

КУЗЬМИН Арсений Александрович

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ОЧИСТКЕ МАТЕРИАЛОВ
СТЕНОК ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК ОТ КИСЛОРОДА В
ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ**

01.04.08 – «Физика плазмы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва – 2011

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете
«МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Беграмбеков Леон Богданович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Будаев Вячеслав Петрович

кандидат физико-математических наук
Городецкий Александр Ефимович

Ведущая организация: Институт общей физики им. А.М.
Прохорова РАН

Защита состоится 27 января 2012 г. в 12 часов 00 минут на заседании
диссертационного совета Д 212.130.05 при НИЯУ МИФИ

по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, д.31, ауд. К-608.
тел. 8 (495) 323-95-26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан «27» декабря 2011 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном
экземпляре, заверенный печатью организации, по адресу 115409, Москва,
Каширское шоссе, д.31, НИЯУ МИФИ, диссертационный совет Д 212.130.05.

Ученый секретарь
диссертационного совета



И.В. Евсеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы

Наличие кислородной примеси в плазме термоядерных установок существенно снижает их энергетические и эксплуатационные параметры, усложняет управление установками и интерпретацию получаемых результатов. Большие количества кислорода накапливаются в процессе работы токамака в графитовых элементах первой стенки в осаждённых углеродных и углеродо-вольфрамовых слоях, что является фактором, препятствующим его удалению из плазмы в процессе подготовительных процедур. При последующем взаимодействии потока частиц и излучения плазмы с поверхностью графита в плазме оказывается большое количество кислорода. Это приводит к увеличению радиационных потерь из плазмы и, соответственно, к необходимости увеличить вкладываемую в плазму мощность. Другим отрицательным явлением в токамаках, обусловленным присутствием в плазме кислорода, является интенсивное распыление ионами кислорода поверхности первой стенки и загрязнение плазмы продуктами распыления. Эти и ряд других явлений, связанных с захватом и накоплением кислорода в контактирующих с плазмой графитовых элементах первой стенки определяют важность решения проблемы кислорода в плазме для современного этапа термоядерных исследований.

Данная работа является чрезвычайно актуальной, поскольку в ней проведено систематическое исследование параметров, закономерностей и механизмов захвата кислорода и водорода в графиты, облучаемые в водородной плазме с примесью кислорода, изучаются закономерности формирования углеродных и вольфрам-углеродных слоёв и захват в них кислорода и водорода и на этой основе разрабатывается методика удаления кислорода (кондиционирования первой стенки) с помощью облучения плазмой «чистящих» разрядов.

Объект исследования

В качестве объекта исследования служили углеграфитовый композит CFC N11 (Франция), пиролитический графит (PG 99), напылённые углеродные и углеродо-вольфрамовые слои на подложки из нержавеющей стали (12X18H10T), графита МПГ-8 и вольфрама (ВА)

Предмет исследования

Закономерности захвата кислорода и водорода в углеграфитовые материалы при облучении в водородной плазме с примесью кислорода; закономерности и методики удаления кислорода из углеграфитовых материалов при облучении в дейтериевой плазме; формирование углеродных и углеродо-вольфрамовых плёнок и захват водорода в них при облучении в плазме.

Цели и задачи исследования

Основной целью проведенной работы являлось исследование закономерностей захвата кислорода и водорода в углеграфитовые материалы облучаемые в водородной плазме с примесью кислорода; исследование процессов, определяющих удаление кислорода из углеграфитовых материалов при облучении в дейтериевой плазме и разработка методики его удаления; исследование формирования углеродных и углерод-вольфрамовых слоёв, напыляемых в плазме, и особенностей захвата ими кислорода и водорода.

Для достижения этой цели были сформулированы следующие задачи исследования:

1. Измерение параметров и изучение закономерностей захвата водорода в углеграфитовый композит CFC и пиролитический графит при облучении в водородной плазме с примесью кислорода.
2. Выявление закономерностей формирования углеродо-вольфрамовых плёнок, напылённых в плазме.
3. Исследование закономерностей захвата водорода и кислорода в углеродные и углеродо-вольфрамовые плёнки.
4. Изучение закономерности и разработка методики удаления кислорода из графитов при облучении в дейтериевом разряде.

Методы исследования

Для выполнения поставленных в данной работе задач в качестве основного метода экспериментальных исследований был выбран метод термодесорбционной спектроскопии, позволяющий измерять спектры термодесорбции (температурную зависимость десорбции газов), количество кислорода и изотопов водорода, удерживаемых в исследуемых образцах, и, анализируя полученные результаты, делать выводы о закономерностях захвата, удержания и десорбции водорода. Метод растровой электронной микроскопии был выбран для изучения морфологии поверхности напыляемых углеродных и углеродо-вольфрамовых слоев.

Научная новизна.

1. Установлены закономерности захвата водорода и кислорода в углеграфитовые материалы, контактирующие с водородной плазмой с примесью кислорода. В частности, экспериментально определены
 - зависимость захвата кислорода и водорода от концентрации кислородной примеси в плазме,
 - зависимость захвата кислорода и водорода от энергии облучающих ионов плазмы,
 - характер распределения захваченного кислорода по глубине.

2. Определён механизм захвата водорода в углеграфитовые материалы при появлении кислородной примеси в плазме.
3. Установлено, что удаление кислорода, имплантированного в углеграфитовые материалы, при их облучении ионами водорода происходит, в основном, за счёт распыления поверхностного слоя, содержащего атомы кислорода.
4. Определены закономерности удаления кислорода из углеграфитовых материалов. В частности, определены зависимости времени процесса и глубины распыляемого слоя от энергии ионов, температуры и типа материала.
5. Определены закономерности формирования углеродо-вольфрамовых слоёв, напыляемых в плазме, на подложки из нержавеющей стали, вольфрама и углерода. Определены толщины, после которых напыляемые слои начинают разрушаться, превращаясь, в конечном итоге, в пыль в условиях термоядерных установок.
6. Показано, что в тех случаях, когда углеродные и углеродо-вольфрамовые слои, напыляемые в плазме, не облучаются быстрыми атомарными частицами плазмы, захват водорода и кислорода в них происходит по «потенциальному» механизму, в основном, из молекул воды, сорбированных на поверхности слоя. Захват стимулируется ионами плазмы, активирующими поверхность слоёв.
7. Обнаружено, что захват кислорода и водорода из сорбированных молекул воды в углеродные слои увеличивается при увеличении активирующего поверхность потока ионов плазмы и уменьшается при увеличении потока молекулярного водорода, способствующего уменьшению концентрации молекул воды в поверхностном слое. Выявлена зависимость захвата водорода и кислорода в углеродные и углеродо-вольфрамовые слои от давления водорода.

