УДК 533.9:621.039.61

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ВЫСОКООРИЕНТИРОВАННОГО ПИРОГРАФИТА ПРИ ВЫСОКИХ ФЛЮЕНСАХ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Н.Н. Андрианова, А.М. Борисов, В.С. Куликаускас, Е.С. Машкова, А.С. Немов (Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова), Ю.С. Виргильев (ФГУП НИИграфит), С.Я. Бецофен (ГОУВПО «МАТИ» — Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского)

Приводятся результаты исследования морфологии, элементного состава и структуры поверхностного слоя, формирующегося при падении ионов N_2^+ энергией 30 кэВ под углом падения 60º на базисную плоскость высокоориентированного пиролитического графита марки УПВ-1Т при температуре ниже и выше температуры $T_a \approx 170$ ºС динамического отжига радиационных нарушений. Обсуждаются причины образования столбчато-игольчатой морфологии при $T > T_a$, вызывающей трехкратное подавление распыления по сравнению с облучением при $T < T_a$.

Ключевые слова: высокоориентированный пирографит, ионно-лучевая эрозия, анизотропные диффузионные процессы.

THE STUDY OF MODIFIED SURFACE LAYER OF HOPG UNDER HIGH-FLUENCE ION IRRADIATION. N.N. ANDRIANOVA, A.M. BORISOV, V.S. KULIKAUSKAS, E.S. MASHKOVA, A.S. NEMOV, Yu.S. VIRGILIEV, S.Ja. BETSOFEN. The results of the study of morphology, element composition and crystalline structure of surface layer form under 30 keV N_2^+ impact at ion incidence angle 60º onto basic plane of HOPG (UPV-1T) at the temperatures below and above temperature $T_a \approx 170$ ºC of radiation dynamical annealing. The reasons of needle-like cone surface morphology which develops at $T > T_a$, causing three-fold suppression of sputtering in comparison with irradiation at $T < T_a$ are discussed.

Key words: high-oriented pyrolytic graphite, high fluence ion-beam erosion, anisotropic diffusion processes.

ВВЕДЕНИЕ

Углерод-углеродные композиционные материалы находят все большее применение в атомных реакторах, термоядерных устройствах и аэрокосмической технике благодаря их прочностным характеристикам, теплозащитным свойствам и ряду других специфических характеристик [1]. Вопросы эрозии, модификации морфологии и структуры поверхностного слоя углеродных материалов под действием легких ионов (изотопов водорода и гелия) являются предметом интенсивных исследований в связи с решением материаловедческих задач термоядерного проекта ИТЭР. Экспериментальных исследований взаимодействия тяжелых ионов с углеродными материалами значительно меньше. Данная проблема представляет не меньший практический интерес в связи с разработкой радиационно-пучковых методов модифицирования углеродных материалов, использованием графитовых конструкций в плазменных ионных источниках.

Среди углеродных материалов наиболее близким по свойствам к монокристаллу графита является высокоориентированный пиролитический графит (highly oriented pyrolytic graphite — HOPG) [1, 2]. Его часто используют с целью исследования эффектов анизотропии углеродных материалов, а также в качестве модельного при изучении поведения этих материалов под действием нейтронного либо ионного облучения. Экспериментальные исследования угловых зависимостей коэффициента распыления $Y(\theta)$ от угла θ падения ионов на поверхность поликристаллических графитов и сравнение их с результатами компьютерного моделирования показали, что эти зависимости типичны для столкновительного распыления неупорядоченных сред с учетом влияния топографии поверхности, развивающейся в процессе высокодозного облучения [3]. Отсутствие сильного влияния температуры (вплоть до температуры, когда начинается радиационно-ускоренная сублимация), при которой производится облучение поликристаллических графитов, на характер зависимостей $Y(\theta)$ связано со следующим обстоятельством. Известно, что хотя при температуре меньше температуры динамического отжига радиационных нарушений T_a, создаваемых высокодозным облучением, происходит разупорядочение поверхностного слоя, в пределах точности измерения оба состояния поверхности — поликристаллическое при $T > T_a$ и разупорядоченное при $T < T_a$ — можно считать неупорядоченными [3]. Для высокоориентированного пирографита можно было предполагать при $T > T_a$ проявление анизотропии коэффициента распыления. Действительно, проведенные недавно измерения $Y(\theta)$ высокоориентированного пиролитического графита марки УПВ-1Т

при облучении ионами N_2^+ энергией 30 кэВ от угла падения θ ионов в диапазоне от 0 до 80° относительно нормали к базисной плоскости показали, что характер поведения угловых зависимостей коэффициента распыления Y при температуре ниже и выше температуры T_a ионно-индуцированного структурного перехода существенно различен [4]. При $T < T_a$, когда ионное облучение приводит к разупорядочению кристаллической структуры, зависимость $Y(\theta)$ является монотонно возрастающей с углом падения θ в интервале от 0 до 80° и практически идентичной данным для поликристаллических графитов. При $T > T_a$, когда по данным дифракции электронов наблюдается частичное восстановление структуры поверхностного слоя УПВ-1Т [5], зависимость $Y(\theta)$ не является монотонной — при наклонном падении ионов ($\theta = 60°$) наблюдается широкий минимум. Обнаружено более чем трехкратное подавление распыления по сравнению со случаем распыления при комнатной температуре. Основной причиной наблюдаемого подавления распыления полагалось влияние на движение бомбардирующих и распыленных частиц специфической столбчато-игольчатой морфологии поверхности, развивающейся при высокодозном облучении.

При облучении ионами процессы, вызывающие изменение свойств и развитие морфологии поверхности при высоком флюенсе и, особенно, при повышенной температуре облучения, все еще мало исследованы, в том числе и влияние процессов диффузии атомов и дефектов в объеме, а также изменения размеров зерен. В настоящей работе анализируется эволюция столбчато-игольчатой морфологии при длительном ионном облучении, исследуются микрогеометрия и кристаллическая структура ионно-индуцированных морфологических элементов, обсуждаются возможные причины и механизмы их образования.

