

**ТЕРМОДЕСОРБЦИЯ ДЕЙТЕРИЯ ИЗ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В
ВОЛЬФРАМЕ**
**DEUTERIUM THERMAL DESORPTION FROM RADIATION DEFECTS IN
TUNGSTEN**

С.А. Рябцев, Ю.М. Гаспарян, М.С. Зибров, А.А. Писарев
S.A. Ryabtsev, Yu. M. Gasparyan, M.S. Zibrov, A.A. Pisarev

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ (Московский инженерно-физический институт), Каширское шоссе 31, 115409 Москва, Россия

Detrapping of deuterium ions from point defects created by pre-irradiation in polycrystalline tungsten has been studied by thermal desorption spectroscopy. Different fluences and ion energies were used to investigate various types of defects. The heating rate β was also varied in different experiments in the range of 0.15–4 K/s to determine detrapping energies from the shift of peak positions.

Изучение поведения изотопов водорода представляет большой интерес в связи с разработкой термоядерных реакторов. Известно, что одной из проблем с точки зрения безопасности в ITER является накопление радиоактивного трития в обращенных к плазме материалах. Предполагается, что вольфрам будет использован в качестве обращенного к плазме материала в диверторной области, чему способствуют такие его свойства, как высокая температура плавления, хорошая теплопроводность и низкий коэффициент распыления [1]. Вольфрам также имеет низкую растворимость по отношению к водороду, однако значительное количество изотопов водорода может удерживаться в радиационных дефектах кристаллической решетки. В связи с этим, важной задачей является определение параметров взаимодействия водорода с дефектами. Часто для подобных целей используется метод термодесорбционной спектроскопии (ТДС).

На сегодняшний день имеется ряд данных, касающихся удержания изотопов водорода в вольфраме, однако некоторые фундаментальные его аспекты до сих пор не изучены. В частности, даже для вакансий данные по энергии выхода водорода из ловушки в вольфраме заметно различаются у разных авторов (от 1,34 до 1,55 эВ) [2-4]. Данные значения были получены с помощью подгонки расчетных спектров термодесорбции дейтерия из вольфрама под экспериментальные. Однако, можно показать, что, в случае высокой скорости рекомбинации дейтерия на поверхности металла, становится возможным определение энергии выхода дейтерия из дефектов по смещению положения максимума десорбции T_m в серии экспериментов с различными

скоростями нагрева образца β [5]. Тогда энергия выхода E_{dt} определяется следующим выражением:

$$\ln \left(\frac{\beta}{T_m^2} \right) = \ln \frac{kA}{E_{dt}} - \frac{E_{dt}}{k} \frac{1}{T_m} \quad (1)$$

где k – постоянная Больцмана, A – константа.

Описанный выше метод применялся в данной работе для определения энергии выхода дейтерия из дефектов в вольфраме. Для этого было проведено несколько серий экспериментов по термодесорбции дейтерия из вольфрама с разными скоростями нагрева.

Эксперименты проводились на установке «МЕДИОН» (НИЯУ МИФИ). В качестве образца использовалась поликристаллическая вольфрамовая фольга толщиной 25 мкм, отожженная в вакууме при температуре 1800 К в течение 30 минут с целью минимизации содержания в ней производственных дефектов. Для создания точечных дефектов в образце использовался масс-сепарированный пучок ионов D^+ с энергией 10 кэВ, облучение проводилось до дозы $3 \times 10^{19} \text{ D/m}^2$. Дальнейшая процедура отличалась для разных серий экспериментов. В одной из серий после предварительного («повреждающего») облучения образец подвергался нагреву до 550 К с последующей выдержкой при этой температуре в течение пяти минут для удаления захваченного дейтерия. Предполагается, что при данной температуре объединение вакансий в кластеры мало, т.е. в образце присутствуют преимущественно точечные радиационные дефекты [2]. В другой серии экспериментов образец нагревался и экспонировался при температуре 800 К для того, чтобы обеспечить кластеризацию дефектов.

После удаления захваченного в результате повреждающего облучения дейтерия производилось т. н. «наполняющее» облучение. Для этого образец облучался масс-сепарированным пучком ионов D_3^+ с энергией 2 кэВ до дозы $1 \times 10^{19} \text{ D/m}^2$. Так как энергия ионов составляла 0,67 кэВ/D, что ниже порога образования пар Френкеля в вольфраме, можно ожидать, что в процессе наполняющего облучения новые дефекты в образце не создавались. После наполнения образца дейтерием проводился ТДС с различными скоростями нагрева: от 0,15 К/с до 4 К/с. Вся вышеописанная процедура проводилась в одной камере в сверхвысоком вакууме (10^{-9} мбар), без выноса образца на атмосферу. Таким образом, можно считать, что поверхность образца оставалась чистой в ходе всех экспериментов.