Положения, выносимые на защиту:

1. Захват водорода и кислорода в углеграфитовые материалы, контактирующие с водородной плазмой, а также в углеродные и в углеродо-вольфрамовые слои, напыляемые в плазме, растёт при увеличении в ней концентрации кислородной примеси до определенной величины и спадает при дальнейшем её увеличении
 - 1.1. Рост захвата водорода при появлении в плазме кислородной примеси обусловлен тем, что атомы и ионы кислорода активируют поверхность углеграфитовых материалов и интенсифицируют потенциальный механизм захвата атомов водорода из водородосодержащих молекул, сорбированных на их поверхности.
 - 1.2. Уменьшение захвата водорода при увеличении концентрации кислородной примеси в плазме выше определённой величины

происходит, по-видимому, в результате того, что увеличивающийся поток кислорода на контактирующую с плазмой поверхность вытесняет с неё водородосодержащие молекулы, являющиеся основным источником захватываемого водорода.

2. При облучении графитов ионами водородной плазмы с примесью кислорода максимум распределения кислорода смещается на глубину, сравнимую с проективным пробегом ионов водорода, в результате его участия в каскадах смещения, создаваемых последними.
3. Удаление кислорода, имплантированного в углеграфитовые материалы, при их облучении ионами водорода происходит, в основном, за счёт распыления поверхностного слоя, содержащего атомы кислорода.
4. Толщина слоя, который необходимо распылить ионами водорода для удаления кислорода, имплантированного в графит, может оказаться значительно большей толщины слоя, содержащего кислород до начала облучения, в результате того, что максимум распределения кислорода, постоянно смещаясь по мере распыления поверхности, остаётся на примерно постоянном удалении от поверхности.
5. В тех случаях, когда углеродные и углеродо-вольфрамовые слои, напыляемые в плазме, не облучаются быстрыми атомарными частицами плазмы, захват водорода и кислорода в них происходит по «потенциальному» механизму, в основном, из молекул воды, сорбированных на поверхности слоя. Захват стимулируется ионами плазмы, активирующими поверхность слоёв.
6. Захват кислорода и водорода из сорбированных молекул воды в углеродные слои увеличивается при увеличении активирующего поверхность потока ионов плазмы и уменьшается при увеличении потока молекулярного водорода, способствующего уменьшению концентрации молекул воды в поверхностном слое.

Достоверность представленных результатов обеспечивается тем, что при проведении экспериментов использовалось современное исследовательское оборудование (спектрометры, датчики давления и др. оборудование), предварительно откалиброванное. Результаты проведённых экспериментов, в основном, согласуются с экспериментальными результатами ряда других авторов при их наличии.

Научная и практическая ценность.

В диссертационной работе впервые экспериментально определены основные закономерности захвата кислорода и водорода в углеграфитовые материалы, контактирующие с водородной плазмой с примесью кислорода. Определены закономерности захвата. Выявлены закономерности удаления

кислорода из углеграфитовых материалов при облучении в дейтериевом разряде.

Практическая значимость работы определяется тем, что в ней разработана методика удаления кислорода (кондиционирования) элементов первой стенки токамаков, выполненных из графита, с помощью облучения плазмой «чистящих» разрядов.

Апробация работы и публикации:

Основные экспериментальные результаты, приведенные в настоящей работе, были представлены на следующих конференциях: Европейская ядерная конференция – 2010 (European Nuclear Conference - 2010); Взаимодействие плазмы с поверхностью - 2008, 2010 (Plasma-Surface Interaction - 2008, 2010); Взаимодействие Ионов с поверхностью – 2009, 2011; Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами – 2008, 2009. Результаты также докладывались на Научной Сессии МИФИ 2007-2011; Курчатовской молодежной научной школе - 2008, 2009; Международной школе молодых ученых и специалистов "Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM-Junior" - 2008, 2009; Международной школе-семинаре по вакуумным, электронным и ионным технологиям – 2011 (Болгария); Всероссийской школе-семинаре «Функциональные наноматериалы для энергетики» - 2010, 2011.

Результаты опубликованы в виде статей в журналах «Вопросы атомной науки и техники», «Journal of Nuclear Materials», а также в трудах упомянутых конференций. По теме диссертационной работы было опубликовано 15 печатных работ, в том числе 7 статей в журналах, включенных ВАК РФ в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, и 8 тезисов докладов, опубликованных в сборниках тезисов национальных и международных конференций.

Личный вклад соискателя.

Автор лично проектировал, разрабатывал и изготавливал отдельные узлы экспериментальной Установки плазменного облучения и ТДС-анализа, провел ее модернизацию, принимал участие в разработке методики проведения экспериментов и обработке результатов. Автор лично проектировал, разрабатывал и изготавливал отдельные узлы экспериментальной Установки плазменного облучения и осаждения покрытий. Лично проводил эксперименты и обработку результатов экспериментов. Ему принадлежит основная роль в проведении анализа полученных результатов и составлении моделей. Постановка задач исследования и их интерпретация проведена совместно с научным руководителем и соавторами опубликованных работ.

Структура и объём диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка использованной литературы из 82 наименований литературных источников. Общий объём работы составляет 120 страниц и включает в себя 63 рисунка и 3 таблицы.

Основное содержание работы.

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, указана научная новизна и практическая ценность, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор работ, посвящённых изучению захвата и удержания кислорода и дейтерия в различных графитовых материалах при совместном облучении ионами кислорода и дейтерия в плазменных и ионно-пучковых установках. Проведённый анализ литературных данных показал, что, несмотря на всю важность проблем, связанных с присутствием малых примесей кислорода в плазме токамаков, до сих пор остаются слабо изученными особенности захвата и удержания водорода и кислорода в углеграфитовых элементах первой стенки термоядерных установок. Не разработаны физические основы и не предложены методы эффективного удаления кислорода, имплантированного в углеграфитовые материалы. Поэтому, было решено в диссертационной работе определить основные закономерности захвата водорода и кислорода в углеграфитовые материалы в водородной плазме с примесью кислорода, изучить формирование углеродных и углеродо-вольфрамовых плёнок и захват в них водорода и кислорода, а также исследовать механизм и разработать методику удаления кислорода из углеграфитовых материалов облучением в водородной плазме.

Вторая глава содержит описание экспериментов по изучению влияния кислородной примеси на захват дейтерия и кислорода в углеграфитовый композит (CFC) и обсуждение результатов экспериментов. Эксперименты проводились на установке Плазменного облучения и ТДС-анализа [1].

В этой установке проводилось облучение исследуемых образцов в плазме газового разряда, зажигаемом в установке с накалимым катодом (плотность плазмы $\sim 1 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$, температура электронов $\sim 5 \text{ эВ}$, степень ионизации $\sim 1 \cdot 10^{-4}$), и анализ десорбции газов из них методом термодесорбционной спектроскопии. Образцы из углеграфитового композита и пиролизического графита облучались в дейтериевой плазме потоком ионов ($\sim 85\%$ общего потока составляли ионы D_2^+ , $\sim 15\%$ - D^+ и D_3^+) с энергией от ~ 12 до 1000 эВ/ат , дозой $5 \cdot 10^{23} \text{ ат} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, с плотностью потока $10^{20} \text{ ат} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и $2 \cdot 10^{19} \text{ ат} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (для углеграфитового композита), при температурах 400 К (для углеграфитового композита), электронами со средней энергией 10 эВ , дозой $5 \cdot 10^{24} \text{ е}^- \cdot \text{м}^{-2}$ и плотностью потока $1 \cdot 10^{21} \text{ е}^- \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, потоком ионов O_2^+ (при

добавлении кислорода в рабочий газ) $\approx (0,1 \div 1) \cdot 10^{17} \text{ ат} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. При облучении на образцы приходил также поток атомов $4 \cdot 10^{18} \text{ Д} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Особенностью этой установки является возможность изменять в широких пределах энергию ионов без изменения параметров плазмы.