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

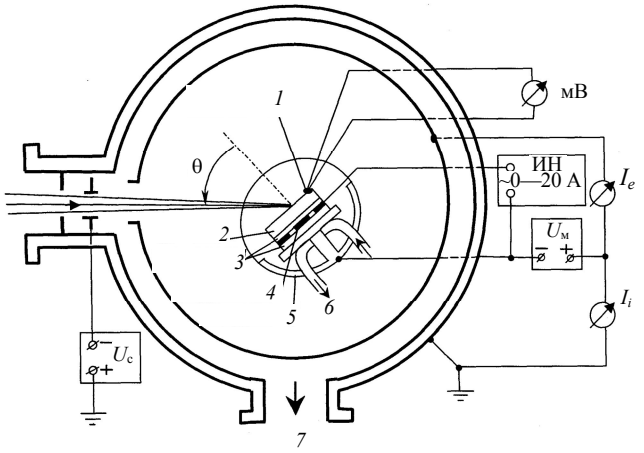

Рис. 1. Схема камеры ионного облучения: I_i — ионный ток на мишень; I_e — ток вторичных электронов; $U_м$ — напряжение смещения на мишени; ИН — источник тока нагревателя; U_c — напряжение супрессорного электрода; *1* — термопара; *2* — мишень; *3* — изоляторы; *4* — нагреватель; *5* — держатель; *6* — охлаждение; *7* — насос

Ионное облучение проводили на масс-монохроматоре НИИЯФ МГУ по методике, аналогичной используемой в работах [3—5]. Мишени закрепляли в камере облучения на держателе, позволяющем изменять температуру мишеней от –180 до 1000 °С, а также варьировать угол падения θ ионов на мишень от 0 (нормальное падение) до 80° (рис. 1). Для охлаждения мишени использовали либо проточную воду, либо жидкий азот. Температуру мишени в процессе облучения измеряли с помощью хромель-алюмелевой термопары, спай которой укрепляли на облучаемой стороне мишени вне зоны облучения. В работе использовали пластинки высокоориентированного пирографита толщиной 2—3 мм марки УПВ-1Т производства НИИграфит. Мозаичная структура УПВ-1Т характеризуется осевой текстурой в направлении [001], нормальном к поверхности пластинок. Разориентировка базисных плоскостей в УПВ-1Т не превышает 50′. Облучение молекулярными ионами азота N_2^+ энергией 30 кэВ под углом падения ионов 60° проводили при комнатной температуре и $T = 400$ °С. Флюенсы облучения достигали 10^{20} см$^{-2}$ при плотности тока ионов ~0,3 мА/см^2.

Коэффициент распыления определяли по потере веса мишени. Элементный анализ образцов до и после ионного облучения производили при помощи резерфордовского обратного рассеяния (РОР) на 160° с использованием ионов He^+ энергией 2,3 МэВ на электростатическом ускорителе НИИЯФ МГУ. При этом анализ образцов после облучения проводили при двух направлениях зондирующего пучка в плоскости падения ионов с целью учета влияния ионно-индуцированной топографии поверхности.

С целью анализа влияния радиационного воздействия при различных температурах облучения на текстуру материала исследовали образцы УПВ-1Т после облучения нейтронами. Облучение нейтронами производили в реакторе ВВР-М при температуре 70—90 и 700 °С и соответственно флюенсах $1{,}4 \cdot 10^{19}$ и $5 \cdot 10^{20}$ нейтрон/см^2.

Текстурные исследования проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-4 в CuK_α-излучении путем измерения интенсивности отражения в зависимости от угла поворота α образца вокруг оси гониометра при фиксированном положении счетчика. С целью получения наибольшего интервала изменения угла поворота α использовали отражение (006).

Исследование кристаллической структуры поверхностного слоя образцов проводили с помощью метода дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО) на электронографе ЭМР-102 при ускоряющем напряжении 50 кВ и токе пучка 50 мкА. Отметим, что, если поверхность мишени является гладкой и плоской на атомном уровне, скользящий пучок электронов проникает вглубь не более, чем на 50 Å. Путь электронов, поскольку пучок электронов почти параллелен поверхности образца, составляет несколько сотен ангстрем. В результате в таких ситуациях метод ДБЭО позволяет изучать двумерные кристаллические структуры поверхности. Для шероховатых образцов дифракционная картина соответствует трехмерной кристаллической структуре выступов топографических элементов материала над поверхностью [6].

Анализ морфологии поверхности производили с помощью оптической и растровой электронной микроскопии (РЭМ) с использованием микроскопов Axiostar plus и LEO 1430-vp, а также зондового микроскопа ФемтоСкан в атомно-силовом режиме. Для количественного анализа микрогеометрии ионно-индуцированного рельефа использовали метод гониофотометрии отраженного света. Гониофотометрические исследования проводили на стенде лазерной гониофотометрии (ЛГФ) с использованием излучения He—Ne-лазера с длиной волны 0,63 мкм [7]. В плоскости падения, в которой проводилось ионное облучение, измеряли индикатрисы отраженного света $I(\theta_D)$ для различных углов падения лазерного луча θ_L и рефлектограммы $I(\theta_L)$ при фиксированном угле регистрации отраженного света $\theta_D = 5^\circ$. При неровностях поверхности микронных размеров отражение света можно рассматривать в рамках геометрической оптики, как суперпозицию отражений микрогранями топографических элементов, а зависимости $I(\theta_D)$ и $I(\theta_L)$ могут быть преобразованы в распределение $F(\beta)$ локальных углов β наклона микрограней [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проблема создания специальной морфологии поверхности для подавления распыления, как известно, привлекала внимание в связи с термоядерными исследованиями [9—11]. Так, компьютерное моделирование распыления при попадании частиц плазмы в цилиндрическую ячейку (с заданным отношением длины к диаметру L/D) показало возможность уменьшения выхода распыленных частиц по сравнению с использованием гладкой стенки [9]. Рассматривались зависимости от формы углового распределения бомбардирующих частиц, вероятности и направления их отражения, углового распределения и абсолютной величины выхода распыленных частиц. Оценки показали, что отношение коэффициентов распыления Y ячеистой и гладкой поверхностей наиболее чувствительно к угловому распределению бомбардирующих частиц и в меньшей степени к характеристикам их отражения. Значительное подавление распыления происходит уже при отношении $L/D = 1$ — ячеистая топография поверхности уменьшает распыление в 3 раза, а при $L/D = 2$ — в четыре раза.

