УДК 539.2

НАКОПЛЕНИЕ ДЕЙТЕРИЯ В КАРБИДАХ ВОЛЬФРАМА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ГАЗОФАЗНОГО ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ, ПРИ ИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

В.Х. Алимов, В.Л. Гончаров, Д.А. Комаров, Ю.В. Лахоткин, В.П. Кузмин
(Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН), И. Дорнер, И. Рот
(Институт физики плазмы общества Макса Планка, Гархинг, Германия)

В работе исследовалось накопление дейтерия в покрытиях из карбидов вольфрама W_2C и WC с содержанием свободных атомов углерода (т.е. несвязанных химически с атомами вольфрама) около 10% ат., полученных методом химического осаждения из газовой фазы, в процессе облучения ионами дейтерия с энергией от нескольких сотен эВ (~200 эВ/D) с потоком ионов $1{,}1\cdot10^{21}$ D/(м^2·с) и дозой ионного облучения $2\cdot10^{24}$ D/м^2 до нескольких кэВ (10 кэВ) при температуре 300—323 К и дозой ионного облучения $1\cdot10^{23}$ D/м^2. Было показано, что в отличие от вольфрамовых материалов дейтерий накапливается только в виде атомов, удерживаемых, главным образом, включениями углерода. Использование метода ядерных реакций D(^{3}He, p)^{4}He с увеличивающейся энергией анализируемых ионов ^{3}He (от 0,69 до 4,0 МэВ) позволило определить профили дейтерия в объёме карбидных покрытий до глубин в несколько микрон. После выдержки в дейтериевой плазме при температуре ниже 400 К атомы дейтерия накапливаются в приповерхностных слоях с максимальной концентрацией в несколько ат. %, при температуре выше 400 К атомы дейтерия диффундируют в объём покрытия и накапливаются до концентрации около 2% ат. на глубине в несколько микрометров. При температуре выше 550 К концентрация дейтерия в объёме покрытия начинает снижаться. Анализ полученных профилей распределения концентрации атомов дейтерия по глубине позволил оценить коэффициент диффузии дейтерия как $D = 1{,}33\cdot10^{-1}\exp\{-(123 \pm 10$ кДж/мол.)$/RT\}$ м^2/с и показал, что коэффициент диффузии практически не зависит от стехиометрии карбида вольфрама.

Ключевые слова: дейтерий, накопление дейтерия, газофазное химическое осаждение, вольфрам, карбиды вольфрама.

DEUTERIUM RETENTION IN CVD TUNGSTEN CARBIDES AT ION IRRADIATION. V.Kh. ALIMOV, V.L. GONCHAROV, D.A. KOMAROV, Yu.V. LAKHOTKIN, V.P. KUZMIN, J. DORNER, J. ROTH. Chemically vapor deposited (CVD) coatings of W_2C and WC with ~10 % at. of free carbon atoms (chemically unbound with W atoms) were exposed to low energy (~200 eV/D) and high ion flux $1.1\cdot10^{21}$ D/(m^2·s) plasma at various temperatures to ion fluence of $2\cdot10^{24}$ D/m^2 and irradiated with 10 keV D ions at 300—323 K to fluence of $1\cdot10^{23}$ D/m^2. It was shown, that deuterium is accumulated solely as D atoms trapped mainly at carbon precipitators. Deuterium depth profiles in the bulk of the CVD coatings were determined by the D(^{3}He, p)^{4}He nuclear reaction at a ^{3}He energy varied from 0.69 to 4.0 MeV. After D plasma exposure at temperatures below 400 K, deuterium atoms accumulate in the near-surface layers with maximum surface concentration of several at. %. At exposure temperature above 400 K, D atoms diffuse into the bulk of the coating and accumulate up to a maximum concentration of about 2% at. at depths of several micrometers. At temperatures above 550 K the D concentration in the bulk starts to decrease. Based on the measured depth profiles with the use of one-dimensional diffusion equation, the deuterium diffusivity in the coatings is estimated to be $D = 0.133\exp\{-(123 \pm 10$ kJ/mol$)/RT\}$ m^2/s.