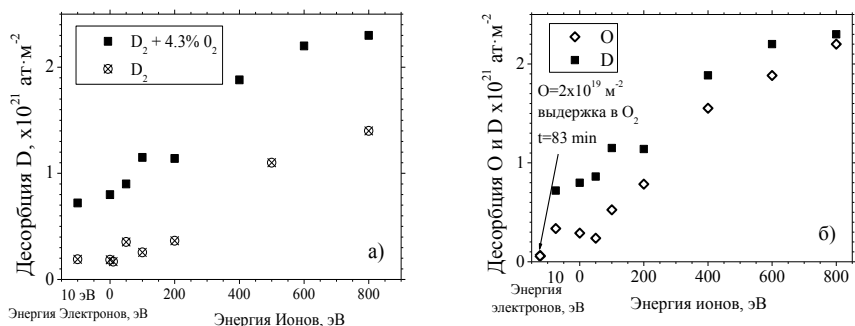


Рис. 1. а) Зависимость общей десорбции D из CFC, облученного электронами и ионами в $D_2 + 4.3\% O_2$ плазме и в чистой D_2 плазме, от энергии облучающих частиц б) Зависимость общей десорбции D и O из CFC, облученного электронами и ионами в $D_2 + 4.3\% O_2$ плазме от энергии облучающих частиц

Во время измерений термической десорбции образцы нагревались до температуры 1600 К по линейному закону со скоростью 5 К/сек. Десорбция дейтерия из образцов происходила в основном в составе молекул HD, D_2 , CD_4 ($\approx 99\%$ ат. общей десорбции дейтерия), кислорода – в основном в составе молекул CO ($\approx 90\%$ ат. общей десорбции кислорода)

Захват дейтерия и кислорода в CFC исследовался в зависимости от энергии облучающих ионов, концентрации кислородной примеси в плазме и дозы облучения.

На рис.1а. представлена зависимость общего количества десорбировавшихся атомов дейтерия от энергии облучающих ионов. ($j_i = 1 \cdot 10^{20} \text{ ат} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, $\Phi = 5 \cdot 10^{23} \text{ ат} \cdot \text{м}^{-2}$, $E_i = (10 \div 800) \text{ эВ}$, $j_e = 4 \cdot 10^{21} \text{ е}^- \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, $E_e = 10 \text{ эВ}$). Для сравнения приведена зависимость от энергии десорбции дейтерия из CFC, облучённого с такими же параметрами в D_2 плазме. Обе зависимости подобны. Вместе с тем, видно, что в присутствии кислорода захват дейтерия увеличивается (рис. 1а). Величина этого эффекта медленно меняется в исследованном диапазоне энергий облучающих ионов. Более того, значительное увеличение захвата наблюдается и при облучении электронами. [2].

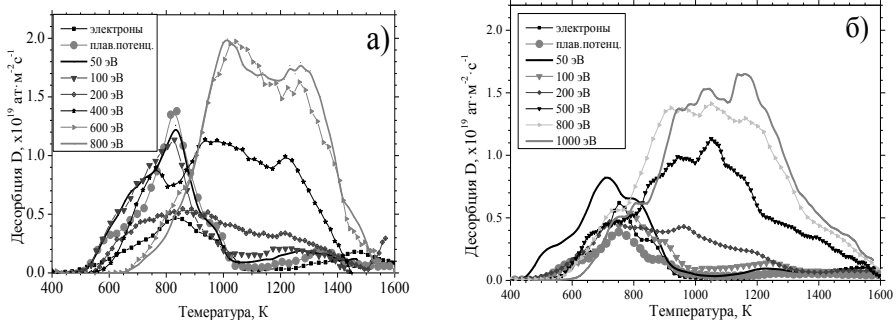


Рис. 2. Спектры ТД дейтерия из образцов, облученных ионами и электронами
 а) в $(D_2 + 4.3\%O_2)$ плазме, б) в D_2 -плазме. $j_i = 1 \times 10^{20} \text{ ат} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, $E_i = 50 \div 1000 \text{ эВ}$.

Наконец, форма ТДС-спектров дейтерия (рис. 2а и 2б) при совместном дейтериево-кислородном облучении остаётся такой же, как при облучении в водородной плазме, свидетельствуя о том, что кислород не стимулирует образование ловушек дейтерия нового типа.

Совокупность приведённых выше особенностей захвата дейтерия в CFC в $D_2 + 2\%O_2$ плазме показывает, что атомы и ионы кислорода, облучающие поверхность CFC, активируют механизмы, обеспечивающие захват водорода в CFC, описанные в работе [2], и не способствуют появлению новых механизмов захвата. В работе [2] было показано, что захват атомов дейтерия может происходить как за счёт кинетической энергии бомбардирующих частиц («кинетический» захват), так и в результате неупругих взаимодействий атомов и ионов водорода с материалами или молекул водорода и водородосодержащих молекул с поверхностью, активированной облучающими ионами, атомами водорода или электронами («потенциальный» захват).

Зависимость десорбции O от энергии повторяет зависимость десорбции D от энергии (рис.16). Причём, большое количество десорбирующегося кислорода (рис. 3) показывает, что кислород захватывается в слое в 5-10 раз большем, чем толщина зоны торможения, насыщение которой по данным работы [3] наступает при концентрации кислорода $O:C = 0,2-0,3$. Причина этого явления - участие кислорода в каскадах столкновений, порождаемых ионами дейтерия (об этом подробнее в Главе 3) и, возможно, ускоренная диффузия в разрушенной структуре насыщенной зоны торможения водорода.

Результаты измерений захвата кислорода и дейтерия в зависимости от концентрации кислорода в рабочем газе разряда представлены на рис.4.

Появление максимума на этой зависимости является следствием двух противоположных процессов, влияющих на захват дейтерия. С одной стороны, кислород, как было показано выше, активирует захват дейтерия. С

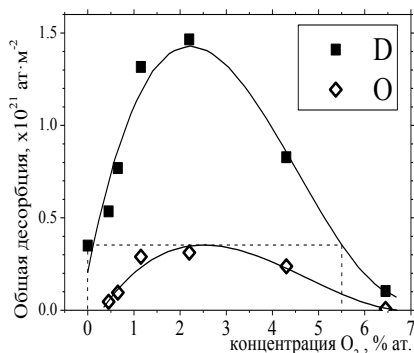


Рис. 4. Захват дейтерия и кислорода в зависимости от концентрации кислорода в плазме (поток 1×10^{20} ат/м²с, доза 5×10^{23} ат/м², энергия 50 эВ).

Причины изменения количества захваченного кислорода синхронно с изменением захвата водорода были рассмотрены выше.