Использовали и различные экспериментальные методы создания аналогичного вида морфологии поверхности. В частности, дендритная морфология на поверхности вольфрама, получаемая химико-паровым осаждением W, приводит к уменьшению коэффициента распыления ионами гелия по сравнению с гладкой поверхностью от 3 до 100 раз [10]. При бомбардировке ионами водорода с энергией 250—500 эВ бериллия обнаружено формирование игольчатой морфологии поверхности, вызывающей уменьшение коэффициента распыления на 30—40% [11]. Такие морфологические элементы являются эффективными в захвате распыленных частиц. Отметим, что проблема перепыления решается в настоящее время в связи с созданием наноразмерных пор с вертикальными стенками в кремнии и системах кремний на изоляторе при помощи высокодозных фокусированных ионных пучков с целью использования таких структур в оптоэлектронных устройствах [12].

Как отмечалось во введении, при облучении базисной плоскости высокоориентированного пиролитического графита марки УПВ-1Т при температуре ~400 ºС ионами N_2^+ энергией 30 кэВ под углом 60º относительно направления [001] наблюдалось подавление распыления более чем в три раза по сравне-

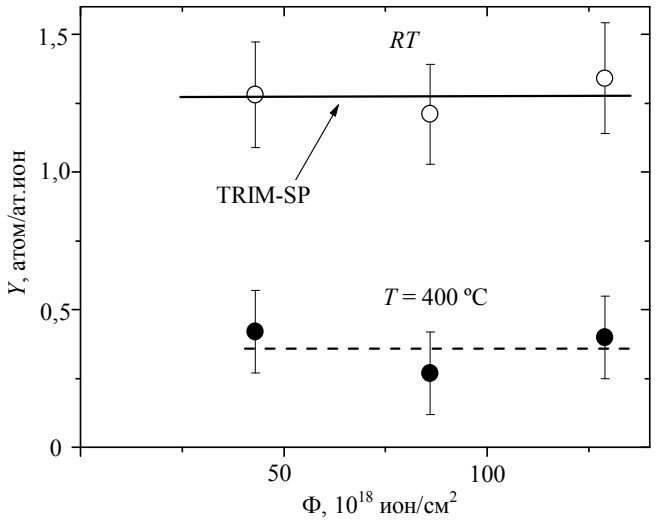

Рис. 2. Зависимость коэффициентов распыления грани (001) УПВ-1Т от флюенса облучения ионами N_2^+ энергией 30 кэВ под углом θ = 60º относительно нормали к поверхности при комнатной температуре (*RT*) и температуре *T* = 400 ºС: —— — результаты моделирования по программе TRIM.SP; – – — экспериментальные данные при падении ионов по нормали к поверхности [3]

нию с распылением при комнатной температуре, обусловленное развитием столбчато-игольчатой морфологии поверхности [4]. Сравнительный анализ морфологии поверхности в этих двух случаях проводили после облучения исходно гладкой поверхности пластинок УПВ-1Т с флюенсом около $4 \cdot 10^{19}$ ион/см^2, который, согласно зависимостям коэффициента распыления от флюенса облучения *Y*(Ф), приведенным на рис. 2, соответствует динамически равновесному состоянию облучаемой поверхности со стабилизацией коэффициента *Y*. Видно, что для угла падения ионов θ = 60º при комнатной температуре облучения (*RT*) и при *T* = 400 ºС коэффициенты распыления различаются более чем в три раза и практически не изменяются в исследованном диапазоне флюенса облучения $4 \cdot 10^{19}$—$12 \cdot 10^{19}$ ион/см^2. На рис. 2 приведен также результат моделирования по программе TRIM.SP, который оказывается близким к эксперименту при комнатной температуре. В три раза меньшее значение *Y* при *T* = 400 ºС и наклонном (θ = 60º) падении ионов оказывается, в свою очередь, близким к соответствующему коэффициенту распыления *Y* при нормальном падении ионов на мишень, экспериментальное значение которого взято из работы [3].

Морфология поверхности. Облучение при комнатной температуре. При взаимодействии ионов с твердым телом эволюция морфологии поверхности определяется в зависимости от условий облучения рядом процессов — удалением материала в результате собственно распыления, радиационно-стимулированными процессами диффузии и сегрегации, температурной зависимостью кинетики дефектов, микроструктурой, особенностями изготовления материала и исходной морфологии поверхности [13—15]. Теоретические рассмотрения, как и компьютерное моделирование эволюции морфологии под действием ионного облучения, находятся в стадии развития и не описывают все многообразие изменения морфологии [15]. В ситуациях, когда доминирующим механизмом развития ионно-индуцированной морфологии поверхности является столкновительное распыление неупорядоченных материалов, часто наблюдают систему периодически повторяющихся волнообразных образований (ripples) с длинами волн в десятки—сотни нанометров. Зигмунд показал, что поскольку энергия, выделенная падающим ионом в мишени, имеет пространственное распределение, коэффициент распыления зависит от окружения локальной точки поверхности, что может привести к нестабильности рельефа поверхности [16, 17]. Брэдли и Харпер использовали эллипсоидальное распределение выделившейся в мишени энергии и оценили зависимость коэффициента распыления от угловых и линейных параметров кривизны поверхности и скорость эрозии, исходя из параметров каскада столкновений [18]. Развитая ими теория эрозии позволяет определить длину волны квазипериодических морфологических элементов поверхности (ripples) как без учета, так и с учетом мобильности поверхностных атомов в зависимости от температуры, т.е. с учетом энергии активации поверхностной диффузии.

