

УДК 533.924

ЗАХВАТ ДЕЙТЕРИЯ В ГРАФИТ МПГ-8 И УГЛЕВОДОРОДНЫЕ ПЛЁНКИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ДЕЙТЕРИЕВОЙ ПЛАЗМОЙ

В.И. Бурлака, Ю.М. Гаспарян, А.А. Писарев, И.В. Визгалов, А.А. Русинов, С.А. Крат (Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия)

В работе представлены результаты измерений термодесорбционных спектров и количества дейтерия, захваченного в графит МПГ-8 и соосаждаемые углеродные плёнки при облучении плазмой магнетронного разряда. Количество захваченного дейтерия в графит зависит от механической обработки поверхности, оно больше для более рельефной поверхности. Газовыделение дейтерия наблюдается в диапазоне 400—1500 К. Спектры из плёнок лежат в том же диапазоне температур и имеют похожее положение пиков. Электронно-микроскопический анализ поверхности образцов после облучения показал сильную модификацию в обоих режимах. Делается вывод, что центры захвата дейтерия в графите, модифицированном облучением ионами плазмы, и углеводородных плёнках, растущих под облучением, одинаковы.

Ключевые слова: захват, дейтерий, графит, углеводородные плёнки, магнетронный разряд, термодесорбция.

DEUTERIUM TRAPPING IN GRAPHITE MPG-8 AND CARBON FILMS GROWING UNDER IRRADIATION BY DEUTERIUM PLASMA. V.I. BURLAKA, Yu.M. GASPARYAN, A.A. PISAREV, I.V. VIZGALOV, A.A. RUSINOV, S.A. KRAT. Results of deuterium thermal desorption measurements and deuterium trapping in graphite MPG-8 and co-deposited carbon films during magnetron plasma irradiation are given. Trapping in graphite depends on the degree of mechanical treatment of the surface, it is higher for the surface with developed relief. Thermal desorption spectra are in the range of 400—1500 K. Desorption from films takes part in the same temperature range and have similar positions of peaks. Electron microscopy analysis of irradiated surfaces demonstrated strong modification in both regimes. It is concluded that deuterium trapping centers in graphite, which is modified by plasma ions, and those in films, which grow under plasma ion irradiation, are similar.

Key words: retention, deuterium, graphite, hydrocarbon films, magnetron discharge, thermal desorption spectroscopy.

ВВЕДЕНИЕ

Углеродные материалы наряду с бериллием и вольфрамом предлагается использовать в качестве материалов для обращённых к плазме компонентов реактора ИТЭР (International Thermonuclear Experimental Reactor). Так, в областях, на которые должны приходиться максимальные тепловые потоки, планируется установить мишени из углеродного композита (по крайней мере, до начала работы с тритием) [1, 2].

Основным недостатком углеродных материалов является их высокая сорбционная способность, приводящая к накоплению изотопов водорода, в том числе радиоактивного трития. Другим фактором, ограничивающим использование углеродных материалов, является химическое распыление, в результате которого возможно переосаждение углеводородов, что часто приводит к образованию плёнок. Этот процесс может оказаться определяющим с точки зрения накопления изотопов водорода в условиях ИТЭР [3, 4].

В настоящее время имеется большое количество работ [5—7], связанных с изучением захвата водорода в углеродные материалы. Однако результаты, полученные в этих работах, часто разнятся между собой, что в значительной степени связано с условиями проведения экспериментов. Сравнительные эксперименты [8] по термодесорбции (ТДС) из углеродных материалов, облучённых в различных плазменных установках, показали отличия в ТДС, несмотря на то, что энергия, потоки, дозы и температура были примерно одинаковы. Это свидетельствует о необходимости более детального исследования процессов, сопровождающих захват изотопов водорода при облучении в плазме.