Key words: deuterium, deuterium retention, CVD, tungsten, tungsten carbides.

ВВЕДЕНИЕ

Вольфрам и углеродно-волоконные композиты являются материалами плазмоконтактирующих покрытий дивертора токамака ИТЭР. В качестве таковых они будут подвергаться воздействию дейтерий-тритиевой плазмы с высокими значениями потока ионов (10^{22} м$^{-2}$·с$^{-1}$ и выше) [1]. Вследствие процессов физического и химического распыления углеродных материалов плазма будет загрязняться углеродными и углеводородными примесями. В плазме эти примеси будут ионизироваться энергетическими электронами и затем совместно с изотопами водорода имплантироваться в вольфрам. При этом в зависимости от условий плазменного воздействия (энергия и потоки ионов и нейтралов, температура покрытия) возможно образование карбидных слоев на поверхности вольфрама [2—6]. Кроме того, часть углеродных и вольфрамовых примесей, эмитируемых с поверхности распыляемых плазмоконтактирующих материалов, будет осаждаться в виде смешанных слоев на поверхностях, защищенных от воздействия плазмы.

Формирование смешанных углерод-вольфрамовых (C—W) пленок было обнаружено в токамаках TEXTOR (Юлих, Германия) и ASDEX Upgrade (Гархинг, Германия) [7—9], и некоторые пленки состояли из карбидных слоев [7]. Ожидается, что смешанные C—W-пленки и слои карбидов вольфрама будут формироваться также в теневых зонах, прилегающих к дивертору токамака ИТЭР. Для оценки накопления трития в камере ИТЭР необходимы данные о поведении изотопов водорода как в смешанных C—W-пленках, так и в карбидах вольфрама. Однако к настоящему времени этих данных крайне недостаточно.

Изучение накопления дейтерия в углеродных и смешанных C—W-пленках, сформированных в магнетронной распылительной системе с использованием дейтерия в качестве рабочего газа, показало, что дейтерий распределяется в этих пленках равномерно по толщине [10]. С увеличением температуры подложки, на которую наносилась пленка, концентрация дейтерия в углеродных пленках уменьшается от 0,4 D/C (в единицах атомного отношения концентраций) при 400 K до 0,02 D/C при 973 K. В смешанных C—W-пленках концентрация дейтерия падала от 0,02 D/(C + W) при 400 K до значений менее 10^{-4} D/(C + W) при 973 K. Несмотря на достаточно высокое содержание углерода в смешанных C—W-пленках (до 30% ат.), концентрация дейтерия в них оказалась гораздо меньше, чем можно было ожидать, исходя из предположения, что пленки состоят из вольфрамовых и углеродных включений. Авторы работы [10] делают предположение, что смешанные пленки содержат карбидные фазы, в которых концентрация дейтерия значительно ниже, чем в углеродных материалах.

Высокая концентрация изотопов водорода в C—W-пыли (C/W = 70/30), полученной с помощью дугового разряда в атмосфере дейтерия, а именно 0,5 D/(C + W) при температуре подложки 300 K и 0,05 D/(C + W) при 850 K [11], а также в C—W-слое (C/W > 60/40), соосажденном с помощью радиочастотного разряда в атмосфере протия при температурах в диапазоне от 338 до 393 K, в котором концентрация протия варьируется от 0,16 до 0,45 H/(C + W) [12], может быть объяснена тем, что часть углерода в смешанных C—W-материалах с C/W > 50/50 не может быть химически связана с атомами вольфрама, поэтому обладает способностью захватывать значительное количество изотопов водорода.

Что касается поведения водорода в стехиометрических карбидах вольфрама, то в литературе не было обнаружено работ по этой теме. В настоящей работе была предпринята попытка изучения накопления дейтерия в покрытиях из карбидов вольфрама W_2C и WC, химически осажденных из газовой фазы и облученных низкоэнергетической дейтериевой плазмой при различных температурах. Работу проводили в Институте физической химии и электрохимии РАН (ИФХЭ РАН) и Институте физики плазмы в Гархинге, Германия (IPP Garching)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе были использованы образцы, представляющие собой покрытия из карбидов вольфрама W_2C и WC, нанесенные на никелевые подложки размером 10×10 мм методом химического газофазного осаждения из смеси гексафторида вольфрама WF_6, метана и водорода при температуре 723—823 K. Химический состав покрытий измеряли методами резерфордовского обратного рассеяния в IPP Garching и рентгеноспектрального микроанализа в ИФХЭ РАН, фазовый состав покрытий и размер кристаллитов были определены методом рентгеновской дифрактометрии в ИФХЭ РАН (см. таблицу).