Описанным закономерностям ионно-индуцированной морфологии поверхности отвечают данные, полученные нами при облучении пластинки УПВ-1Т ионами N_2^+ энергией 30 кэВ под углом падения 60º относительно нормали к поверхности при комнатной температуре. На рис. 3, *а* приведена микрофотография поверхности, полученная при помощи РЭМ. При таком методе наблюдения картина морфологии облученной поверхности представляет собой фацетированную структуру с размером фасеток около 1 мкм. В атомно-силовом микроскопе фасетки выглядят в виде холмиков с овальным подножием ~500×700 нм, вытянутым в плоскости падения ионного пучка (рис. 3, *б*). Сторона холмиков, обращенная к ионному пучку, более крутая, чем противоположная сторона. Высота холмиков составляет около

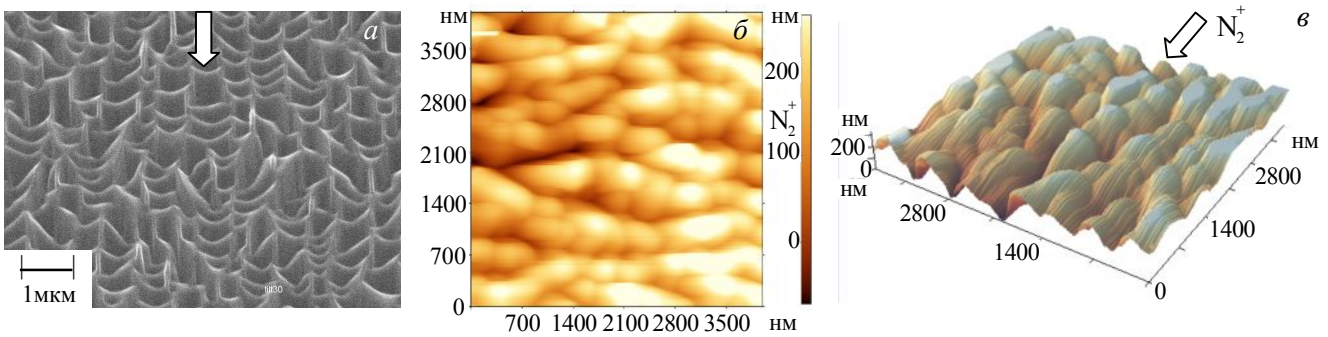

Рис. 3. Морфология поверхности грани (001) УПВ-1Т после облучения ионами N_2^+ энергией 30 кэВ под углом θ = 60º относительно нормали к поверхности при комнатной температуре: *а* — РЭМ-изображение поверхности УПВ-1Т с наклоном образца 30º; *б* — изображение поверхности, полученное с использованием зондового микроскопа ФемтоСкан в атомно-силовом режиме; *в* — его трехмерная реконструкция

200 нм, что почти на порядок величины меньше толщины распыленного слоя материала (~1,4 мкм). В плоскости, перпендикулярной плоскости падения ионов, система холмиков проявляет квазипериодичность, характерную для высоких флюенсов ионного облучения аморфных материалов [14, 15]. Трехмерная реконструкция морфологии поверхности представлена на рис. 3, *в*. Период структуры составляет около 500 нм. Подчеркнем, что в работе [3] и настоящем исследовании результаты ДБЭО показывают, что в случае облучения базисной плоскости УПВ-1Т при комнатной температуре независимо от угла облучения и направления съемки электронограммы (вдоль направления ионного пучка или навстречу ему) в исследованном интервале углов от 0 до 80º поверхность находится в аморфизованном состоянии, о чем свидетельствует картина дифракции в виде диффузного гало ([5], рис. 4, *б*). Аналогичные результаты, свидетельствующие о развитии волнообразного рельефа на поверхности высокоориентированного пиролитического графита при облучении при комнатной температуре ионами Xe^+ энергией 5—50 кэВ с флюенсом (3—5)10^{17} ион/см^2 под углом падения 30º, приведены на рис. 1 в работе [14].

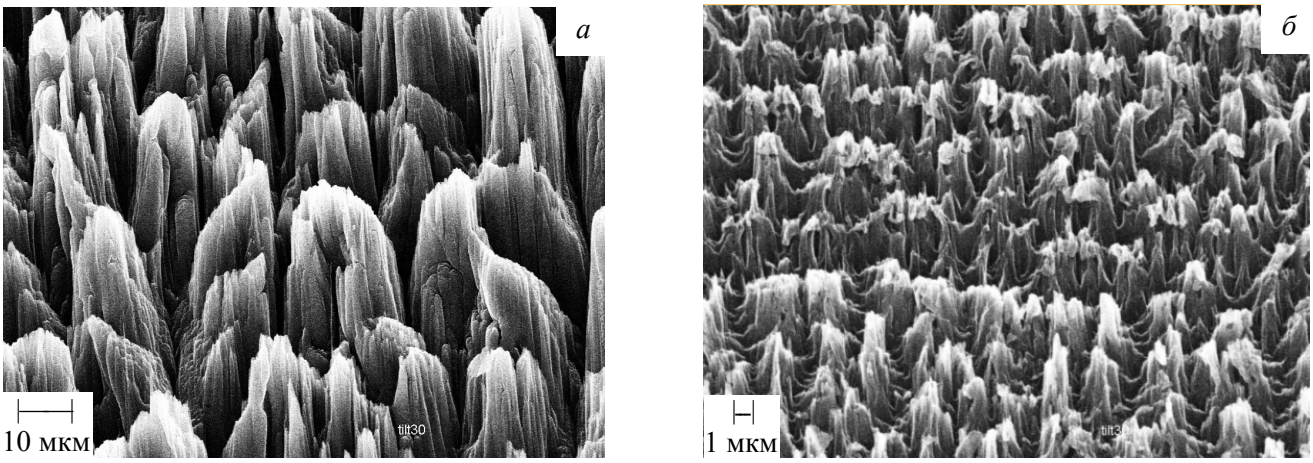

Рис. 4. РЭМ-изображения поверхности грани (001) УПВ-1Т после облучения ионами N_2^+ энергией 30 кэВ под углом θ = 60º относительно нормали к поверхности при температуре 400 ºС: *а* — кратер; *б* — периферия

Морфология поверхности. Облучение при повышенных температурах. Кристаллическая структура высокоориентированного пирографита УПВ-1Т при повышенных температурах и наклонном падении ионов является более упорядоченной, чем при комнатной температуре облучения [5]. При высокодозном облучении упорядоченных сред в формировании морфологии поверхностей большую роль играют диффузионные процессы. При этом диффузия поверхностных атомов, вообще говоря, не является изотропной, обусловливая сильную и сложную зависимость морфологии от температуры. В частности, на низкоиндексных гранях ряда монокристаллов металлов и полупроводников в некоторых температурных интервалах в результате облучения развивается морфология в виде столбчатых топографических элементов с вертикальными стенками [15]. При этом высота топографических элементов может быть весьма большой, демонстрируя вклад диффузии в формирование морфологии.