В работе описана установка для облучения образцов в плазме магнетронного разряда, представлены экспериментальные данные о захвате и десорбции дейтерия, внедренного в графит в условиях его преимущественного распыления и преимущественного осаждения углерода на него, а также результаты анализа модификации поверхности образцов после выдержки в плазме.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальная установка. Экспериментальная установка «Магнетрон» была создана для изучения процессов захвата дейтерия в различные материалы, транспорта распылённого материала в плазме с магнитным полем и последующего переосаждения материала, в том числе соосаждения с дей-

териум. Общая схема установки представлена на рис. 1. Откачка установки осуществляется турбомолекулярным насосом Pfeiffer TPU 082 10 с форвакуумным НВР-4,5Д 13. Между насосами стоит адсорбционная ловушка 12, которая позволяет минимизировать попадание паров масла из форвакуумного насоса в вакуумный объём камеры. Предельное остаточное давление в камере не менее $1 \cdot 10^{-5}$ мбар.

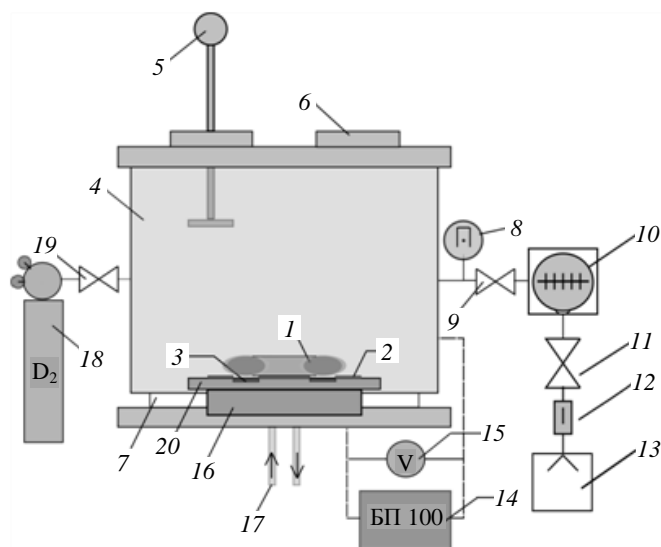


Рис. 1. Схема установки «Магнетрон», используемой для облучения: 1 — область разряда; 2 — маска; 3 — образцы; 4 — камера; 5 — ввод движения; 6 — окошко; 7 — изолятор; 8 — магнитный электроразрядный преобразователь; 9, 11 — проходной клапан; 10 — ТМН; 12 — ловушка; 13 — форнасос; 14 — блок питания; 15 — вольтметр; 16 — магнетронный узел; 17 — водяное охлаждение; 18 — баллон D_2 с редуктором; 19 — натекаль; 20 — катод

Основным элементом установки является планарный магнетрон 16, в котором плазма генерируется вблизи катода 20. Он устанавливается на отдельном фланце и изолируется от камеры при помощи фторопластового изолятора 7, который является также и вакуумным уплотнением. Для охлаждения катода в процессе облучения предусмотрено водяное охлаждение 17. В качестве основного рабочего газа используется дейтерий, подаваемый в камеру из баллона 18 через натекаль 19.

Магнетрон изготовлен по классической схеме [9] с постоянным кольцевым магнитом, расположенным под катодом 20 с магнитопроводом в его центре. Магнит создаёт поле арочного типа над поверхностью катода. Силовые линии электрического поля вблизи катода направлены по нормали к его поверхности. Разряд имеет форму кольца, прижатого к катоду в области, где электрическое поле и магнитное поле перпендикулярны. Анодом являются стенки вакуумной камеры 4. Напряжение зажигания разряда 550 В, напряжение горения разряда 450—500 В.

Конструкция катода позволяет облучать одновременно большое количество образцов, находящихся как в сходных, так и различных условиях. Образцы могут устанавливаться как в разных местах на катоде, так и вне катода. В первом случае образцы облучаются плазмой в различных условиях, во втором могут находиться либо под нулевым потенциалом и не облучаться ионами плазмы, либо под потенциалом смещения и облучаться ионами плазмы. Таким образом, возможно изучение захвата дейтерия и осаждения дейтерия и материала катода в различных условиях.

В экспериментах, описанных в данной работе, образцы 3 устанавливались на поверхности катода 20 на окружности, которая соответствовала максимальной плотности плазмы. Для улучшения контакта с поверхностью и лучшего теплоотвода образцы поджимались к катоду при помощи молибденовых лапок.

