

Легко видеть, что в предельных случаях целых значений пространственно-временных размерностей D_0, D линейризованное уравнение (6) охватывает основные режимы эволюции среды. Так в случае $D_0=1$ оно описывает волновое движение при $D=1$, однородные колебания при $D=-1$ и локализованные при $D=0$ (соответственно, константа c равна квадрату скорости волны, квадрату частоты колебаний и произведению размера области локализации на частоту колебаний). В случае $D_0=0$ имеем уравнение Ландау-Халатника для сохраняющегося ($D=1$) и несохраняющегося ($D=-1$) ПП и уравнение бегущей волны ($D=0$) (в первом случае постоянная c сводится к коэффициенту диффузии, во втором - к обратному времени релаксации, в третьем - к скорости волны). И наконец, в статическом случае $D_0=-1$ получаем уравнение Пуассона при $D=1$, условие равновесия системы при $D=-1$ и уравнение типа дебаевского экранирования при $D=0$ (соответственно, величина c сводится к квадрату радиуса локализации, обратной восприимчивости $\frac{d\epsilon}{d\eta}$ и радиусу экранирования).

SUMMARY

The motion equation of fractal media with the nonideal memory and partial (non)conserving order parameter is obtained.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Олемской А.И., Флат Ф.Я. Использование концепции фрактала в физике конденсированной среды // УФН, 1993, 163, №12, с. 1-50.
2. Нигматуллина Р.Р. Дробный интеграл и его физическая интерпретация // ТМФ, 1992, 90, №3, с. 354-368.

Поступила в редколлегию 12 мая 1994 г.

УДК 621.039.531.

ТЕРМОДЕСОРБЦИЯ ДЕЙТЕРИЯ ИЗ ПИРОУГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Федоренко А.И., Коваленко И.А., Ханбеков Р.Г.*, Рыбалко В.Ф.**

* Институт ядерной физики АН Узбекистана,

** Харьковский физико-технический институт

ВВЕДЕНИЕ

Изучению процессов термоактивированной десорбции дейтерия, имплантированного в различные конструкционные материалы, посвящено много работ [1-5]. Это обусловлено ключевой ролью взаимодействия дейтерия с поверхностью материалов конструкций в установках термоядерного синтеза. Особый интерес представляет исследование изменений свойств углеродистых материалов при воздействии дейтериевой плазмы.

В работах [3,4] рассматривался вопрос термодесорбции дейтерия из графита МПГ-8 и пирографита. Показано [4], что при низкотемпературной термодесорбции пики на спектрограммах появляются только у графита МПГ-8. В работе [3] по спектрам термодесорбции были построены зависимости относительного количества дейтерия, удерживаемого при данной температуре в материале, от общего количества дейтерия,

имплантированного в этот же материал при $T_{\text{анн}} = 78\text{К}$. Такая же нормировка производилась исходя из предположения, что при $T_{\text{анн}} = 78\text{К}$ весь имплантированный дейтерий оставался захваченным в материале. Данные работ [3,4] послужили предпосылкой к дальнейшему исследованию термодесорбции и реэмиссии газов в различных углеродистых материалах. В настоящей работе изучены закономерности термодесорбции и реэмиссии дейтерия из пироуглеродных материалов после различной предварительной термообработки, облучения нейтронами и ионной имплантации дейтерия.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Имплантацию дейтерия с энергиями 800 эВ проводили на плазменной установке "ДРАКОН" (ХФТИ г.Харьков) [6,7]. Параметры облучения составляли: напряжение на катодах -1 кэВ, разрядный ток - 0,4 мА, рабочее давление при облучении стационарной плазмой - 3×10^{-3} Па.