На поверхности УПВ-1Т при повышенных температурах высокодозное облучение ионами N_2^+ энергией 30 кэВ под углом падения 60º, как показывает анализ при помощи РЭМ, приводит к морфологии с наклонными тупиковыми порами за счет образования столбчато-игольчатых топографических элементов. На рис. 4 *а*, *б* приведены характерные микрофотографии в кратере облучения и на периферии. Эти элементы наклонены в плоскости падения ионов относительно исходной поверхности, их торцевая часть и острия игольчатых элементов смотрят навстречу ионному пучку. Видно, что в кратере облучения, сомкнувшиеся в колонии, игольчатые элементы боковой поверхности столбчатых образований в плоскости, перпендикулярной оси ионного пучка, образуют волнообразный рельеф с периодом ~500 нм, что соответствует периоду структуры при облучении при комнатной температуре. Длина столбчато-игольчатых морфологических элементов в кратере облучения составляет ~10 мкм. Ранее отмечалось, что после облучения УПВ-1Т при комнатной температуре картины ДБЭО представляют собой диффузные гало, свидетельствуя об аморфизации поверхностного слоя. При повышенной температуре облучения картины ДБЭО вершин столбчато-игольчатых топографических элементов содержат размытые кольца, характерные для поликристаллических графитов. Такая же ситуация наблюдалась при облучении поликристаллических графитов и связывалась с динамическим отжигом радиационных нарушений при $T > T_a$ [19]. Для квазикристалла УПВ-1Т динамический отжиг радиационных нарушений, создаваемых при наклонном и скользящем падении ионов приводит к восстановлению его структуры. Наибольшее восстановление структуры наблюдается для элементов топографии поверхности, облучаемой ионами под большими локальными углами падения, т.е. в данном случае для боковых граней ионно-индуцированных столбчатых образований. Это показывают результаты ДБЭО в специальной геометрии съемки, в которой электронный пучок направляли на боковые грани ионно-индуцированных столбчатых образований, сформированных при скользящем ионном облучении. Типичные электронограммы при этом содержат отражения призматическими плоскостями графита в виде кольцевых семейств точечных отражений [5].

Анализ микрогеометрии методом ЛГФ показал, что описанные наклонные столбчато-игольчатые топографические элементы дают яркую полосу отраженного света, перпендикулярную плоскости падения ионов, свидетельствующую о наличии на поверхности цилиндрических морфологических элементов. Соответствующее распределение $F(\beta)$ локальных углов наклона микрограней в плоскости падения ионного пучка (в относительных единицах) приведено на рис. 5. Вставка на рисунке поясняет выбор знака локальных углов наклона относительно базовой поверхности и направления падения ионов с номинальным углом падения θ. В результате длительного облучения при $T > T_a$ микроплощадки с исходной базисной поверхностью в отличие от ситуации облучения при комнатной температуре практически не наблюдаются. Цилиндрообразной боковой поверхности столбчатых элементов соответствует резкий пик в распределении $F(\beta)$ с максимумом при $\beta = 27{,}5^\circ$. Учитывая, что локальные углы падения ионов на микрограни поверхности $\theta_{loc} = 60^\circ + \beta$, можно заключить, что доминирующая часть ионно-индуцированной поверхности при $T = 400$ ºС облучается ионами под локальными углами падения, близкими к 90º, т.е. в условиях, когда распыление подавляется в результате отражения ионов при скользящем падении на поверхность. Этот процесс приводит к известному максимуму θ_{max} в угловой зависимости коэффициента распыления. При распылении ионами азота энергией 15 кэВ гладкой поверхности неупорядоченного углерода максимальное значение коэффициента Y достигается при θ = 80—85º [20]. Анализ распределения $F(\beta)$ показывает также, что на поверхности имеется значительная часть микрограней с локальными углами $\beta > 30^\circ$, которые облучению не подвергаются и,

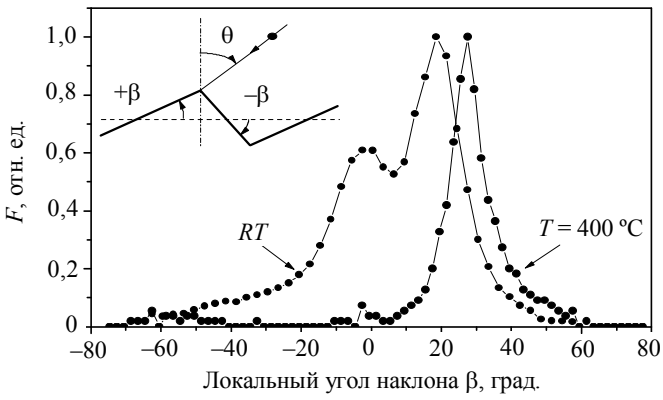

Рис. 5. Распределение локальных углов наклона микрограней ионно-индуцированного рельефа поверхности в плоскости падения ионов N_2^+ энергией 30 кэВ под углом θ = 60º относительно нормали к поверхности при двух температурах облучения. Вставка поясняет выбор знака локального угла β относительно базовой поверхности УПВ-1Т