При длительном облучении поверхность катода может сильно эродировать, а его материал активно распыляться и переноситься, в том числе на поверхность образцов. Для защиты поверхности катода, а также для измерения тока на образцы катод был накрыт маской с отверстиями над образцами. В качестве материала для маски использовались либо молибден, либо углерод (графитовая бумага «Раруех»). Молибден имеет небольшой коэффициент распыления, что снижает потенциально возможное поступление примесей на образцы. Углерод в качестве маски использовался для полного подавления поступления металлических примесей на образцы.

Значение ионного тока в процессе облучения, приходящего на образцы, измерялось при помощи двух контрольных образцов, расположенных аналогично экспериментальным образцам, но изолированных от катода и маски.

Процедура эксперимента состояла в следующем: после откачки камеры до давления $1 \cdot 10^{-5}$ мбар в рабочий объём напускался дейтерий до давления $\sim 10^{-2}$ мбар. После этого на катод подавалось напряжение и зажигался стационарный магнетронный разряд. В процессе экспериментов дозы облучения менялись от $5 \cdot 10^{23}$ до $5 \cdot 10^{24}$ ион/м². Время облучения составляло от 1 до 5,5 ч. Температура образцов не превышала 200 °С. Состав ионов (D^+ , D_2^+ , D_3^+) в данной работе не измерялся, однако в эксперимен-

тах [10], проведённых в аналогичных условиях, предполагалось, что в основном это ионы D_2^+ . Энергия ионов, бомбардирующих катод, составляет порядка 90% от напряжения на разряде, т.е. 400—450 эВ.

Подготовка образцов. Образцы вырезались из мелкозернистого прессованного графита МПГ-8 (плотность 1,85 г/см³), размер образцов 1×1×0,1 см. Данный материал, как и многие другие графиты, имеет пористую структуру. При полировке в поры может забиваться графитовая пыль, которая имеет большое количество свободных связей и может влиять на захват водорода. В работе рассматривались образцы с различно подготовленной поверхностью. Часть была отшлифована грубой наждачной бумагой, после чего промыта в ультразвуковой ванночке. Эти образцы имели развитую поверхность с большим количеством открытых пор. Другие образцы полировались мелкой наждачной бумагой, после чего также промывались в ультразвуковой ванночке. Поверхность таких образцов была гладкой. Поры в этом случае оказываются забитыми мелкой сильно связанной углеродной пылью, которая остаётся после промывки. Далее мы будем называть эти образцы соответственно «грубо шлифованный» и «гладко полированный».

Измерения термодесорбции. После облучения образцы анализировались в термодесорбционном стенде, который детально описан в [11]. Он представляет собой сверхвысоковакуумную камеру ($1 \cdot 10^{-9}$ мбар) для измерения ТДС, соединённую через проходной клапан с загрузочной камерой. Внутри измерительной камеры находится нагреватель для образца. Измерительная камера и нагреватель прогреваются перед вводом образца в зону нагрева для устранения эффекта роста фоновых сигналов при измерении ТДС. Образец, подвешенный на тонких проводах термопары, вводится в камеру измерений без существенного ухудшения вакуума и линейно нагревается со скоростью 2 К/с до 1600 К. Десорбирующиеся газы регистрируются квадрупольным масс-спектрометром Pfeiffer Prisma 200M1. При нагреве до 1600 К изменение фона основных сигналов не значительно, что исключает необходимость контрольных экспериментов для определения фона. В стенде имеется блок калибровки для определения абсолютных значений потока десорбции дейтерия.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Термодесорбция дейтерия. На рис. 2, 3 приведены спектры термодесорбции дейтерийсодержащих молекул из образцов МПГ-8, облучённых ионами дейтерия дозой $5,5 \cdot 10^{23}$ ион/м². Показаны спектры, полученные с гладко полированным и грубо шлифованным образцом.