На установке "СКИФ" (ХФТИ г.Харьков) облучение вели моноэнергетическим сепарированным пучком ионов D_2^+ , с энергией 25 кэВ. Плотность тока пучка составляла $30 + 40$ мкА см^{-2} , рабочее давление в камере - 2×10^{-4} Па. Облучение проводилось при комнатной температуре. Температуру образцов измеряли W-Re и хромель-алюмелевыми термопарами. Абсолютная погрешность измерения температуры не превышала $\pm 10^\circ\text{С}$. Исследуемые образцы были приготовлены из пироуглерода (ПУ), полученного из газовой фазы при 2100°С и пирографита (ПГ), термомеханически обработанного при 2800°С . Образцы представляли собой прямоугольные пластины размерами $16 \times 6 \times 2$ мм.

Измерение парциального давления дейтерия в камере облучения проводили с помощью масс-спектрометров АДМ-1 и МХ-73-04 в непрерывном режиме. Запись спектров термодесорбции при нагреве со

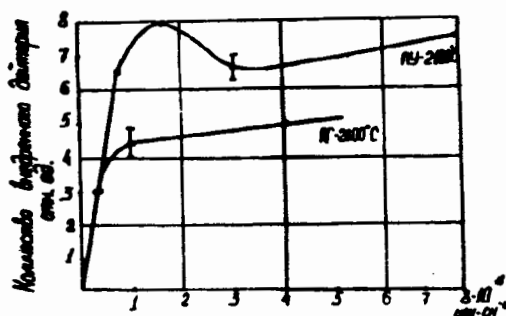


Рис.1 Зависимость количества внедренного дейтерия от интегрального потока ионов образцах пироуглерода /ПУ-2100/ и пирографита /ПГ-2800/

скоростью $5,4 \cdot \text{К} \cdot \text{с}^{-1}$ проводилась в координатах Р и Т, Р и t, где Р — парциальное давление в камере измерений, а Т и t — температура мишени и время нагрева соответственно образцов от 30°С до 2000°С .

На рис.1 приведена экспериментальная зависимость относительного измерения количества внедренного дейтерия от интегрального потока имплантируемых ионов в образцах пироуглерода и пирографита. Из полученных результатов видно, что при дозах облучения до $1 \cdot 10^{18}$ $\text{част} \cdot \text{см}^{-2}$ идет практически только захват имплантированного дейтерия в обоих

материалах. При дозах свыше $1 \cdot 10^{18}$ част.см⁻² наступает процесс насыщения дейтерием приповерхностного слоя пироуглеродных материалов. Следует отметить, что зависимости степени насыщения и количества внедренного дейтерия от дозы различны для различных материалов. В пирографите насыщение наступает при внедрении $4 \cdot 10^{18}$ част.см⁻², а для пироуглерода эта величина выше и равна $7 \div 8 \cdot 10^{18}$ част.см⁻². Различие величин насыщения этих материалов в два раза связано с отличием их структуры.

Структура пироуглерода представляет графит начальной стадией графитизации и упорядочения, а пирографит - это хорошо графитизированный с высокой степенью порядка порядка графит, имеющий структуру, близкую к структуре идеального монокристалла. Немонотонное изменение количества внедренного дейтерия от флюенса в пироуглеродах можно, по-видимому, связать с процессом насыщения дейтерием приповерхностного слоя образца пироуглерода ~8 отн. ед. при

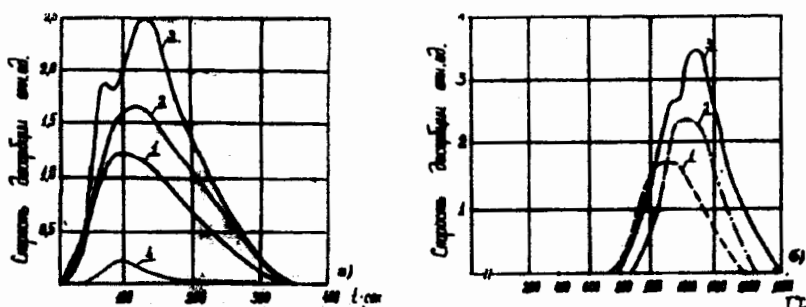


Рис. 2. Кинетические кривые термодесорбции дейтерия из пирографита в зависимости от:

а) времени нагрева,

б) температуры нагрева.