следовательно, их образование при длительном ионном облучении в основном контролируется не столкновительным распылением, а ионно-индуцированными диффузионными процессами, что наиболее типично для поверхностей с упорядоченным расположением атомов [15]. В распределении $F(\beta)$, кроме интенсивного пика при $\beta = 27{,}5^\circ$, наблюдается также широкий купол небольшой амплитуды с максимумом при $\beta \approx -60^\circ$. Эта часть распределения $F(\beta)$ соответствует торцевой части столбчато-игольчатых элементов на поверхности, которые подвергаются облучению ионами под локальными углами $\theta_{loc} \approx 0$. Коэффициент распыления таких элементов согласно зависимости $Y(\theta)$ приблизительно в пять раз меньше значения Y при номинальном угле падения $\theta = 60^\circ$ [20]. Таким образом, можно заключить, что столкновительное распыление обоих типов доминирующих микрограней, составляющих столбчатые топографические элементы при высокодозном ионном облучении базисной плоскости УПВ-1Т при $T \approx 400$ °С, существенно подавляется по сравнению с распылением поверхности при номинальном угле падения $\theta = 60^\circ$ и комнатной температуре облучения. Другими словами, результаты исследования микрогеометрии ионно-индуцированной поверхности позволяют утверждать, что обнаруженное экспериментально многократное подавление распыления УПВ-1Т при повышенной температуре обусловлено именно формированием в данных условиях облучения специфической столбчато-игольчатой морфологии поверхности. Гониофотометрия показала также, что система столбчато-игольчатых элементов с крутыми стенками приводит не только к подавлению распыления, но и к сильному поглощению света, достигающему практически 100% при углах падения светового луча 40—60°.

На рис. 5 приведено также распределение $F(\beta)$ для ионно-индуцированного рельефа при комнатной температуре. Видно, что оно существенно отличается от распределения $F(\beta)$ при повышенной температуре, является более широким и имеет максимумы при $\beta = 0$ и 18,5°. Столкновительные коэффициенты распыления граней соответствуют либо номинальному углу падения $\theta = 60^\circ$ ($\beta = 0$), либо являются близкими к $Y(\theta_{max})$ ($\beta = 18$—21°). Конические образования, характеризующиеся углом θ_{max}, часто наблюдаются при столкновительном распылении и предсказываются макроскопической теорией эрозии как квазиравновесные структуры [13].

Элементный состав поверхностного слоя. Одной из причин развития рельефа на поверхности при ионном облучении является ее гетерогенность [10, 21, 22]. В частности, создание неоднородной по химическому составу поверхности является одним из методов получения развитой поверхности с помощью бомбардировки ионными пучками. В этой связи мы проанализировали элементный состав измененного поверхностного слоя. Анализ элементного состава поверхностного слоя проводили с помощью спектрометрии РОР с учетом ионно-индуцированной топографии поверхности. Спектры РОР снимали при двух направлениях зондирующего пучка в плоскости падения, в которой проводилось облучение мишени ионами азота, — вдоль и поперек азотного пучка.

На рис. 6 представлены спектры РОР до и после облучения при комнатной температуре и $T = 400$ °С, когда пучок ионов He^+ направляли вдоль пучка ионов азота. Спектр РОР, измеренный для необлученного образца, соответствует рассеянию ионов He^+ только на атомах углерода. В спектре для образца, облученного ионами азота при комнатной температуре, наблюдается пик имплантированного азота, а также пик кислорода. Кислород в поверхностном слое наблюдается также в поликристаллических графитах до и после аналогичных условий облучения [19, 20, 23]. Его наличие связывается с адсорбцией паров воды при более или менее длительной экспозиции образцов в атмосферных условиях перед их анализом. На исходной зеркальной поверхности УПВ-1Т кислород в спектрах РОР не наблюдается, что говорит об известной стойкости к атмосферному воздействию.

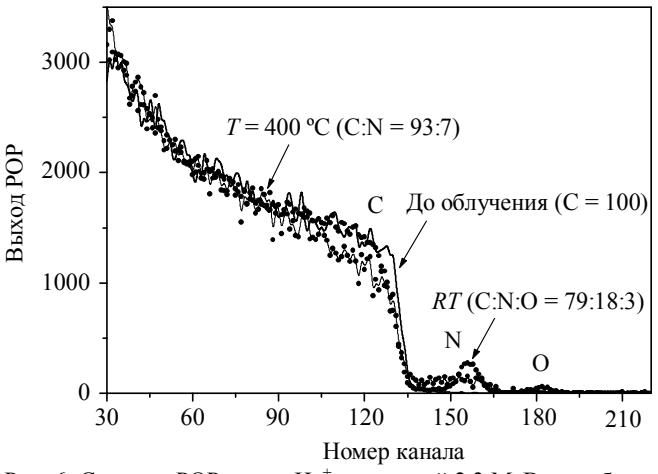

Рис. 6. Спектры РОР ионов He^+ с энергией 2,3 МэВ для образцов УПВ-1Т до и после облучения под углом $\theta = 60^\circ$ относительно нормали к поверхности образца ионами N_2^+ энергией 30 кэВ при комнатной температуре (*RT*) и $T = 400$ °С

Кислород не наблюдается также в спектре РОР для УПВ-1Т, облученном ионами азота при $T = 400$ ºС. Это свидетельствует о восстановлении химической инертности, в частности, гидрофобности поверхностного слоя материала по сравнению со случаем облучения при комнатной температуре. В образцах, облученных ионами азота при $T > T_a$, имплантированный азот фиксируется в виде протяженной ступеньки в спектре.

Моделирование РОР с помощью программы NBS [24] показало следующее. Спектр РОР для образца, облученного ионами азота при комнатной температуре, хорошо описывается в предположении глубины проникновения азота, равной сумме проективного пробега и его среднеквадратичного разброса (40 нм), и атомной концентрации азота 18%. В случае облучения при $T = 400$ ºС концентрация азота намного меньше — 7%, а глубина проникновения в пять раз больше, чем для случая облучения при комнатной температуре. Последнее, очевидно, связано с значительной активацией при 400 ºС радиационно-стимулированных диффузионных процессов. Сравнение с аналогичными данными РОР для поликристаллических графитов показывает близкое сходство поведения азота, имплантированного при $T < T_a$ и $T > T_a$ в этих углеродных материалах. Спектрометрия ЭПР для соскобов облученных графитов показывает при этом [23, 25], что при $T < T_a$ наблюдаются дефекты, типичные для разупорядоченного углерода, и центры, возникающие при взаимодействии атомов углерода с тремя ядрами азота — CN_3. При повышенной температуре, когда атомная концентрация азота примерно в три раза меньше, чем в случае имплантации при комнатной температуре, наблюдаются только графитоподобные дефекты.