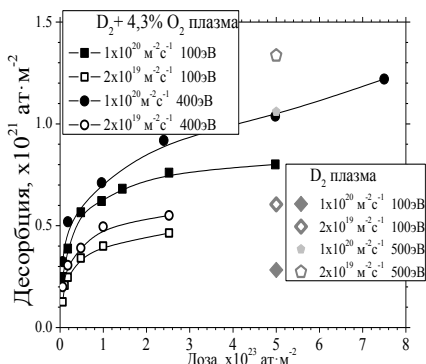


Рис. 5. Зависимость суммарной десорбции дейтерия из CFC, облученного в D₂+4.3%O₂ плазме от дозы и суммарная десорбция дейтерия из CFC, облученного в D₂ плазме (доза 5×10^{23} ат/м²).

Причиной этого могло оказаться следующее обстоятельство. При концентрации кислорода в рабочем газе, равной 4,3%, захват водорода уменьшается с дальнейшим ростом его концентрации, приводящим к увеличению его содержания в слое сорбции на облучаемой поверхности (рис. 4). Уменьшение плотности тока ионов дейтерия уменьшало ионно-стимулированную десорбцию кислорода с поверхности и, тем самым,

другой же стороны, кислород сорбируется поверхностью активнее дейтерия и концентрация дейтерия на поверхности уменьшается в присутствии кислорода. В работе [2] было показано, что слой поверхностной сорбции является основным источником захвата дейтерия по «потенциальному» механизму при энергии ионов 50 эВ. Соответственно, уменьшение концентрации дейтерия в поверхностном слое из-за наличия в этом слое кислорода приводит к уменьшению захвата дейтерия.

Зависимости захвата дейтерия в CFC от дозы облучения ионами с энергией 100 эВ и 400 эВ и плотностями потоков 2×10^{19} и 1×10^{20} ат·м⁻²с⁻¹ представлены на рис. 5. Во всех случаях захват дейтерия увеличивался с дозой, но, по-видимому, при больших дозах проявляется тенденция к насыщению.

Интересно, что захват дейтерия оказывался большим при больших плотностях тока облучающих ионов, а при облучении в дейтериевой плазме без кислородной примеси наблюдался

способствовало росту его концентрации в слое сорбции даже без изменения содержания кислорода в рабочем газе. Соответственно, уменьшался захват дейтерия.

В третьей главе описаны результаты исследований закономерностей удаления кислорода из графитов при облучении их ионами дейтерия в чистящем дейтериевом разряде.

Методика проведения экспериментов включала следующие этапы:

- Отжиг образца в вакууме при $T = 1500$ К.
- Облучение образца определенной дозой ионов дейтериевой плазмы с примесью кислорода.
- Облучение образца ионами водородной плазмы и распыление поверхностного слоя определённой толщины.
- Определение количества кислорода, остающегося в образце, методом ТДС.

Последовательное повторение этих экспериментов с постепенным увеличением дозы облучения ионами дейтерия позволило определить дозу облучения (время облучения, толщину распылённого слоя), необходимую для удаления кислорода из образца.

Предварительные эксперименты показали, что захват кислорода увеличивается при последующих циклах облучения в D-O плазме и отжига. Поэтому, для каждого описанного выше цикла облучений и ТДС измерений использовался новый образец.

Для экспериментов использовался рабочий газ состава $D_2 + 2\%O_2$, поскольку при этом случайные отклонения в концентрации кислорода в рабочем газе приводили к минимальным изменениям в захвате кислорода.

Облучение образцов в D-O плазме проводилось ионами с энергией 100 и 400 эВ. Как показано в Главе 2 (см. также [2]), это давало возможность исследовать закономерности удаления атомов кислорода, захват которых был различен. С другой стороны, тем самым моделировался захват и удаление ионов и атомов перезарядки кислорода и водорода, источником которых были, соответственно, периферийная и центральная области плазмы токамаков.

Распыление образцов проводилось ионами дейтериевой плазмы с энергиями 100 и 400 эВ, что дало возможность лучше понять физические основы и выявить методические особенности разрабатываемого способа удаления кислорода.

Исследовался также характер удаления кислорода из материалов с разной структурой. Для этого использовались образцы углеграфитового композита и пиролитического графита, облучение которого проводилось перпендикулярно гексагональным слоям.

Определялось влияние температуры на скорость удаления кислорода при ионной бомбардировке. С этой целью проводились эксперименты при температуре образцов 200° и 120°С.

Зависимости количества захваченного кислорода в образцах от толщины распылённых поверхностных слоев представлены на рис.6.

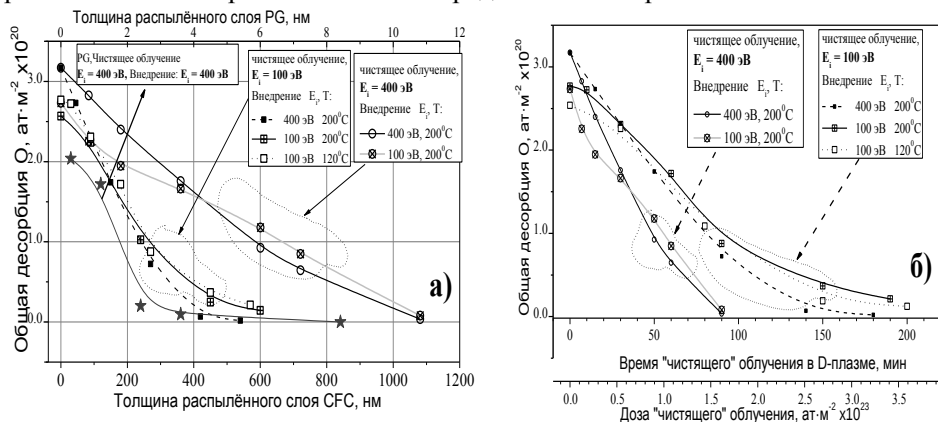


Рис. 6. Десорбция O из CFC в зависимости от а) толщины распыленного слоя графита и б) времени и дозы «чистящего» облучения.

Видно, что кислород был практически полностью удален из пиролитического графита, когда толщина распыленного слоя лишь незначительно превышала длину пробега ионов дейтерия (средняя величина пробега ионов дейтерия с $E_i = 400$ эВ составляет ≈ 8 нм). В образцах CFC количество захваченного кислорода менялось незначительно (изменения $\approx 5\%$ общего захвата O) даже при распылении слоя толщиной 50 нм при всех комбинациях энергий ионов. Удаление большего слоя CFC приводило к более быстрому увеличению эмиссии O из образцов. Содержание кислорода в образцах уменьшалось практически с постоянной скоростью с изменением времени распыления. Полное удаление кислорода (удаление порядка 99% ат. всего захваченного кислорода) наблюдалось при удалении достаточно толстого слоя CFC (600 нм и больше в зависимости от комбинаций энергий ионов при внедрении кислорода и при чистке). Во всех случаях толщина удаленного слоя во много раз превосходила глубины внедрений ионов как кислорода, так и дейтерия.