Анализ показал, что дейтерий, в основном, выходит в виде D_2 (4 а.е.м.), HD (3 а.е.м.) и в меньшей степени в виде тяжелой воды HDO (19 а.е.м.), D_2O (20 а.е.м.) и углеводородов CD_3H (19 а.е.м.), CD_4 (20 а.е.м.). ТДС-спектр дейтерия, захваченного в МПГ-8, располагается в широком диапазоне температур — от 400 до 1500 К. Можно видеть, что количество захваченного дейтерия для грубо шлифованного

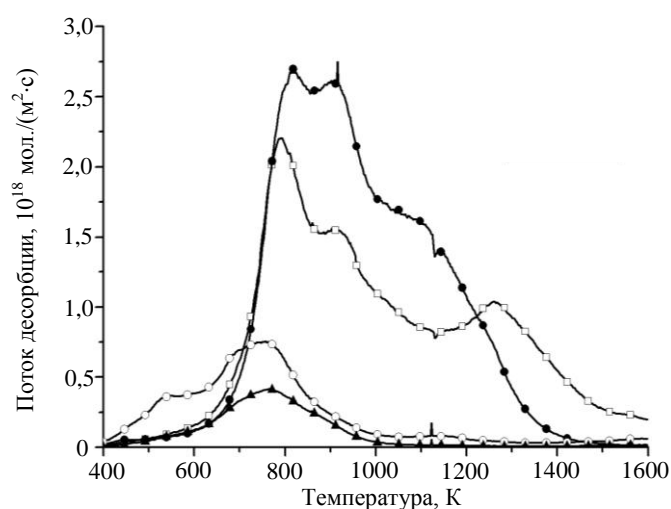


Рис. 2. ТДС дейтерийсодержащих молекул (D_2 , HD, HDO/ CD_3H , D_2O/CD_4) из гладко полированного образца. Доза облучения $5,5 \cdot 10^{23}$ ион/м² (молибденовая маска): —□— M3; —●— M4; —○— M19; —▲— M20

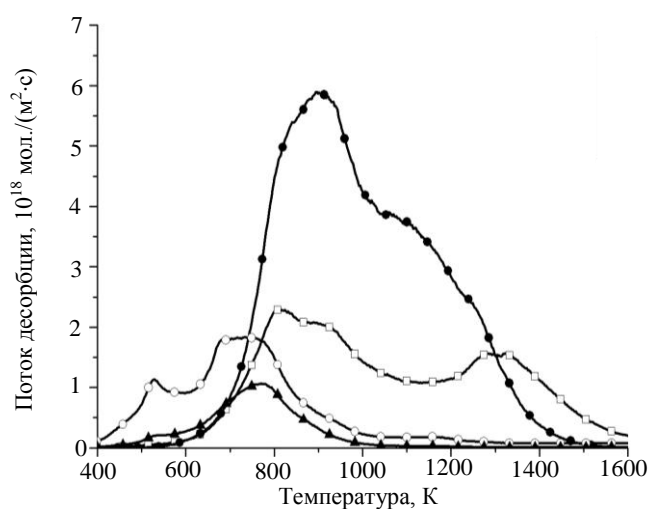


Рис. 3. ТДС выхода дейтерийсодержащих молекул (D_2 , HD, HDO/ CD_3H , D_2O/CD_4) из грубо шлифованного образца. Доза облучения $5,5 \cdot 10^{23}$ ион/м² (молибденовая маска): —□— M3; —●— M4; —○— M19; —▲— M20

образца в два раза больше, чем для гладко полированного ($3,1 \cdot 10^{21}$ D/m² и $1,6 \cdot 10^{21}$ D/m² соответственно). Спектр состоит из нескольких пиков. Максимум газовой выделенности D₂ наблюдается в районе 800—900 К, однако значительное количество дейтерия выходит также в высокотемпературной части спектра с максимумом при 1100 К. Максимальная скорость газовой выделенности 19-й и 20-й масс (HDO/CD₃H и D₂O/CD₄) соответствует 750—850 К. Пики газовой выделенности HD наблюдаются при 800—900 К, а также в районе 1250 К. Полученные спектры качественно хорошо согласуются с [12].