При исследовании образца, облученного при комнатной температуре, в направлении, перпендикулярном направлению азотного пучка, амплитуда пика азота в спектре РОР существенно меньше соответствующей амплитуды при зондировании образца в направлении азотного пучка. Анализ ситуации с учетом микрогеометрии ионно-индуцированного рельефа показывает, что уменьшение амплитуды пика азота связано не с уменьшением его атомной концентрации в имплантированном слое, а с уменьшением глубины проникновения ионов азота, падающих под наклоном на анализируемую часть микрограней топографических элементов поверхности. При повышенной температуре спектры РОР для двух направлений зондирующего пучка ионов He^+ практически не отличаются. Другими словами, элементный состав измененного поверхностного слоя приблизительно одинаков как на боковых гранях, так и на торцах ионно-индуцированных топографических элементов. В этой ситуации можно предположить, что имплантированный азот не является основным фактором, определяющим эволюцию морфологии поверхности в процессе ионного облучения.

Радиационно-стимулированная перестройка текстуры. Описанное сильное различие характера морфологии поверхности квазикристалла УПВ-1Т, облучаемого при комнатной и повышенной температуре, когда активируются диффузионные процессы, позволяет предположить, что именно анизотропия диффузионных процессов в высокоориентированном пирографите является основным фактором формирования специфического ионно-индуцированного рельефа на его поверхности при облучении при $T > T_a$. Исследования ионно-индуцированной самодиффузии в пиролитическом графите показывают, что она является в основном двумерной в плоскости базиса кристаллитов и становится заметной уже при комнатной температуре [26]. Самодиффузия в направлении оси *c* практически отсутствует. Исследования в работе [26] показали также, что это свойство в пирографите сохраняется даже при сильном разупорядочении структуры, вызываемом ионным облучением.

Можно предположить, что именно это свойство графита [27] отвечает за обнаруженные в работе [28] различия ионно-индуцированной морфологии поверхности различных углеродных материалов. Было найдено, что при одинаковых условиях ионного облучения высокоориентированного пирографита, кристалла алмаза и *ta*—С-пленок аморфного углерода при комнатной температуре волнообразные структуры образуются только на поверхности высокоориентированного пирографита, что связывалось авторами с определяющей ролью объемных свойств, а именно плотности и кристаллической структуры, в развитии морфологии поверхности.

Влияние объемных свойств в еще большей степени должно сказываться на морфологии поверхности в случае облучения высокоориентированного пирографита при повышенной температуре облучения. В связи с тем, что эффект подавления распыления наиболее выражен при угле падения ионов ~60º, и тем, что боковые стороны столбчатых морфологических элементов в плоскости падения ионов согласно ЛГФ

имеют преимущественный угол наклона к поверхности ~30º, мы провели специальные рентгеноструктурные исследования. Анализировались как исходные образцы УПВ-1Т, так и образцы, подвергнутые облучению нейтронами, учитывая, что как ионное, так и нейтронное облучение может приводить к значительным радиационным нарушениям кристаллической структуры углеграфитовых материалов и изменению их текстуры [29—31]. С целью получения наибольшего интервала изменения угла поворота α при съемке текстурограмм использовали отражение (006). Рентгеноструктурный анализ показал, что в исследованных образцах УПВ-1Т радиационные нарушения под действием нейтронов приводят к уширению дифракционной линии (006). При этом $K_{\alpha 1,\ \alpha 2}$-дублет в CuK_α-излучении перестает разрешаться. Соответствующие результаты приведены на рис. 7, *а*. Съемка текстурограммы, т.е. зависимости интен-

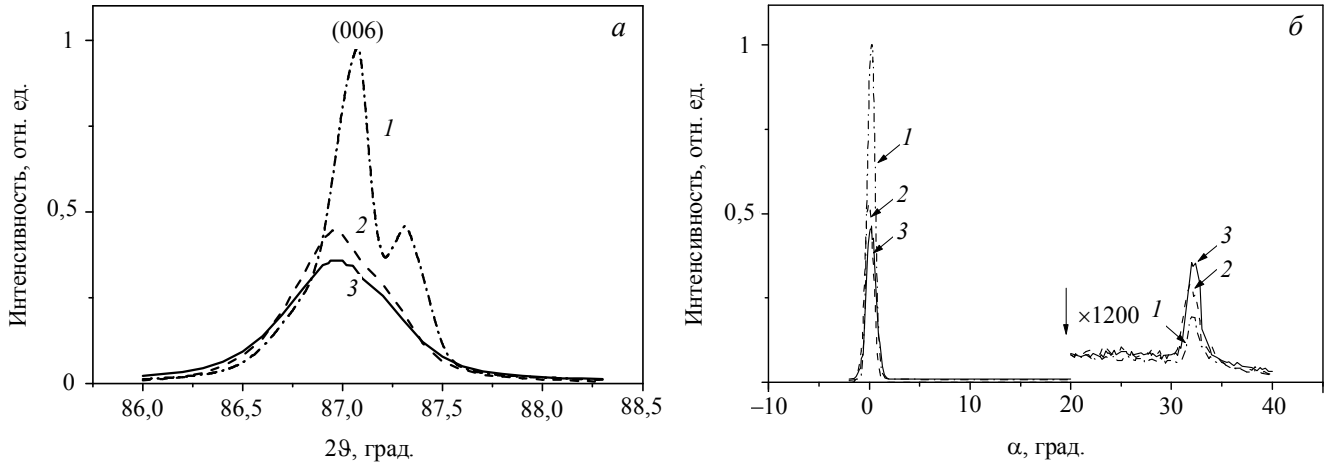

Рис. 7. Дифракционные линии (006) образцов УПВ-1Т (*а*) и текстурограммы для этой линии (*б*): *1* — до облучения; *2* — после облучения нейтронами при T = 70—90 ºС и Ф = $1{,}4\cdot10^{19}$ нейтрон/см^2; *3* — после облучения нейтронами при T = 700 ºС и Ф = $5\cdot10^{20}$ нейтрон/см^2