Химический состав и структура химическиосажденных покрытий из карбидов вольфрама W_2C и WC

Характеристика	W_2C	WC
Химический состав	W — 60% ат.; C — 40% ат.	W — 45% ат.; C — 55% ат.
Фазовый состав	гпу W_2C: ~90% ат.; атомы C: ~10% ат.	гцк WC: ~90% ат.; атомы C: ~10% ат.
Размер кристаллитов	20—30 нм	10—30 нм
Толщина покрытия	3—5 мкм	3—5 мкм

Примечание: гпу — гексагональная плотноупакованная; гцк — гранецентрированная кубическая.

Плотность карбидов вольфрама W_2C и WC составляла соответственно ρ_{W_2C} = 17,18 г/см^3 (атомная плотность N_{W_2C} = 8,18·10^{22} (W + C)/см^3) и ρ_{WC} = 15,67 г/см^3 (атомная плотность N_{WC} = 9,64·10^{22} (W + C)/см^3).

Химически осажденные покрытия облучали в ИФХЭ РАН низкоэнергетической (~200 эВ/D) дейтериевой плазмой с высоким значением потока ионов и ионами дейтерия с энергией 10 кэВ/D. Дейтериевая плазма генерировалась в магнетроне постоянного тока с плоской геометрией магнитов [13]. В качестве рабочего газа использовали дейтерий при давлении ~1 Па. Образец карбида вольфрама помещали на катод магнетрона и облучали ионами, генерируемыми в плазме с напряжением разряда 450 В. Падение катодного потенциала, измеренное с помощью зонда Ленгмюра, составляло около 0,8 от напряжения разряда. Предполагая, что ионы D_2^+ являются доминирующими в плазме, средняя энергия ионов оценивалась в ~200 эВ/D. Поток ионов определялся в специальных экспериментах измерением тока ионов и составлял 1,1·10^{21} D/(м^2·с). Образец подвергали плазменному воздействию в течение 30 мин, следовательно, доза ионного облучения составляла 2·10^{24} D/м^2. Во время плазменного воздействия образец нагревали, и стационарная температура достигалась в течение 2—3 мин. Температура облучения варьировалась в интервале от 373 до 813 К за счет изменения теплового контакта между образцом и катодом и контролировалась хромель-алюмелевой термопарой, приваренной к никелевой подложке. Облучение покрытий из W_2C и WC ионами дейтерия осуществляли с помощью масс-сепарированного пучка ионов D_2^+ с энергией 20 кэВ (10 кэВ/D) в вакуумной камере с остаточным давлением менее 1·10^{-7} Па. Поток ионов составлял около 5·10^{18} D/(м^2·с). Доза ионного облучения составляла 1·10^{23} D/м^2, температура образцов во время облучения не превышала 323 К.

Профили распределения дейтерия по глубине определяли в ИФХЭ РАН методами масс-спектрометрии вторичных ионов (МСВИ) и регистрации газовых молекул (РГМ) [14], а также в IPP Garching методом ядерных реакций D(^{3}He, p)^{4}He с увеличивающейся энергией анализирующих ионов ^{3}He [15]. Морфологию поверхности образцов после плазменного облучения исследовали с помощью сканирующей электронной микроскопии.