При облучении пиролитического графита ионами с энергией порядка несколько кэВ и дозами порядка несколько единиц 10²¹ ион/м² пирографит насыщается дейтерием, и количество захваченного дейтерия составляет порядка $2 \cdot 10^{21}$ D/m² [13]. При облучении плазмой такого насыщения обычно не наблюдается, что свидетельствует о транспорте дейтерия за пределы зоны торможения [14]. При дозах $5,5 \cdot 10^{23}$ ион/м² в наших экспериментах зона торможения насыщена. Увеличение дозы облучения до $5,4 \cdot 10^{24}$ ион/м², т.е. примерно в 10 раз, привело к тому, что полное количество захваченного дейтерия увеличилось в 1,5 раза ($1,55 \cdot 10^{21}$ D/m² и $2,55 \cdot 10^{21}$ D/m² соответственно), т.е. дейтерий продолжает накапливаться в образцах при высоких дозах.

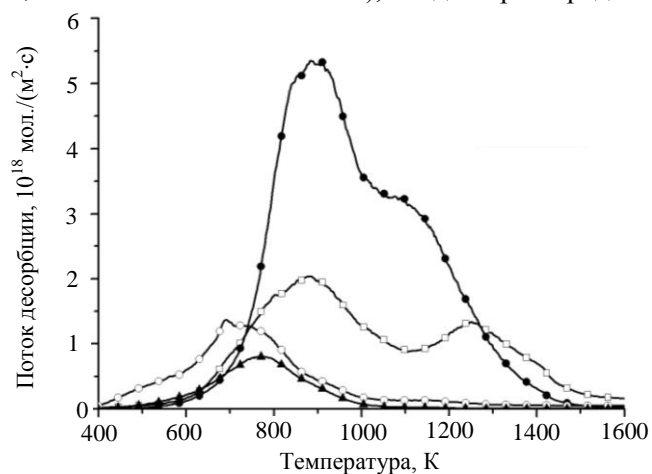


Рис. 4. ТДС выхода дейтерийсодержащих молекул (D₂, HD, HDO/CD₃H, D₂O/CD₄) из гладко полированного образца, доза облучения $5,4 \cdot 10^{24}$ ион/м² (молибденовая маска): —□— M3; —●— M4; —○— M19; —▲— M20

На рис. 4 представлен ТДС-спектр гладко полированного образца, который облучался высокой дозой. Видно, что положение и характер пиков в значительной степени сохранились.

Во второй серии экспериментов молибденовая маска была заменена на графитовую бумагу («Раруех»), а все подверженные распылению участки катода также были закрыты графитом. Помимо графитовых образцов, на катод были установлены тестовые образцы из вольфрама.

Поверхность вольфрамовых образцов после облучения под графитовой маской имела чёрный цвет и была покрыта слоем напылённого углерода толщиной несколько мкм. Таким же слоем, видимо, был покрыт и графитовый образец. В этих экспериментах углерод распылялся с графитового катода и осаждался на поверхность образцов в процессе облучения ионами дейтерия.

На рис. 5, 6 представлены спектры термодесорбции из гладко полированного образца и вольфрамового образца, которые одновременно облучались до дозы $5,4 \cdot 10^{24}$ ион/м² с использованием углеродной маски.

Видно, что ТДС из МПГ-8 (см. рис. 5) и вольфрамового образца (см. рис. 6) похожи как качественно, так и количественно. Это обусловлено тем, что накопление дейтерия в обоих случаях происходило в

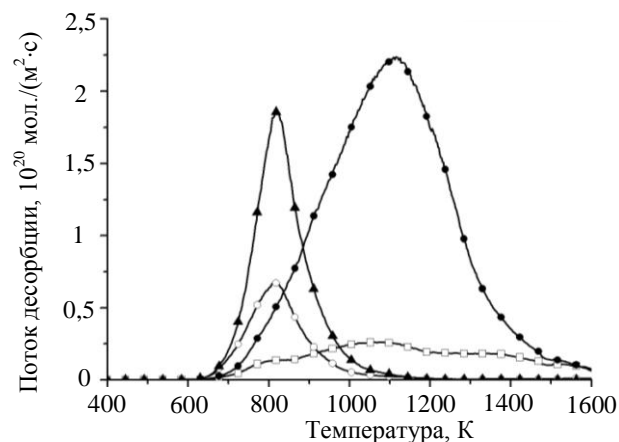


Рис. 5. ТДС выхода дейтерийсодержащих масс (D₂, HD, HDO/CD₃H, D₂O/CD₄) из гладко полированного графитового образца, который наполовину был закрыт вольфрамовым образцом. Доза облучения $5,4 \cdot 10^{24}$ ион/м² (графитовая маска): —□— M3; —●— M4; —○— M19; —▲— M20