1 - $3 \cdot 10^{17}$ ион. см.⁻², 2 - $1 \cdot 10^{18}$ ион. см.⁻²,

3 - $4 \cdot 10^{18}$ ион. см.⁻², 4 - $4 \cdot 10^{20}$ ион. см.⁻²

дозах $1 \div 2 \cdot 10^{18}$ част.см⁻². Дальнейший спад и рост насыщения дейтерия при увеличении дозы можно объяснить диффузией дейтерия от поверхности пироуглерода в объем на большие расстояния. Происходит это после достижения критической величины концентрации дейтерия у поверхности и появления градиента концентрации.

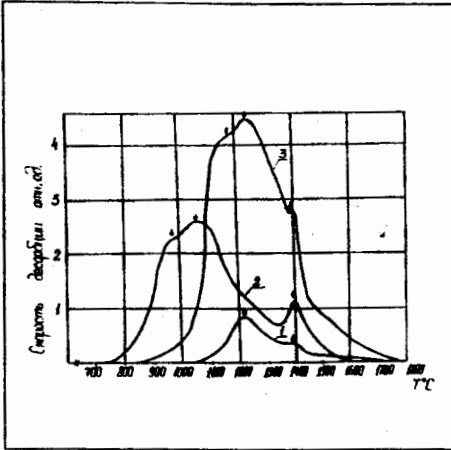
Была изучена термодесорбция дейтерия из пироуглеродных материалов, облученных ионами с энергией 25 кэВ до дозы $8 \cdot 10^{18}$ част.см⁻² и с энергией 8 кэВ до дозы $4 \cdot 10^{20}$ част.см⁻². На рис.2 а,б представлены кинетические кривые термодесорбции дейтерия из пирографита. Видно, что у образцов, облученных четырьмя различными дозами, термодесорбция начинается в интервале температур $700 \div 900^\circ\text{C}$ и завершается при 1800°C . В этом интервале температур имеется один широкий пик для всех трех спектров. При дозе облучения $4 \cdot 10^{18}$ част.см⁻² (кривая 3) появляется дополнительный пик со стороны меньших температур разогрева по отношению к основному пику газовой выделению. Обнаружено влияние дозы ионов на характер спектров. При увеличении дозы облучения ионами дейтерия термодесорбционные пики для пирографита смещаются в

область больших температур и наблюдается расщепление основного пика. На рис.26 представлены кривые термодесорбции во временном масштабе; дополнительная кривая 4 относится к образцу пирографита, облученному до доз $4 \cdot 10^{20}$ част. см.⁻² стационарной дейтериевой плазмой ($E_{\text{экт}} = 800$ эВ). Хотя доза облучения в этом случае выше на два порядка, а ток пучка на несколько порядков, количество внедренного дейтерия незначительно. Термодесорбционный пик на кривой 4 (рис.26) совпадает с результатами, полученными при других режимах облучения.

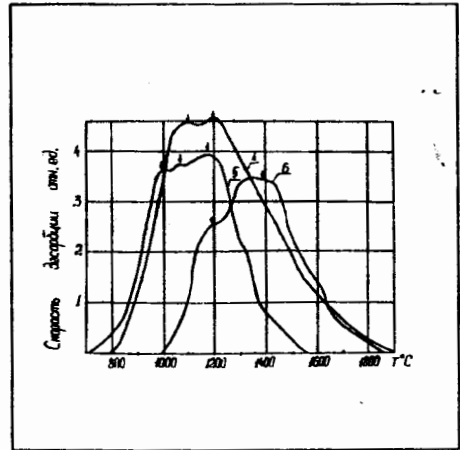
Полученные результаты показали, что термодесорбция дейтерия с поверхности пироуглеродных материалов зависит от условий облучения, в частности: от энергии бомбардирующих ионов, дозы облучения. Для изучения степени влияния на процессы термодесорбции дейтерия структуры пироуглеродных материалов облучались образцы пироуглеродов, полученные осаждением из газовой фазы при температуре 2100°C . На рис.3 показаны результаты термодесорбции дейтерия из образца пироуглерода, полученные после ионного облучения различными дозами ($E_{\text{экт}} = 25$ кэВ). При дозах облучения $1 \cdot 10^{17}$ част.см.⁻² были обнаружены два пика: основной пик при 1225°C и второй, появившийся при 1400°C . С повышением дозы облучения до $4 \cdot 10^{17}$ част.см.⁻² пик при 1400°C сохраняется, а основной смещается в область меньших температур, причем расщепляется на два пика. Дальнейшее облучение пироуглерода ионами дейтерия до $8 \cdot 10^{17}$ част.см.⁻² приводит к возврату основного пика в область больших температур, но характер кривой сохраняется. При дальнейшем увеличении дозы облучения $(1,6 \div 8) \cdot 10^{18}$ част.см.⁻² термодесорбционный пик при 1400°C исчезает, основной пик продолжает существовать в виде двух пиков. Основной пик в итоге смещается в область высоких температур со сглаживанием пика до формы плато (кривая 6). Таким образом, результаты по термодесорбции дейтерия из пироуглерода показывают, что имеются различия в кинетических кривых, полученных на образцах пирографита и пироуглерода с различными структурами.