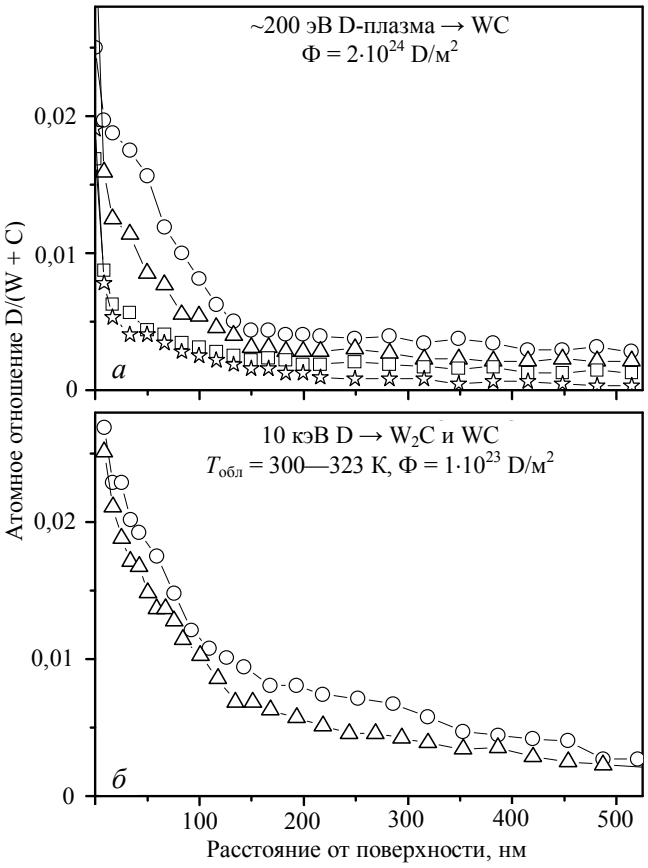

Рис. 1. Профили распределения атомов дейтерия в приповерхностных слоях карбидов вольфрама W_2C и WC, химически осажденных из газовой фазы и облученных низкоэнергетической (~200 эВ/D) дейтериевой плазмой при различных температурах до дозы 2·10^{24} D/м^2 (*а*) ($T_{обл}$ = 343 (○), 493 (△), 603 (□), 723 К (☆)) и ионами дейтерия с энергией 10 кэВ/D при температуре 300—323 К до дозы 1·10^{23} D/м^2 (*б*) (△ — W_2C, ○ — WC)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

После облучения покрытий из карбидов вольфрама как дейтериевой плазмой при различных температурах, так и ионами дейтерия при температуре, близкой к комнатной, молекулярный дейтерий не был обнаружен методом РГМ, регистрировались только атомы дейтерия методом МСВИ (рис. 1). Следует отметить, что в вольфра-

мовых материалах, облученных низкоэнергетической дейтериевой плазмой или ионами дейтерия с энергией в несколько кэВ, дейтерий присутствует в виде атомов и молекул [16].

Анализ профилей распределения дейтериевых атомов (см. рис. 1) показал, что в процессе низкоэнергетического (~200 эВ/D) плазменного воздействия при невысокой температуре (343 К) и облучения ионами с энергией 10 кэВ/D при 300—323 К дейтерий накапливается в приповерхностных слоях карбидов до практически одинаковых концентраций. По-видимому, радиационные дефекты, создаваемые облучением энергетическими ионами, не играют доминирующей роли в удержании дейтерия. Таким образом, можно предположить, что ионно-имплантированный дейтерий накапливается в приповерхностных слоях карбидных покрытий только в виде атомов, удерживаемых различного рода изначально существующими дефектами и включениями углеродных примесей.

Анализ поверхности покрытий после облучения дейтериевой плазмой методом сканирующей электронной микроскопии не выявил формирование блистеров (рис. 2, *а*), как это наблюдалось при плазменном облучении монокристаллического и поликристаллического вольфрама (рис. 2, *б*) [16]. По-видимому, отсутствие молекулярной фазы может быть объяснено как малой вероятностью формирования вакансионных комплексов и микрополостей в карбидной решетке, так и низким значением коэффициента рекомбинации водорода на поверхности карбида вольфрама [17]. Следует отметить, что уменьшение вероятности формирования молекул D_2 приводит к возрастанию потока атомов дейтерия, диффундирующих в объем материала.