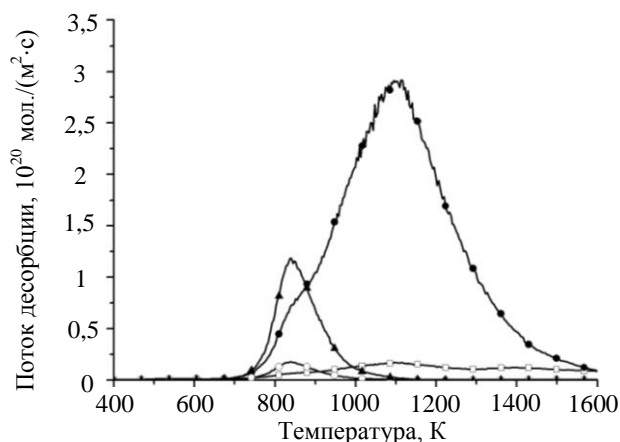


Рис. 6. ТДС выхода дейтерийсодержащих масс (D₂, HD, HDO/CD₃H, D₂O/CD₄) из вольфрама, который при облучении закрывал половину графитового образца (графитовая маска) —□— M3; —●— M4; —○— M19; —▲— M20

результате захвата ионноимплантируемого дейтерия в непрерывно растущую плёнку углерода на поверхности образцов, материал образца в данном случае имел слабое влияние. На рис. 7, *з* показано изображение поверхности W после ТДС. Можно видеть толстую углеродную плёнку толщиной 5—6 мкм, которая осталась на поверхности, но потрескалась при нагреве. Количество дейтерия, захваченного в этой серии экспериментов, в десятки раз больше по сравнению с экспериментами с молибденовой маской. Это обусловлено большой толщиной плёнки углерода. Концентрация дейтерия в плёнке была оценена как $D/C \approx 0,2$.

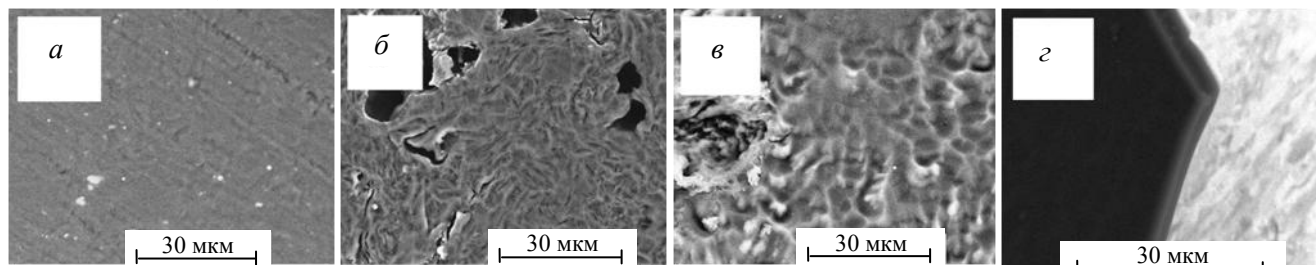


Рис. 7. Характерный вид полированного образца МПГ-8 до облучения (*а*), облучённого дозой $5,5 \cdot 10^{24}$ (маска — молибден) (*б*), облучённого дозой $5,5 \cdot 10^{24}$ (маска — графит) (*в*), углеродная плёнка на вольфрамовом образце после ТДС-анализа, (доза $5,5 \cdot 10^{24}$, маска — графит) (*з*)

Термодесорбционные спектры, полученные в экспериментах с молибденовой маской (см. рис. 4), отличаются от спектров, полученных с графитовой маской (см. рис. 5). Это связано с тем, что в первом случае мы имеем дело с внедрением ионов дейтерия в графит, во втором — с захватом ионов в плёнку углерода, растущую в присутствии облучения ионами дейтерия. Спектры десорбции из плёнки более гладкие. В частности, в спектре десорбции дейтерия из графита преобладает область в районе 900 К, в спектре десорбции из плёнки — более высокотемпературная область с максимумом при 1100 К.