Для изучения процессов взаимодействия ионов дейтерия с радиационными дефектами пироуглеродные образцы предварительно облучались нейтронами до доз $3 \cdot 10^{20} \div 4,5 \cdot 10^{20}$ нейтр.см.⁻² в температурном интервале $700 \div 800^\circ\text{C}$. Далее в эти образцы имплантировались ионы дейтерия до дозы $3 \cdot 10^{18}$ част.см.⁻². После этого изучалась термодесорбция дейтерия с поверхности пироуглерода. На рис.4 показана зависимость скорости выхода внедренного дейтерия от температуры предварительного облучения нейтронами. Сравнивая данные скорости десорбции из пироуглерода, предварительно облученного нейтронами ($T \approx 100^\circ\text{C}$) и необлученного (рис.1), видим, что результаты отличаются в пределах ошибки эксперимента. Возрастание температуры облучения нейтронами способствует увеличению количества внедренного дейтерия, и при температурах 550°C величина внедренного дейтерия достигает значения $9 \div 10$ отн.ед. На кривой скорости десорбции дейтерия из нейтронно-облученного образца пироуглерода при температуре $700 \div 800^\circ\text{C}$ (кривая 6 на рис.4) первый пик появляется при температуре десорбции 600°C . Далее при температурах $700 \div 800^\circ\text{C}$ величина скорости десорбции приближается к значениям скорости десорбции из образцов, облученных нейтронами при более низких температурах.

Термодесорбция дейтерия из предварительно облученных нейтронами образцов пироуглерода начинается при температурах $600 \div 800^\circ\text{C}$. При-



а)

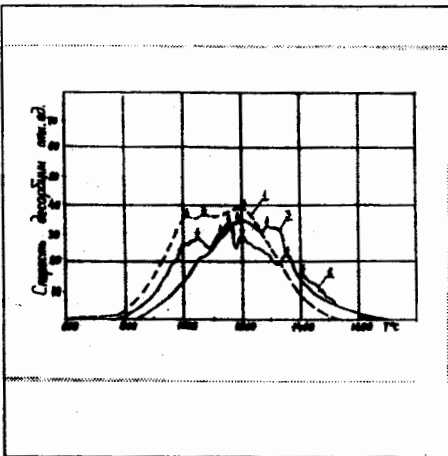


б)

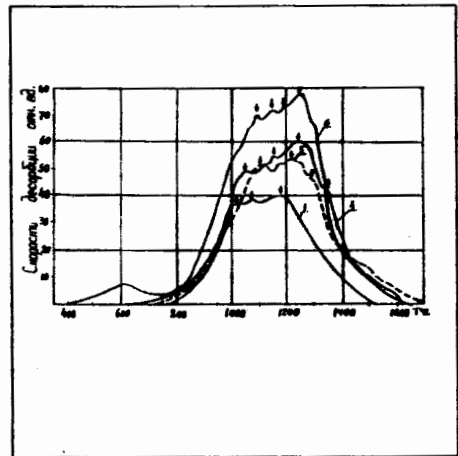
Рис. 3 Зависимость скорости термодесорбции дейтерия из пироуглерода от дозы имплантирования ионов:

- а) 1- $1 \cdot 10^{17}$ ионс/см²
 2- $4 \cdot 10^{17}$ ионс/см²
 3- $8 \cdot 10^{17}$ ионс/см²

- б) 4- $1,6 \cdot 10^{18}$ ионс/см²
 5- $3 \cdot 10^{18}$ ионс/см²
 6- $8 \cdot 10^{18}$ ионс/см²



а)



б)

Рис. 4 Зависимость скорости термодесорбции дейтерия из нейтроннооблученного пироуглерода от температуры нагрева:

- а) 1 - исходный пироуглерод
 2 - облученный нейтронами при $T=70-90^\circ\text{C}$
 3 - облученный нейтронами при $T=600^\circ\text{C}$
 б) 4 - облученный нейтронами при $T=410^\circ\text{C}$
 5 - облученный нейтронами при $T=550^\circ\text{C}$
 6 - облученный нейтронами при $T=700-800^\circ\text{C}$

чем, в отличие от термодесорбции из пироуглерода без предварительного облучения спектр термодесорбции нейтроннооблученных образцов имеет большое число пиков. Максимальное число пиков газыделения наблюдается для образцов, облученных нейтронами при $700 \div 800^\circ\text{C}$. С увеличением температуры образцов при облучении нейтронами (рис. 4а,б) число пиков уменьшается, и спектр термодесорбции становится похожим на спектр термодесорбции, полученный на пироуглеродных образцах без предварительного нейтронного облучения, т.е. проявляется основной пик с большим числом расщепленных пиков на нем. Тем не менее, облучение нейтронами пироуглерода при температурах $700-800^\circ\text{C}$ способствует появлению еще одного дополнительного пика термодесорбции внедренного дейтерия при температуре нагрева образца 600°C .

ВЫВОДЫ

1. Обнаружено как качественное, так и количественное различие спектров термодесорбции ионно-имплантированного дейтерия из пирографита и пироуглерода, что обусловлено отличием их структур.

2. При увеличении дозы облучения ионами дейтерия термодесорбционные пики в случае пирографита смещаются в область больших температур, и наблюдается расщепление основного пика.

3. Предварительное нейтронное облучение образцов пироуглерода при разных температурах (от 70° до 800°C) приводит к изменению спектров термодесорбции ионно-имплантированного дейтерия. Причем, наибольшее отличие наблюдается в случае образцов, облученных нейтронами при температуре $70 \div 80^\circ\text{C}$. С ростом температуры нейтронного облучения различие спектров термодесорбции уменьшается, что, по-видимому, обусловлено отжигом радиационных дефектов, вводимых в пироуглеродный материал нейтронами.