В то же время скорость удаления кислорода зависела от энергии ионов чистящего облучения. Требовалось распылить большой слой графита (толщиной ≥ 1000 нм) в комбинациях 400/400 и 400/100, т.е. при чистке с высокой энергией ионов (400 эВ), независимо от энергии внедренных частиц. Слои меньшей толщины (≈ 500 нм) необходимо было удалить в комбинациях 100/100 и 400/100 (рис. 6а).

Десорбция кислорода оставалась практически неизменной при уменьшении температуры с 530 до 450 К. В то же время для удаления кислорода в комбинациях 400/100 и 100/100 требовалось гораздо большее время (≥ 150 мин) по сравнению с 80-90 мин в комбинациях 100/400 и 400/100 (рис.6б).

Для исследования зависимости эффективности чистящего разряда от потока были проведены две серии экспериментов. В первой серии экспериментов образцы были облучены в $D_2+2\%O_2$ плазме потоками ионов $2 \times 10^{19} \text{ ат} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и $10^{20} \text{ ат} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, а затем облучены в чистящем разряде с потоком ионов $3 \times 10^{19} \text{ ат} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Во второй серии образцы были облучены в $D_2+2\%O_2$ плазме потоками ионов $10^{20} \text{ ат} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, затем облучены в чистящем разряде потоками ионов $3 \times 10^{19} \text{ ат} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и $2 \times 10^{19} \text{ ат} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Во всех случаях внедрённая доза при облучении в $D_2+2\%O_2$ плазме была $5 \times 10^{23} \text{ ат} \cdot \text{м}^{-2}$. Доза чистящего облучения была выбрана $6 \times 10^{22} \text{ ат} \cdot \text{м}^{-2}$ и $1,2 \times 10^{23} \text{ ат} \cdot \text{м}^{-2}$, при этом толщина удаленного слоя составляла 400 и 700 нм соответственно. Эффективность чистящего разряда не зависела ни от потока ионов, внедряемых при плазменном облучении, ни от потока ионов во время чистящего облучения.

Полученные результаты позволяют сделать заключения о характере процессов, определяющих закономерности удаления кислорода при ионной бомбардировке.

Энергии ионов кислорода и дейтерия, внедряемых в образцы, облучаемые в $(D_2 + \%O_2)$ плазме, одинаковы. Глубины проникновения ионов кислорода в исследованные материалы гораздо меньше глубин проникновения ионов дейтерия при одинаковых энергиях. При одновременном облучении внедряемые атомы дейтерия проникают в объём графита через слои, заполненные атомами кислорода. Другими словами, захваченные атомы кислорода оказываются в регионе каскадов столкновений, порождаемых быстрыми ионами дейтерия, и участвуют в таких каскадах. Основное количество частиц мишени, участвующих в каскадах, получает импульс, направленный в объём графита. Атомы О, выбитые со своих мест, перемещаются в объём графита, где образуют химическую связь с атомами углерода. После образования связи с углеродом атомы кислорода не могут принимать участия в диффузионных процессах и остаются в связанном состоянии до тех пор, пока не будут в следующий раз выбиты со своего места и перемещены вглубь графита. В результате в углеграфитовом материале, подверженном одновременному внедрению ионов дейтерия и кислорода D-O плазмы с одинаковыми энергиями, атомы кислорода насыщают слои, значительно превышающие толщину зоны торможения ионов кислорода, при этом максимум распределения кислорода смещается на глубину, сравнимую с проективным пробегом ионов дейтерия. Как следствие, захват кислорода в

CFC, облучаемом в D-O плазме оказывается большим, чем при облучении пучком ионов кислорода.

На основании полученных в работе результатов были выработаны практические рекомендации по кондиционированию первой стенки токамаков из углеродных материалов. Оптимальные энергии ионов дейтерия при очистке углеграфитовых материалов от кислорода находятся в диапазоне $100 \text{ эВ} < E_i < 400 \text{ эВ}$. При этих энергиях будет осуществляться компромисс между максимальной скоростью удаления кислорода и минимальной толщиной распылённого графита. Использование энергий ионов дейтерия с $E_i > 400 \text{ эВ}$ приведёт к увеличению коэффициента распыления графита, но при этом транспорт кислорода в объём графита ускорится, что потребует распыления слоя графита большей толщины. Использование энергий ионов дейтерия с $E_i < 100 \text{ эВ}$ приведёт к заметному уменьшению скорости распыления углерода и незначительному ослаблению транспорта кислорода в объём графита, что повлечёт существенное увеличение времени кондиционирования.

В четвертой главе описаны результаты исследования захвата водорода в углеродные и углеродо-вольфрамовые плёнки, напылённые в плазме.

Напыление слоёв проводилось на Установке Плазменного Облучения и Осаждения Покровий (далее УПО). Стенд состоит из плазменной камеры, вакуумной системы, блоков питания и управления. Плазменная камера включает систему электродов, позволяющую зажигать разряд между анодом и накальным вольфрамовым катодом, мишеней, узла крепления подложек. Разряд зажигался на смеси аргона и водорода. Ионы плазмы вытягивались на графитовую и вольфрамовую мишени, распыляя их. Распылённые атомы мишеней осаждались на подложки, формируя плёнку. Узел крепления подложек позволяет проводить напыление одновременно четырех плёнок. Основной массив исследований проведен с углеродными слоями, напыляемыми на подложки из нержавеющей стали 12X18H10T. Плёнки осаждались при сопутствующем облучении ионами аргоновой или аргоно-водородной плазмы. Толщина напылённых плёнок составляла примерно 1 – 1,5 мкм. Перед осаждением плёнок подложки отжигались до температуры 1000 K.

Количество захваченного в плёнки водорода и особенности его десорбции определялись методом ТДС (см. главу 2). Скорость нагрева плёнок при анализе составляла $5 \text{ K} \cdot \text{с}^{-1}$. Максимальная температура нагрева образца была 1500 K. В экспериментах давление аргона в разряде составляло $1 \cdot 10^{-3}$ Торр, парциальное давление водорода и паров воды было $\approx 2 \div 10^{-6}$ Торр и $\approx 7 \div 10^{-6}$ Торр соответственно.

Основные параметры напыления и концентрации водорода и кислорода в плёнках приведены в Таблице 1. В первых двух строках показаны данные работы [4], в последних трёх строках – результаты данной работы (T – температура подложек во время напыления, f_{H_2+} , f_{Ar+} , f_{H_2O} , – поток ионов водорода, ионов аргона и молекул воды на подложки, соответственно. Н:С и О:С – концентрации водорода и кислорода в плёнках, соответственно, τ – время напыления монослоя).

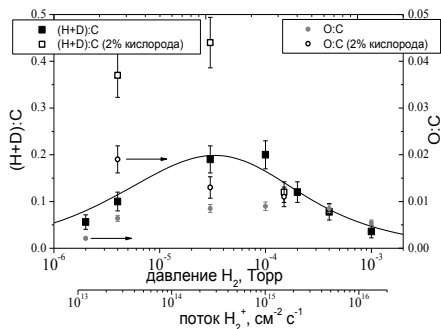


Рис. 7. Зависимость захвата водорода и кислорода от давления водорода в разряде.