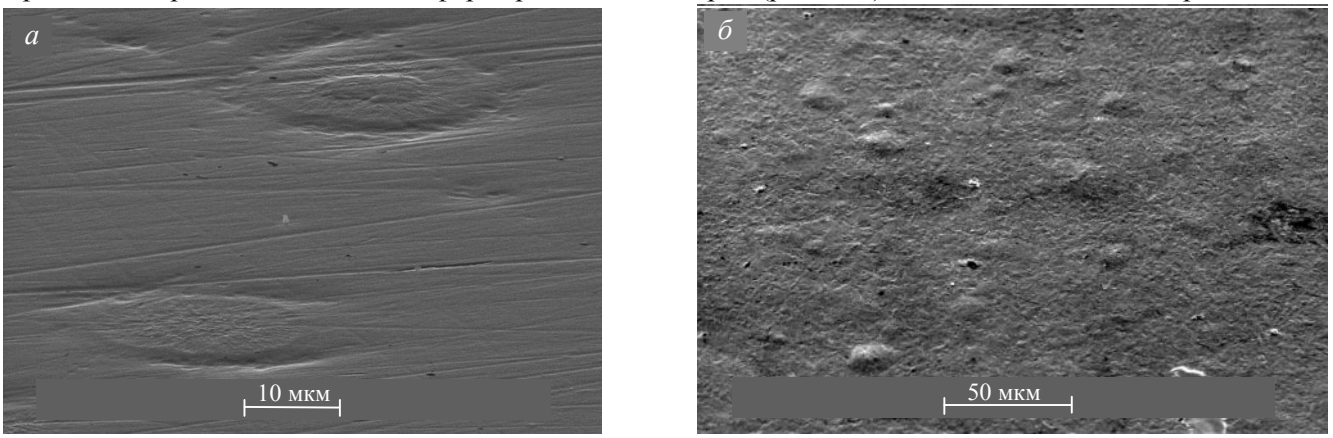

Рис. 2. Микрофотографии поверхностей покрытия из карбида вольфрама W_2C (*а*) и поликристаллического вольфрама (*б*), облученных низкоэнергетической (~200 эВ/D) дейтериевой плазмой до дозы ионного облучения 2×10^{24} D/м^2 при $T_{обл}$ = 503 К (*а*) и 493 К (*б*)

Если методы МСВИ и РГМ позволяли анализировать дейтерий в приповерхностных слоях (до глубины около 0,5 мкм), то метод ядерных реакций (ЯР) с увеличивающейся энергией анализирующих ионов ^{3}He позволил провести анализ на глубине в несколько микрон. Профили распределения дейтерия в объеме покрытий из карбидов вольфрама, измеренные методом ЯР, показаны на рис. 3. По мере увеличения