Тем не менее термодесорбционные спектры в обеих сериях экспериментов имеют общие черты. В обоих случаях спектры расположены в одинаковом температурном диапазоне и вклад высокотемпературных пиков значителен. В обоих случаях можно сказать, что спектр состоит из нескольких пиков. В случае, когда эти пики разрешены достаточно хорошо, положения их максимумов близки в обоих экспериментах. Например, пики дейтерия при 800—900 и 1100 К, углеводородов при 750—800 К. Естественно, спектр из толстой плёнки более гладкий, и пики на нем почти не разрешаются, что вполне может быть объяснено выходом газа с разной глубины.

Наличие общих черт на спектрах из углерода и плёнки может быть связано с тем, что дейтерий в обоих случаях удерживается химическими связями с углеродом, которые одинаковые во всех углеродных материалах. В [15, 16], где проводился ТДС-анализ различных С—Н-плёнок, предполагается, что пик при 800—850 К соответствует выходу дейтерия, связанного с углеродом в sp^3 -гибридизации, пик при 1100 К соответствует связи с углеродом в sp^2 -гибридизации.

Модификация поверхности. Поверхности всех образцов как до облучения, так и после облучения изучались на растровом электронном микроскопе HITACHI TM-1000. На рис. 7, *а* представлен характерный вид поверхности гладко полированного образца до облучения. После длительного облучения на полированной поверхности открывались крупные поры размером 10—15 мкм (см. рис. 7, *б*), которые были видны на поверхности после грубой полировки. Это явление, скорее всего, можно связать с распылением углеродной пыли, образовавшейся в результате полировки и удаленной в процессе длительного облучения. Поверхность облучённого образца сильно отличается от исходной как для грубо шлифованной, так и для гладко полированной поверхности даже визуально. На поверхности в обоих случаях развивается характерный рельеф (см. рис. 7, *б*). Поверхностный слой графита при такой дозе облучения неизбежно модифицируется.

На рис. 7, *в, з* представлены также поверхность графитового и поверхность вольфрамового образца после ТДС-анализа в экспериментах с углеродной маской. На поверхности вольфрама после облучения под графитовой маской образуется толстая углеродная плёнка, толщина которой составляет около 6 мкм, которая устойчиво держится на поверхности образца. После прогрева образца плёнка растрескивается и отслаивается от подложки. На рис. 7, *з* показан край чёрной углеродной плёнки и светлая поверхность вольфрама после прогрева.

Поверхность графитового образца в первой серии экспериментов (см. рис. 7, б) и плёнки на графите во второй серии экспериментов (см. рис. 7, в) визуально аналогичны. Волнистая поверхность, похожая на поверхность графита, облучённого высокой дозой ионов дейтерия (см. рис. 7, б), часто встречается в экспериментах по облучению плазмой. Она отличается от исходной поверхности. Можно сказать, что это типичная поверхность графита, модифицированная низкоэнергетичным ионным облучением. Плёнка на графите (см. рис. 7, в) приобретает похожий волнистый рельеф, вероятно, также в силу радиационного воздействия ионов.

Поверхность плёнки на вольфраме гладкая в отличие от поверхности плёнки на графите. Вместе с тем термодесорбционные спектры этих плёнок одинаковы. Можно предположить, что отличие в топографии поверхности плёнок связано с различием материала подложек и исходного рельефа поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы захват и термодесорбция дейтерия из графита МПГ-8 с различно подготовленной поверхностью и модификация поверхности графита после облучения ионами дейтерия в условиях стационарного магнетронного разряда. Термодесорбционные спектры качественно схожи для образцов с гладко полированной поверхностью, на которой поры забиты мелкой графитовой пудрой, и грубо шлифованной поверхностью, на которой сохранилась открытая пористость, однако общее количество захваченного дейтерия в грубо шлифованных образцах вдвое больше. Спектры десорбции молекул D_2 и HD широкие, лежат в диапазоне 400—1500 К и состоят из большого количества близко расположенных пиков. С увеличением дозы облучения от $5,5 \cdot 10^{23}$ до $6 \cdot 10^{24}$ ион/м² количество захваченного дейтерия продолжает медленно возрастать.