аргоновой плазме (УПО $6 \cdot 10^{-5}$ Торр), оказалась значительно ниже, чем концентрация водорода в плёнках, осажденных при помощи испарителя углерода [4] при близких экспериментальных параметрах.

Для объяснения этого факта приходится предположить, что причиной уменьшения сорбции водорода и кислорода является бомбардировка растущих углеродных слоев низкоэнергетичными ионами аргона.

В экспериментах по исследованию захвата водорода в напыляемые плёнки к аргоновой плазме добавлялся водород с парциальным давлением от $6 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-3}$ Торр. Давление аргона поддерживалось на уровне $1 \cdot 10^{-3}$ Торр. Скорость напыления составляла $\approx 0,1 \text{ нм} \cdot \text{с}^{-1}$.

Оказалось, что зависимость захвата водорода и кислорода от давления

Таблица 1.

	T, K	$f_{H_2+}, \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$\langle E_C, \text{эВ} \rangle$	Н:С	О:С	$\tau, \text{с}$	$f_{Ar+}, \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$f_{H_2O}, \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
[4] $1 \cdot 10^{-3}$ Торр	370	—	$\approx 0,2$	0,25	0,045	1,8	—	$\approx 3 \cdot 10^{15}$
[4] $1 \cdot 10^{-3}$ Торр, + Ar	370	—	$\approx 0,2$	0,22	0,053	1,8	—	$\approx 3 \cdot 10^{15}$
УПО $6 \cdot 10^{-6}$ Торр	450	—	~ 1	0,1	0,006	*	$\approx 7 \cdot 10^{15}$	$\approx 2 \cdot 10^{15}$
УПО $4 \cdot 10^{-4}$ Торр	450	$\approx 4 \cdot 10^{15}$	~ 1	0,078	0,009	10	$\approx 7 \cdot 10^{15}$	$\approx 2 \cdot 10^{15}$
УПО $1 \cdot 10^{-3}$ Торр	450	$\approx 7 \cdot 10^{15}$	~ 1	0,036	0,005	20	$\approx 5 \cdot 10^{15}$	$\approx 2 \cdot 10^{15}$

водорода в разряде (рис.7) имеет сложный характер с максимумом захвата при давлениях $10^{-5} - 10^{-4}$ Торр.

Отметим, что эта зависимость схожа с зависимостью захвата дейтерия в CFC, от давления кислорода в рабочем газе, полученной в Главе 2. Поэтому можно считать, что наблюдаемая зависимость, как и в случае, описанном в Главе 2, есть, в основном, результат действия двух разнонаправленных процессов. Первый из них – это увеличение захвата водорода и кислорода из

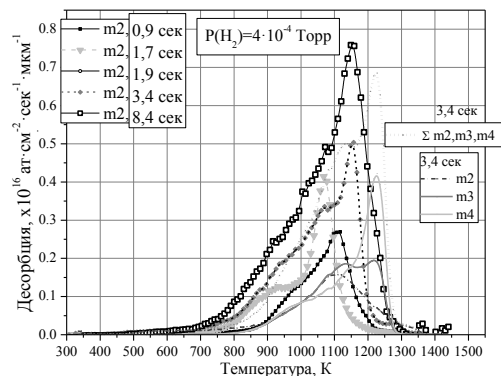


Рис. 8. Спектры термодесорбции водорода из углеродных плёнок.

и кислорода из молекул воды по «потенциальному» механизму. Второй – это уменьшение концентрации молекул воды на поверхности, и, соответственно, уменьшение захвата атомов водорода и кислорода по мере увеличения молекулярного и ионного потоков на поверхность и сорбции молекул водорода.

В экспериментах по исследованию зависимости захвата водорода в углеродные плёнки от скорости напыления скорость варьировалась от 0,07 до $4 \text{ нм} \cdot \text{с}^{-1}$.

ТДС спектры плёнок (рис.8) подобны друг другу и отличаются, главным образом, только количественно. Это говорит о том, что варьирование скорости напыления не изменяло типы активных центров захвата водорода.

Зависимости концентрации водорода в плёнках, осажденных при давлении водорода $4 \cdot 10^{-4}$ Торр, от времени осаждения одного монослоя хорошо описываются линейной зависимостью: $\text{H:C} = 0,03 \cdot t$, где t – время напыления одного слоя (рис. 9).

Линейность этой зависимости говорит о том, что вероятность захвата атома водорода в ловушку определяется временем осаждения следующего слоя и время существования ловушки много больше времени осаждения одного монослоя.

сорбированных на поверхности молекул воды, которые выступают основным источником захвата (Смотри Главу 2), при увеличении концентрации водорода в рабочем газе. Это происходит благодаря тому, что при этом возрастает поток ионов водорода на поверхность, возрастает степень активации поверхности напыляемого слоя и, соответственно, увеличивается захват водорода

Эксперименты по изучению захвата изотопов водорода в плёнках, осаждаемых в аргонной плазме с добавлением дейтерия и примесью кислорода, проводились при скорости напыления $\approx 0,1 \text{ нм} \cdot \text{с}^{-1}$. Парциальное давление кислорода в камере составляло $2 \cdot 10^{-6} \text{ Торр}$. Давление дейтерия варьировалось в диапазоне $0 - 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ Торр}$.

ТДС спектры водорода из плёнок, напыленных с добавлением кислорода, совпадали по форме со спектрами водорода из плёнок, напыленных без добавления кислорода. Следовательно, примесь кислорода ($\approx 0,2\%$) в плазме не изменила тип ловушек водорода (дейтерия) в плёнках. Вместе с тем, по абсолютному значению концентрация изотопов водорода (H+D):C в плёнках, осаждаемых в плазме с примесью кислорода, заметно увеличилась по сравнению со случаем без кислорода (рис.7). Поэтому можно сделать вывод, что примесь кислорода в плазме не изменила основные механизмы захвата водорода (дейтерия) в плёнке, но стимулировала захват водорода из молекул воды.

Так как концентрация кислорода при напылении плёнок составляла $\approx 0,2\%$, то на основании выводов работы [2] и Главы 2 диссертации можно полагать, что его влияние на захват водорода за счёт активации поверхности было незначительно и рост концентрации молекул воды был главным фактором увеличения захвата дейтерия.

Углеродо-вольфрамовые слои осаждались в плазме газового разряда на стенде УПО. В начале работы проводились отдельные измерения коэффициентов распыления графитовой и вольфрамовой мишеней. Количество распылённого материала определялось гравиметрическими измерениями. После этого были проведены подобные измерения при одновременном распылении графитовой и вольфрамовой мишеней. Была выявлена проблема изменения скорости распыления графитовой мишени вследствие попадания на неё атомов вольфрама с вольфрамовой мишени и, как следствие, развитие на ней рельефа и изменение коэффициента распыления. Поэтому совместное распыление двух мишеней было продолжено (в условиях проводимых экспериментов оно составило ~ 5 часов)

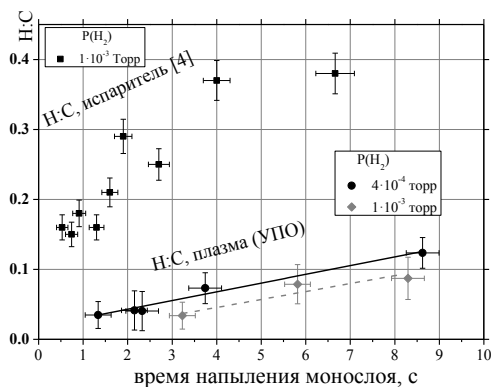


Рис.9. Зависимости концентрации водорода в плёнках от времени осаждения одного монослоя, полученные в работе [4] и в данной работе.