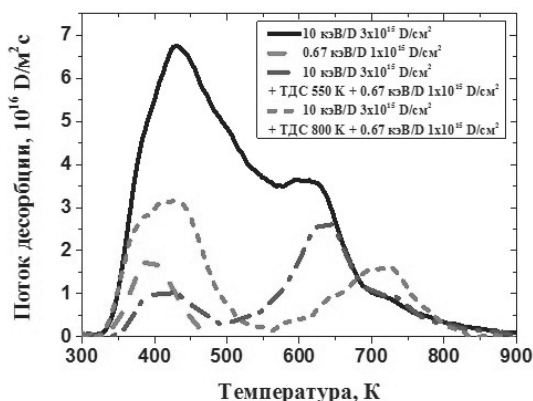


Рис. 1. Спектры ТДС дейтерия из вольфрама, облученного в различных условиях.

Из представленных на рис. 1 спектров видно, что в случае облучения отожженного вольфрамового образца ионами с энергией 0,67 кэВ/Д, на ТДС спектре (широкая пунктирная линия) присутствует единственный пик при температуре порядка 400 К, соответствующий выходу дейтерия из естественных дефектов (дислокаций, границ зерен) в объеме образца или из центров захвата на поверхности. При облучении отожженного образца 10 кэВ/Д ионами, на ТДС спектре (сплошная линия) превалирует первый пик, однако видно также плечо при температуре около 650 К, отвечающее выходу дейтерия из созданных в процессе облучения точечных дефектов, а также плечо при 720 К, которое может соответствовать выходу дейтерия из вакансионных кластеров. Остальные два спектра отвечают процедурам, описанным ранее. Спектр, изображенный штрихпунктирной линией, получен для повреждающего облучения с последующей выдержкой при 550 К и наполняющим облучением – превалирует высокотемпературный (650 К) пик выхода из точечных дефектов со слабо заметным плечом выхода из кластеров. Мелким пунктиром обозначен спектр, соответствующий экспериментальной процедуре с выдержкой при температуре 800 К и объединением вакансий в кластеры, что подтверждается наличием пика при 720 К. Необходимо отметить, что на последних двух ТДС спектрах пики, отвечающие выходу дейтерия из дефектов, хорошо разрешены, что делает их удобными для использования в экспериментах с различными скоростями нагрева.

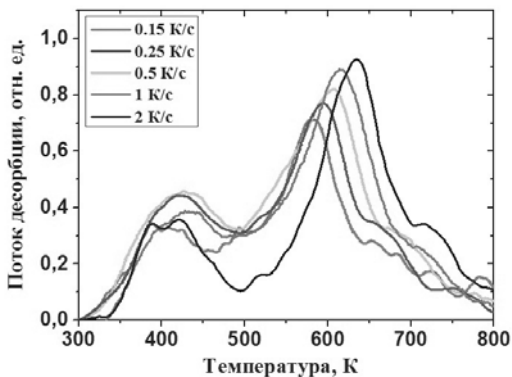


Рис. 2. Спектры ТДС дейтерия из дефектов для разных скоростей нагрева.

На рис. 2 представлены спектры термодесорбции дейтерия из дефектов для разных скоростей нагрева β для серии с выдержкой после повреждающего облучения при температуре 550 К. Для каждого значения β определялось положение второго пика десорбции T_m и строился график зависимости β/T_m^2 от $1/T_m$ в полулогарифмическом масштабе. Полученная зависимость аппроксимировалась прямой линией (рис. 3), по наклону которой определялась энергия активации выхода водорода из вакансий (или кластеров вакансий) в вольфраме. Значение энергии выхода дейтерия из вакансий в вольфраме составило $E_{dt} = 1,55 \pm 0,04$ эВ.

Аналогичным образом для других серий экспериментов были найдены значения энергии выхода дейтерия двух других пиков. Пик при температуре 700-750 К, предположительно соответствующий вакансионным кластерам: $E_{dt} = 1,96 \pm 0,09$ эВ (для серии с экспонированием поврежденного образца при 800 К) и низкотемпературный пик вблизи 400 К: $E_{dt} = 0,96 \pm 0,02$ эВ (для серии без повреждающего облучения).

1. M. Fukumoto, H. Kashiwagi, Y. Ohtsuka et. al., J. Nucl. Mater. 390-391 (2009), 572-575.
2. H. Eleveld, A. van Veen, J. Nucl. Mater. 433 (1992), 191-194.
3. O.V. Ogorodnikova, J. Roth, M. Mayer, J. Appl. Phys. 103 (2008).
4. M. Poon, A.A. Haasz, J.W. Davis, J. Nucl. Mater. 390 (2008), 374.
5. М.С. Зибров, А.С. Шубина, Ю.М. Гаспарян, А.А. Писарев. ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез, 2015, т.38, вып. 1, с. 32-41.