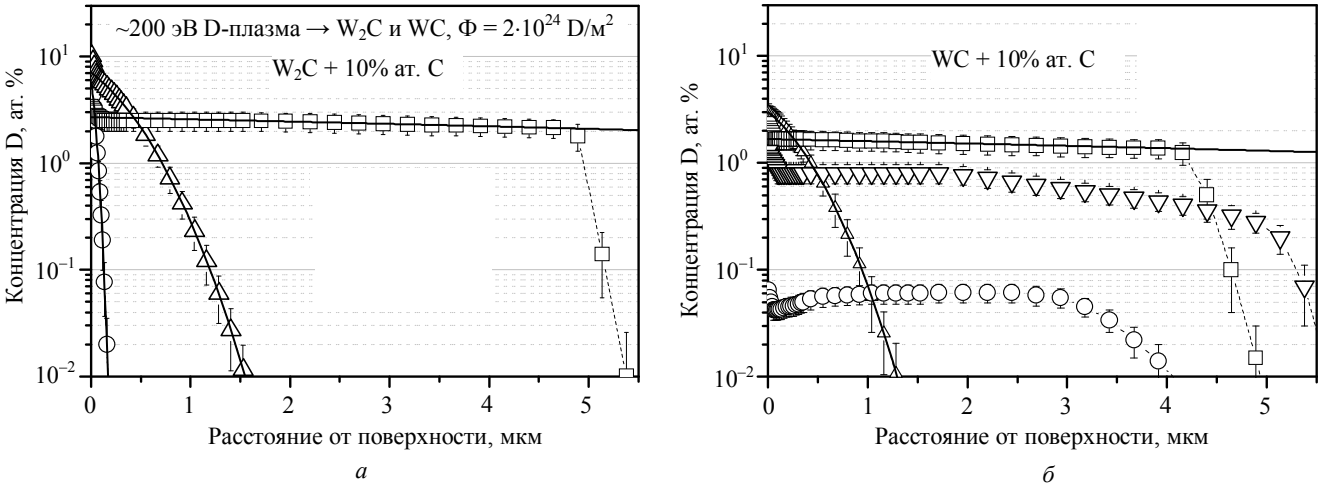

Рис. 3. Профили распределения дейтерия в химически осажденных из газовой фазы карбидах вольфрама W_2C (*а*) и WC (*б*), облученных при различных температурах низкоэнергетической (~200 эВ/D) дейтериевой плазмой: —— — профили распределения, рассчитанные с помощью диффузионного уравнения (1); *а* — $T_{обл}$ = 373 (○), 433 (△), 503 К (□); *б* — $T_{обл}$ = 413 (△), 543 (□), 653 (▽), 813 К (○)

температуры плазменного облучения концентрация дейтерия в приповерхностном слое уменьшается, но при этом наблюдается возрастание концентрации дейтерия на глубине, измеряемой несколькими микронами. После плазменного облучения при $T_{обл}$ = 503—543 К дейтериевые профили демонстрируют протяженные «хвосты» распределения, достигающие границ раздела карбид вольфрама—подложка (на глубине 4,5—5 мкм), с значением дейтериевой концентрации около 2% ат. (см. рис. 3). Таким образом, для $T_{обл}$ в интервале от 300 до ~540 К количество дейтерия, аккумулированного в объеме карбид-вольфрамовых покрытий, увеличивается с возрастанием температуры облучения вследствие диффузии атомов дейтерия в объем материала, где они захватываются предположительно углеродными включениями. При $T_{обл}$ свыше 550 К концентрация дейтерия в объеме карбидов вольфрама начинает уменьшаться с возрастанием температуры облучения. Достаточно высокая температура, при которой концентрация дейтерия начинает уменьшаться, обусловлена, по-видимому, удержанием атомов дейтерия углеродными включениями.

Основываясь на измеренных профилях распределения и предполагая, что эти профили согласуются с диффузионными профилями, можно оценить величину диффузии дейтерия в покрытиях из карбидов вольфрама. Для случая постоянной концентрации дейтерия C_0 в приповерхностном слое, реализуемой в случае длительного облучения ионами дейтерия, концентрация дейтерия $C(x)$ на глубине x описывается уравнением

$$C(x) = C_0\left[1 - \mathrm{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)\right], \qquad (1)$$

где $\mathrm{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$ — функция ошибок; D — коэффициент диффузии дейтерия; t — время облучения [18].

Это уравнение использовалось для расчета профилей дейтерия, при этом концентрация C_0 и значение коэффициента диффузии дейтерия менялись таким образом, чтобы расчетные и измеренные профили совпадали (см. рис. 3). Следует отметить, что оценка коэффициентов диффузии была проведена после плазменных облучений при $T_{обл} \le 543$ К, поскольку при большой температуре облучения концентрация дейтерия практически постоянна по глубине и не может быть описана уравнением (1). Полученные для различных температур облучения значения коэффициента диффузии дейтерия в покрытиях из карбидов вольфрама W_2C и WC с содержанием свободных атомов углерода около 10% ат. описываются выражением

$$D = 1{,}33\cdot10^{-1}\exp\{-E_м/RT\}\ \text{м}^2/\text{с}, \qquad (2)$$

в котором энергия активации миграции $E_м$ составляет 123 ± 10 кДж/моль (рис. 4). Поскольку коэффициент диффузии дейтерия практически не зависит от стехиометрии карбида вольфрама, то можно предположить, что диффузия атомов дейтерия происходит, главным образом, по границам зерен карбидов W_2C и WC.

Отметим, что по сравнению с поликристаллическим вольфрамом дейтерий в карбидах вольфрама диффундирует значительно медленнее (см. рис. 4).

