. Phys., 2014, vol. 116, № 13, p. 134901.

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»,
115409 МОСКВА, КАШИРСКОЕ ШОССЕ 31, РОССИЯ**



Степан Андреевич Крат, научный сотрудник, к.ф.-м.н.
stepan.krat@gmail.com



Яна Андреевна Васина, инженер, аспирант
ian.vasina@yandex.ru



Александр Сергеевич Пришвицын, инженер, аспирант



Елена Алексеевна Фефелова, лаборант, студентка



Мария Алексеевна Попова, студентка



Александр Александрович Писарев, профессор, д.ф.-м.н.



Юрий Микаэлович Гаспарян, доцент, к.ф.-м.н.
yura@plasma.mephi.ru

Статья поступила в редакцию 21 апреля 2020 г.
После доработки 15 июня 2020 г.
Принята к публикации 5 августа 2020 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2020, т. 43, вып. 3, с. 71—78.