до установления стационарного рельефа и, соответственно, не изменяющегося впоследствии коэффициента распыления. Были подобраны параметры эксперимента, при которых соотношения потоков углерода и вольфрама на подложку равнялось 1:3. Напыление производилось на подложки из трёх различных материалов: нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, вольфрам и графит марки МПГ-8. Рабочим газом разряда являлся аргон. Давление аргона составляло $(1,4 \div 1,6) \times 10^{-3}$ Торр, давление остаточного газа было 3×10^{-6} Торр. Энергия распыляющих ионов была 700 эВ. Напыление производилось с одинаковыми потоками атомов W и C на подложки,

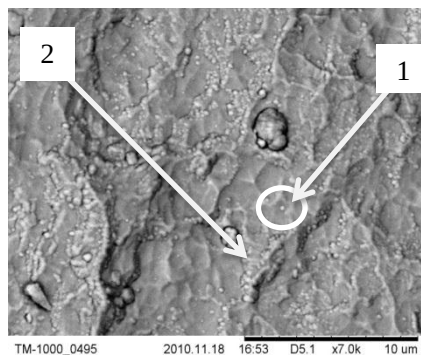


Рис 10. C-W плёнка на вольфрамовой подложке. 1 – глобула, 2 – холмистый участок плёнки.

При напылении углерод-вольфрамовых плёнок на подложку из нержавеющей стали до толщин $\sim 0,4$ мкм плёнка оставалась практически однородной. Увеличение толщины слоя до $\sim 0,5$ мкм приводило к началу растрескивания покрытия. Дальнейшее увеличение толщины слоя до $\sim 0,75$ мкм приводило к массовому образованию чешуек и отшелушиванию.

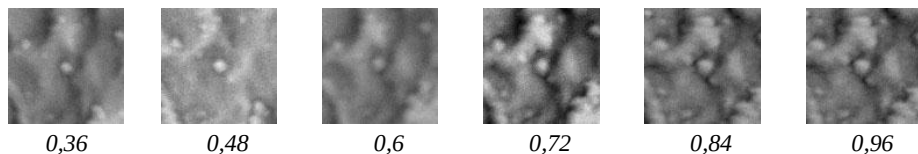


Рис.11. Зародыш на C-Слой на вольфрамовой подложке. Под картинками указаны толщины слоя, мкм

На вольфрамовой подложке при толщинах плёнки 0,36 мкм слой имеет холмистую структуру и появляются распределённые по поверхности «неоднородности» размером ~ 100 нм. С увеличением толщины слоя их количество увеличивается (Рис. 10), но поперечные размеры растут незначительно (Рис. 10). Они развиваются в виде цилиндрических глобул, в

основном по границам холмистых элементов слоя (Рис. 10). Был проведён элементный анализ поверхностного слоя методом Рентгеновской Фотоэлектронной Спектрометрии (РФЭС) на приборе HitachiTM-1000 (Tabletop Microscop). Концентрация вольфрама измерялась по высоте пика в количестве зарегистрированных квантов. Было установлено, что содержание вольфрама в холмистом слое больше, чем в глобуле. Это свидетельствует о том, что глобула и ровный слой – две разные фазы.

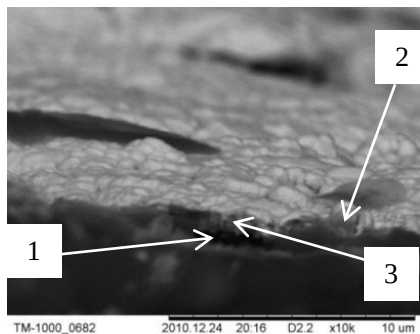


Рис 12. C-W плёнка на графитовой подложке. 1 – полости, 2-глобула, 3 – слоистая структура слоя.

При толщинах ~ 2 мкм начинается образование чешуек, а при толщинах $\sim 2,5$ мкм происходит интенсивное отшелушивание,

На графитовой подложке при толщинах до 0,36 мкм слой остаётся относительно ровным. Аналогично напылению на вольфрамовую подложку, появляются зародыши размером ~ 100 нм. При толщине 0,48 мкм на слое появляются выпуклости. При толщине слоя 0,72 мкм происходит

растрескивание слоя по границе выпуклости.

На рис.12 В показан слом образца при толщине 0,96 мкм. Видно, что под выпуклостью есть полости, а слой обладает столбчатой структурой. На рис. 12 видна глобула на слое на графитовой подложке.

Сравнение изложенных выше результатов с результатами экспериментов по напылению на такие же подложки углеродных слоёв выявляет некоторые важные различия в их развитии.

При напылении углеродных слоёв на подложки из нержавеющей стали не наблюдается растрескивание и образование чешуек. Отшелушивание, по крайней мере, до толщин 0,9 мкм, не наблюдается. Это свидетельствует о том, что адгезия углеродо-вольфрамового слоя на нержавеющей стали, на графите и на вольфраме гораздо хуже.

Основные этапы формирования W-C слоя на вольфрамовой и графитовой подложке изображены на рис.13. W-C слой на первом этапе напыления, до достижения толщины, примерно 0,1 мкм представляет собой однородную аморфную структуру. При продолжении напыления слой начинает кристаллизоваться, образуя столбчатую структуру с большой концентрацией

вольфрама в ней. Атомы углерода, оказывающиеся «лишними» для создающихся структур и не встраиваемые в них, вытесняются на их периферии, где начинают формироваться новые кристаллические образования – глобулы. Этот процесс активно идёт, начиная с толщины слоя порядка 0,1-0,2 микрон. Глобулы, по-видимому, зарождаются и начинают развиваться по мере накопления концентрации атомов углерода.

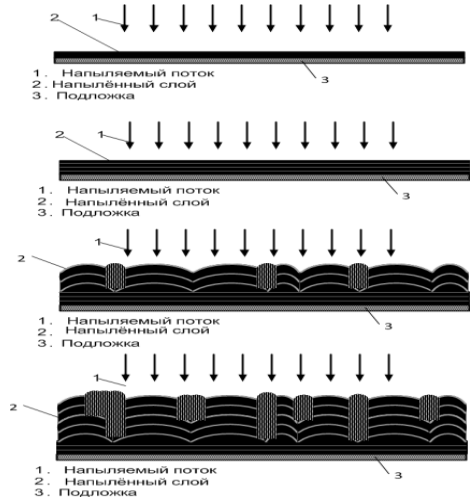


Рис.13. Основные этапы образования слоя на графитовой и вольфрамовых подложках.

Поэтому они появляются и в дальнейшем служат стоком для диффундирующих атомов углерода.