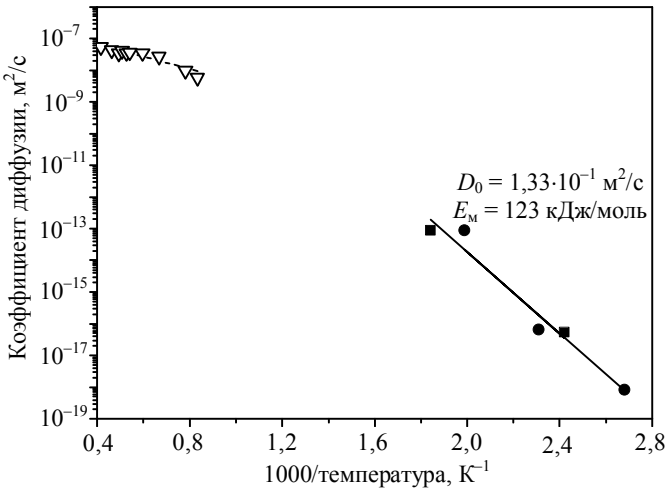

Рис. 4. Коэффициенты диффузии дейтерия в химически осажденных из газовой фазы карбидах вольфрама W_2C и WC, полученные подгонкой профилей, рассчитанных с помощью диффузионного уравнения (1), к экспериментально измеренным кривым распределения дейтерия по толщине материала. Для сравнения также показаны значения коэффициента диффузии водорода в вольфраме [19]: ▽ — поликристаллический W (Frauenfelder, 1969); ● — осажденный из газовой фазы W_2C ($W_{60}C_{40}$); ■ — осажденный из газовой фазы WC ($W_{45}C_{55}$)

ВЫВОДЫ

Облучение покрытий из карбидов вольфрама W_2C и WC с содержанием свободных атомов углерода (т.е. несвязанных химически с атомами вольфрама) около 10% ат., полученных методом химического осаждения из газовой фазы, ионами дейтерия с энергией от нескольких сотен эВ до нескольких кэВ приводит к накоплению дейтерия только в виде атомов. Атомы дейтерия удерживаются, главным образом,

включениями углерода. Отсутствие молекул дейтерия может быть объяснено как малой вероятностью формирования вакансионных комплексов и микрополостей в карбидной решетке, так и низким значением коэффициента рекомбинации водорода на поверхности карбида вольфрама.

При облучении химически осажденных покрытий низкоэнергетической (~200 эВ/D) дейтериевой плазмой при повышенной температуре наблюдается возрастание концентрации дейтерия на глубинах, измеряемых несколькими микронами. Независимо от стехиометрии карбида вольфрама, при температуре 503—543 К дейтериевые профили демонстрируют протяженные хвосты распределения, достигающие границ раздела карбид вольфрама—подложка (на глубине 4,5—5 мкм), с значением дейтериевой концентрации в объеме покрытия около 2% ат.

Коэффициент диффузии дейтерия в этих покрытиях описывается выражением $D = 1{,}33\cdot10^{-1}\exp\{-(123 \pm \pm 10$ кДж/моль$)/RT\}$ м^2/с. Коэффициент диффузии практически не зависит от стехиометрии карбида вольфрама, поэтому можно предположить, что диффузия атомов дейтерия происходит, главным образом, по границам зерен карбидов W_2C и WC.