SUMMARY

The authors learned thermodesorption of deuterium, introducing into pyrographite with help monoenergetical ionic beam and by irradiation of stationary plasma. They explained, that independent from dose of irradiation deuterium gas emission begins at temperature 1080 K and finishes at 2000 K. Maximum of deuterium extraction on the thermodesorption curve discloses near 1300 K, 1425 K and 1450 K. Conditions of irradiation are not influence on position of maximums of gas emission to dose 10^{18} cm^{-2} . At the dose 10^{18} cm^{-2} splitation of spectra on the separate peaks is not observe. Was calculated quantity of deuterium introducing into pyrographite and activation energy of deuterium thermodesorption. The authors explained process, which brings to output deuterium from pyrographite at the difference temperature stages.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Платонов П.А., Писарев А.А. и др. Влияние облучения ионами дейтерия на топографию поверхности графита, ВАНТ, Сер.: ФРП и РМ, 1990, Вып. 3(54), стр. 27-34.
2. Гусева М.И., Мартыненко Ю.В. Эрозия поверхности материалов при облучении ускоренными частицами, ВАНТ, Сер.: ФРП и РМ, 1984, Вып. 1(29), стр. 187-200.
3. Ружыцкий В.В., Рыбалко В.Ф., Мозгин В.В. Термодесорбция дейтерия из бериллия, графита и углесталла, облученных ионами D_2 , с энергией 20 кэВ, ВАНТ, Сер.: ФРП и РМ, 1987, Вып. 1(2), стр. 11-14.
4. R.A. Langlay, R.S. Bierocr, J.J. Roth, Nucl. Mat.-1978, Vol. 76/77. - p. 313-321. Behavior of implanted D_2 and He_2 in Pyrolytic Graphite.
5. Ашрапов Т.Б., Абрусалимов Н.А., Артемов С.В., Федоренко А.И. и др. Изучение радиационного повреждения и поведение гелия в углеграфитовых материалах на пироуглеродной связке, ВАНТ, Сер.: ФРП и РМ, Вып. 2(1), 1982, стр. 53-58.
6. Бурченко П.Я., Волков Е.Д., Грибанов Ю.А. и др. Исследование эрозии материалов в разрядке с осциллирующими электронами, ЖТБ, 1985, т.55, Вып. 11, стр. 2134-2138.

Поступила в редколлегию 5 января 1994 г.

УДК 539.292

РОЗМІРНИЙ ЕФЕКТ В ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ ДВОШАРОВИХ ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ ПЛІВОК В УМОВАХ ВЗАЄМНОЇ ДИФУЗІЇ МЕТАЛІВ

Проценко І.Ю., Черноус А.М.

Сумський державний педагогічний інститут

ВСТУП

Широке застосування тонких металевих плівок в мікроелектроніці [1] і пов'язана з ним проблема стабільності характеристик плівкових елементів визначають значний інтерес до теоретичного і експериментального дослідження електрофізичних властивостей як одношарових, так і багатошарових металевих плівок. Фізична сторона явищ ускладнюється тією обставиною, що шари мають товщину та розміри кристалічних зерен сумірну з середньою довжиною вільного пробігу носіїв електричного струму, що обумовлює так звані розмірні ефекти в електрофізичних властивостях: внутрішні при розсіюванні носіїв на границі зерен та зовнішні при розсіюванні на зовнішніх поверхнях та границях розділу окремих шарів.

Теоретичний розрахунок опору і термічного коефіцієнту опору (ТКО) з досить складною задачею навіть для одношарової плівки. Вона значно ускладнюється при переході до двошарових та багатошарових систем, так як до всіх явищ, які мають місце в одношаровому зразку, добавляються явища розсіювання носіїв на границі розділу шарів та взаємної дифузії атомів металів. При цьому, в зв'язку з виникненням макронапружень термічного походження на границі розділу шарів, процеси дифузії протікають з суттєвими відмінами порівняно, наприклад, з масивними біметалевими пластинами.

В даній роботі приведені результати дослідження електрофізичних властивостей двошарових плівок Cr/Co, Co/Cr, Ni/Co та Co/Ni, для яких характерним є різний рівень макронапружень на границі розділу з підкладкою і між шарами та ступеню взаємної дифузії. Експериментальні результати порівнюються з розрахунковими, одержаними на основі теоретичної моделі Р.Дімміха [2] для ТКО, яка враховує як внутрішні, так і зовнішні розмірні ефекти, але не розглядає процеси взаємної дифузії металів. Цей недолік врахований в більш складній моделі Л.В. Дехтярука і Ю.А. Колісніченка [3], але одержані співвідношення мають велику кількість невизначених параметрів, що дозволяє провести лише якісне порівняння цієї моделі з експериментом.

1. ТЕОРЕТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ РОЗРАХУНКІВ ОПОРУ ТА ТКО ДВОШАРОВИХ ПЛІВОК

Систематичні дослідження електричних властивостей двошарових плівок започатковані М.С. Лукасом [4] на прикладі плівки Au/Au з границею розділу між шарами. Подальші теоретичні дослідження пов'язані з