Исследованы захват и термодесорбция дейтерия из углеродной плёнки, растущей в условиях облучения ионами дейтерия в плазме стационарного магнетронного разряда. Термодесорбционные спектры лежат в том же диапазоне температур, что и спектры, полученные при ионном внедрении, однако общее количество захваченного дейтерия в плёнке существенно больше. Можно предположить, что спектр состоит также из большого количества тех же пиков, что и при внедрении в графит, но эти пики не различаются из-за сравнительно большой толщины плёнки.

Предполагается, что свойства поверхности графита, модифицированного облучением ионами дейтерия, и свойства плёнки, растущей в условиях облучения ионами дейтерия, имеют общие черты, которые обусловлены тем, что дейтерий в обоих случаях захватывается на свободных углеродных связях.

REFERENCES

1. Skinner C.H., Haasz A.A., Alimov V.Kh. et al. — Fusion Science and Technology, 2008, vol. 54, pp. 891—945.
2. Roth J., Tsitron E., Philipps V. et al. — Plasma Phys. Control Fusion, 2008, vol. 50, p. 103001.
3. Haasz A.A., Davis J.W. — In: Nuclear Fusion Research, Understanding Plasma-Surface Interaction. Eds. R.E.H. Clark, D.H. Reiter. Springer, 2005, pp. 225—248.
4. Jacob W., Hopf C., Meier M. — In: Nuclear Fusion Research, Understanding Plasma-Surface Interaction. Eds. R.E.H. Clark, D.H. Reiter. Springer, 2005, pp. 249—285.
5. Roth J. et al. — J. Nucl. Mater., 2007, vol. 363—365, p. 822.
6. Hirohata Y., Shibahara T., Tanabe T. et al. — J. Nucl. Mater., 2005, vol. 337—339, p. 609.
7. Yoshikawa A., Hirohata Y., Oya Y. et al. — Fus. Eng. Design, 2006, vol. 81, p. 289.
8. Pisarev A., Tanabe T., Emmoth B. et al. — J. Nucl. Mater., 2009, vol. 390—391, pp. 677—680.
9. Kuzmichev A.I. Magnetron sputtering systems. — Kiev: Avers, 2008 (in Russian).
10. Alimov V.Kh., Komarov D.A., Roth J., Mayer M. et al. — J. Nucl. Mater., 2006, vol. 349, pp. 282—290.
11. Rusinov A.A., Gasparyan Yu.M., Perelygin S.F. et al. — Pribory i tekhnika eksperimenta (Instruments and experimental technique), 2009, № 6, pp. 116—121 (in Russian).
12. Rusinov A.A., Gasparyan Yu.M., Pisarev A.A. et al. — Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk. Ser. Fizicheskaya (Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Ser. Physical), 2008, vol. 72, № 7, pp. 1011—1014 (in Russian).
13. Mayer M. et al. — J. Nucl. Mater., 1998, vol. 252, pp. 55—62.
14. Roth J., Alimov V.Kh., Golubeva A.V. et al. — J. Nucl. Mater., 2007, vol. 363—365, pp. 822—826.
15. Schenk A., Winter B., Biener J. et al. — J. Appl. Phys., 1995, vol. 77, pp. 2462—2473.
16. Zecho T., Brandner B.D., Biener J. et al. — J. Phys. Chem. B, 2001, vol. 105, pp. 6194—6201.

AUTHORS

Burlaka V.I. National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia

Gasparyan Yu.M. National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia

Pisarev A.A. National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia

Vizgalov I.V. National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia

Rusinov A.A. National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia

Krat S.A. National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia

Received 5 April 2010
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2010, issue 2, pp. 33—38.