Работа, выполненная в ИФХЭ РАН, поддержана Международным научно-техническим центром, проект № 2805.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Federici G., Andrew P., Barabaschi P., Brooks J., Doerner R., Geier A., Herrmann A., Janeschitz G., Krieger K., Kukushkin A., Loarte A., Neu R., Saibene G., Shimada M., Strohmayer G., Sugihara M.** Key ITER plasma edge and plasma-material interaction issues. — J. Nucl. Mater., 2003, vol. 313—316, p. 11—22.
2. **Luthin J., Linsmeier Ch.** Carbon films and carbide formation on tungsten. — Surf. Sci., 2000, vol. 454—456, p. 78—82.
3. **Luthin J., Linsmeier Ch.** Influence of oxygen on the carbide formation on tungsten. — J. Nucl. Mater., 2001, vol. 290—293, p. 121—125.
4. **Shimada T., Ueda Y., Nishikawa M.** Mechanism of blister formation on tungsten surface. — Fusion Eng. Design, 2003, vol. 66—68, p. 247—251.
5. **Shimada T., Funabiki T., Kawakami R., Ueda Y., Nishikawa M.** Carbon behavior on tungsten surface after carbonand hydrogen mixed beam irradiation. — J. Nucl. Mater., 2004, vol. 329—333, p. 747—751.
6. **Ueda Y., Fukumoto M., Sawamura I., Sakizono D., Shimada T., Nishikawa M.** Carbon impurity behavior on plasma facing surface of tungsten. — Fusion Eng. Design, 2006, vol. 81, p. 233—239.
7. **Tanabe T., Ohgo T., Wada W., Rubel M., Philipps V., von Seggern J., Ohya K., Huber A., Pospieszczyk A., Schweer B., TEXTOR Team.** Material mixing on W/C twin limiter in TEXTOR-94. — Fusion Eng. Design, 2000, vol. 49—50, p. 355—362.
8. **Hilderbrandt D., Wienhold P., Schneider W.** Mixed-material coating formation on tungsten surfaces during plasma exposure in TEXTOR-94. — J. Nucl. Mater., 2001, vol. 290—293, p. 89—93.
9. **Maier H., Krieger K., Balden M., Roth J., ASDEX Upgrade Team.** Erosion and deposition in the ASDEX upgrade tungsten divertor experiment. — J. Nucl. Mater., 1999, vol. 266—269, p. 1003—1008.
10. **Alimov V.Kh., Komarov D.A.** Deuterium retention in carbon and tungsten-carbon mixed films deposited by magnetron sputtering in D_2 atmosphere. — J. Nucl. Mater., 2003, vol. 313—316, p. 599—603.
11. **Yoshida Y., Taniguchi M., Yokoyama K., Yamauchi Y., Hirohata Y., Akiba M., Hino T.** Deuterium retention in carbon dust and carbon-tungsten mixed dust prepared by deuterium arc discharge. — J. Nucl. Mater., 2004, vol. 329—333, p. 790—794.
12. **Katayama K., Kawasaki T., Manabe Y., Nagase H., Takrishi T., Nishikawa M.** Hydrogen retention in carbon—tungsten co-deposition layer formed by hydrogen RF plasma. — Thin Solid Films, 2006, vol. 506—507, p. 188—191.
13. **Alimov V.Kh., Komarov D.A., Roth J., Mayer M., Lindig S.** Deuterium retention in sintered boron carbide exposed to a deuterium plasma. — J. Nucl. Mater., 2006, vol. 349, p. 282—290.
14. **Alimov V.Kh., Chernikov V.N., Zakharov A.P.** Depth distribution of deuterium atoms and molecules in beryllium implanted with D ions. — J. Nucl. Mater., 1997, vol. 241—243, p. 1047—1051.
15. **Alimov V.Kh., Mayer M., Roth J.** Differential cross-section of the D(^{3}He, p)^{4}He nuclear reaction and depth profiling of deuterium up to large depths. — Nucl. Instr. and Meth., 2005, vol. B 234, p. 169—175.
16. **Alimov V.Kh., Roth J., Causey R.A., Komarov D.A., Linsmeier Ch., Wiltner A., Kost F., Lindig S.** Deuterium retention in tungsten exposed to low-energy, high-flux clean and carbon-seeded deuterium plasmas. — J. Nucl. Mater., 2008 (in press).
17. **Ogorodnikova O.V., Roth J., Mayer M.** Deuterium retention in tungsten in dependence of the surface conditions. — J. Nucl. Mater., 2003, vol. 313—316, p. 469—477.
18. **Бокштейн Б.С.** Диффузия в металлах. — М.: Металлургия, 1978. 248 с.
19. **Frauenfelder R.** Solution and diffusion of hydrogen in tungsten. — J .Vac. Sci. Technol., 1969, vol. 6, p. 388—397.

Статья поступила в редакцию 3 марта 2008 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2008, вып. 4, с. 31—36.