Интересно отметить, что закономерности формирования углеродно-вольфрамового слоя, в общем, такие же, как и закономерности формирования двухфазных металлических слоёв из атомов металлов, не образующих однофазный сплав [5].

Изучался захват водорода и кислорода в W-C плёнки в зависимости от давления дейтерия в диапазоне $0 - 1,5 \cdot 10^{-4}$ Торр. Несколько экспериментов было проведено с примесью кислорода в плазме с парциальным давлением $2 \cdot 10^{-6}$ Торр. Напылённые плёнки

состояли из ≈ 25 % ат. вольфрама и ≈ 75 % ат. углерода.

Аналогично углеродным плёнкам, концентрация (H+D):C в вольфрам-углеродных плёнках определялись, главным образом, захватом водорода, количество которого составляло ≥ 90 % ат. Количество захваченного водорода и положение термодесорбционного пика оставались постоянным вне зависимости от давления дейтерия.

Примесь кислорода в разряде в количестве 0,2% не изменяла существенно захват изотопов водорода и положение максимумов десорбции в исследованном диапазоне экспериментальных параметров. Количество захваченного кислорода при напылении плёнок в плазме с примесью кислорода увеличилось ≈ 3 раза.

В заключении сформулированы основные выводы работы.

В диссертационной работе установлены закономерности захвата водорода и кислорода в углеграфитовые материалы, контактирующие с водородной плазмой с примесью кислорода. Экспериментально определены:

- зависимость захвата кислорода и водорода от концентрации кислородной примеси в плазме,
- зависимость захвата кислорода и водорода от энергии облучающих ионов плазмы,
- характер распределения захваченного кислорода по глубине.

Определён механизм захвата водорода в углеграфитовые материалы при появлении кислородной примеси в плазме.

Установлено, что удаление кислорода, имплантированного в углеграфитовые материалы, при их облучении ионами водорода происходит, в основном, за счёт распыления поверхностного слоя, содержащего атомы кислорода.

Определены закономерности удаления кислорода из углеграфитовых материалов. В частности, определены зависимости времени процесса и глубины распыляемого слоя от энергии ионов, температуры и типа материала. Для удаления 99%ат. кислорода из CFC при облучении ионами дейтерия с энергией 400 эВ требовалось распылить слой графита толщиной ≈ 900 нм, при этом время «чистящего» облучения составляло 80 минут. Для удаления 99%ат. кислорода из CFC при облучении ионами дейтерия с энергией 100 эВ требовалось распылить слой графита толщиной ≈ 400 нм, при этом время «чистящего» облучения составляло 150 минут.

Определены закономерности формирования углеродо-вольфрамовых слоёв, напыляемых в плазме, на подложки из нержавеющей стали, вольфрама и углерода. Определены толщины, после которых напыляемые слои начинают разрушаться, превращаясь, в конечном итоге, в пыль в условиях термоядерных установок. Для углеродо-вольфрамовых слоёв, напылённых на подложки из вольфрама и графита эта толщина составила 2,5 мкм, на подложки из нержавеющей стали – 1 мкм.

Показано, что в тех случаях, когда углеродные и углеродо-вольфрамовые слои, напыляемые в плазме, не облучаются быстрыми атомарными частицами плазмы, захват водорода и кислорода в них происходит по «потенциальному» механизму, в основном, из молекул воды, сорбированных на поверхности слоя. Захват стимулируется ионами плазмы, активирующими поверхность слоёв.

Обнаружено, что захват кислорода и водорода из сорбированных молекул воды в углеродные слои увеличивается при увеличении активирующего поверхность потока ионов плазмы и уменьшается при увеличении потока молекулярного водорода, способствующего уменьшению концентрации молекул воды в поверхностном слое. Выявлена зависимость захвата водорода и кислорода в углеродные и углеродо-вольфрамовые слои от давления водорода.

Список использованной литературы

- [1] TDS Investigation of Hydrogen Retention in Graphites and Carbon Based Materials. L. Begrambekov, O. Buzhinsky, A. Gordeev, et al., Phys. Scr. T108 (2004) 72
- [2] Deuterium trapping in carbon fiber composites exposed to D plasma. A. Airapetov, L. Begrambekov, C. Brosset, J.P. Gunn, C. Grisolia, A. Kuzmin, T. Loarer, M. Lipa, P. Monier-Garbet, P. Shigin, E. Tsitrone, A. Zakharov, J. Nucl. Mater., Volumes 390-391 (2009) 589-592
- [3] A. Refke, V. Phillips, E. Vietzke. J. Nucl. Mater. 250 (1997) 13-22
- [4] Hydrogen trapping in depositing carbon films. Begrambekov, L. B., Kuznetsov, A. S., & Shigin, P.A. *Journal of Nuclear Materials*, 390-391 (2009) 685-688
- [5] Осаждение двухкомпонентных металлических слоев в плазме при высоких температурах, Беграмбеков Л.Б., Гордеев А.А., Садовский Я.А., Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 5, Май 2008, С. 109-112.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

1. Deuterium trapping in carbon fiber composites exposed to D plasma, A. Airapetov, L. Begrambekov, C. Brosset, J.P. Gunn, C. Grisolia, A. Kuzmin, T. Loarer, M. Lipa, P. Monier-Garbet, P. Shigin, E. Tsitrone, A. Zakharov, *Journal of Nuclear Materials*, Volumes 390-391, 2009, Pages 589-592
2. Захват и удержание кислорода и дейтерия в углеграфитовом композите при облучении в дейтериевой плазме с примесью кислорода, Айрапетов А.А., Беграмбеков Л.Б., Вергазов С.В., Захаров А.М., Кузьмин А.А., Садовский Я.А., Шигин П.А., Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2009. № 3. С. 25-29.
3. Исследование захвата и удержания изотопов водорода в тайлах токамака Tore Supra, Кузьмин А.А., Айрапетов А.А., Беграмбеков Л.Б., Шигин П.А., Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2009. № 3. С. 30-34.
4. Удаление кислорода из углеграфитового композита и нержавеющей стали, облучаемой в дейтериевом тлеющем разряде, Беграмбеков Л.Б., Айрапетов А.А., Вергазов С.В., Кузьмин А.А., Шигин П.А., Садовский Я.А., Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2010. № 3. С. 29-34.
5. Захват и удержание дейтерия в углеродных материалах, облучаемых в плазме, А.А. Айрапетов, Л. Б. Беграмбеков, С.В. Вергазов, А.А. Кузьмин, В.М. Смирнов, П. А. Шигин, Известия РАН. Серия физическая. - 2010. - Т. 74, N 2. - С.248-253

6. Спектры термодесорбции водорода из графитов и их связь с условиями имплантации и удержания, А.А.Айрапетов, Л. Б.Беграмбеков, С.В.Вергазов, А.А.Кузьмин, О.С.Фадина, П.А.Шигин, Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2010, N 7. - С.23-28
7. Glow discharge cleaning of carbon fiber composite and stainless steel, A. Airapetov, L. Begrambekov, S. Brémond, D. Douai, A. Kuzmin, Ya. Sadovsky, P. Shigin and S. Vergasov, Journal of Nuclear Materials 415 (2011) S1042–S1045.