сивности $I(\alpha)$ отраженного рентгеновского излучения от угла поворота относительно направления [001] квазикристалла УПВ-1Т, показала следующее. Для отражения (006) ($2\vartheta \approx 87º$), кроме узкого интенсивного пика при $\alpha = 0$, наблюдаются два симметричных дополнительных пика меньшей интенсивности (рис. 7, *б*). Положение пиков $\alpha = \pm 32º$. Наличие этих пиков свидетельствует о том, что квазикристалл УПВ-1Т содержит не только кристаллиты с осью *c*, нормальной к поверхности, но и кристаллиты, ось *c* которых составляет с нормалью к поверхности угол ~32º. Наличия такого текстурного компонента в квазикристалле УПВ-1Т ранее не отмечалось [29, 30]. Это, вероятно, связано с тем, что текстурные исследования и контроль качества образцов УПВ-1Т проводились для линии (002) с интервалом изменения угла $\alpha < 13º$. Нейтронное облучение приводит к заметному изменению соотношения описанных компонентов при увеличении дозы и температуры облучения. Как видно на рис. 7, *б*, интенсивность основного компонента текстуры при этом уменьшается, а дополнительного — увеличивается.

Таким образом, рентгеновские исследования показывают, что объемные свойства квазикристалла УПВ-1Т характеризуются наличием, по крайней мере, двух текстурных компонентов — основного с осью [001], нормальной к поверхности пластинки УПВ-1Т, и дополнительного с осью [001], направленной под углом 32º к нормали относительно поверхности УПВ-1Т. Радиационные повреждения приводят к перераспределению этих компонентов в материале — уменьшению основного текстурного компонента и росту дополнительного.

Углеграфитовые материалы часто выделяют в отдельный класс при исследованиях механизмов радиационных повреждений [1, 27]. Смещение атомов из равновесных положений приводит к анизотропным напряжениям в решетке и объемным размерным изменениям, развитию микропористости, изменению других физических свойств материала. Исследования внутренних напряжений в высокоориентированном пирографите при облучении быстрыми нейтронами указывают на развитие процессов, сходных с полигонизацией, в результате которой формируются субзерна, каждое из которых отделено от других дислокационной стенкой [30]. Учитывая, что пластическая деформация при релаксации напряжений в гексагональной решетке графита происходит через двойникование кристаллитов, можно предположить,

что обнаруженная перестройка текстуры при нейтронном облучении УПВ-1Т также обусловлена двойникованием.

Двойникование кристаллитов высокоориентированного пиролитического графита является одним из основных ионно-индуцированных процессов в поверхностном слое [32, 33]. В работе [32] отмечалось, что плотность двойников растет с увеличением энергии, флюенса облучения ионами и температуры мишени. Аналогичную картину мы также наблюдали с помощью оптического микроскопа на дальней периферии зоны облучения поверхности УПВ-1Т. Можно предположить, что ионно-индуцированное двойникование кристаллитов поверхностного слоя базисной плоскости УПВ-1Т приводит к аналогично наблюдаемой текстурной перестройке при нейтронном облучении и что именно эти текстурные изменения являются ответственными за формирование наклонных столбчато-игольчатых морфологических элементов при ионном облучении. Доминирующий угол наклона столбчатых элементов относительно базисной плоскости УПВ-1Т, образующихся при угле падения ионов 60º, составляет около 30º и является близким к наклону оси [001] текстурного компонента, рост которого стимулируется радиационными нарушениями в материале. Соответствующее этому компоненту структуры морфологическое образование за счет доминирующей двумерной диффузии в базисной плоскости растет на поверхности УПВ-1Т только в плоскости падения ионов, т.е. в условиях минимального ионно-лучевого столкновительного распыления. Радиационные нарушения, вносимые ионным облучением, вызывают разбухание и коалесценцию растущих столбчатых образований за счет образования новых графитовых экстраплоскостей при кластеризации смещенных атомов углерода [27].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе экспериментально исследованы морфология, элементный состав и структура поверхностного слоя, формирующегося при падении ионов N_2^+ энергией 30 кэВ под углом падения 60º на базисную плоскость высокоориентированного пиролитического графита марки УПВ-1Т при температуре ниже и выше температуры $T_a \approx 170$ ºС, ответственной за отжиг радиационных нарушений при непрерывной ионной бомбардировке.

При комнатной температуре облучения ионно-индуцированный рельеф на поверхности УПВ-1Т является квазипериодическим, характерным для высоких флюенсов ионного облучения аморфных материалов, и контролируется столкновительным распылением. При повышенной температуре (T = 400 ºС) высокодозное облучение ионами N_2^+ энергией 30 кэВ под углом падения 60º приводит на базисной плоскости УПВ-1Т к морфологии с наклонными тупиковыми порами за счет образования столбчато-игольчатых топографических элементов, формирование которых обусловлено в основном ионно-индуцированными диффузионными процессами. Столкновительное распыление обоих типов доминирующих микрограней, составляющих столбчатые топографические элементы, существенно подавляется по сравнению с распылением поверхности при номинальном угле падения $\theta = 60^\circ$.

Эффект трехкратного подавления распыления при повышенной температуре мишени (T = 400 ºС) по сравнению с распылением при комнатной температуре проявляет стабильность в исследованном интервале флюенса облучения ($4\cdot10^{19}$—$12\cdot10^{19}$ ион/см^2). В три раза меньшее значение Y при наклонном падении ионов является близким к соответствующему коэффициенту распыления Y при нормальном падении ионов на мишень.

Элементный состав измененного поверхностного слоя УПВ-1Т приблизительно одинаков как на боковых гранях, так и на торцах ионно-индуцированных топографических элементов. Атомная концентрация азота составляет 18% при облучении при комнатной температуре, при T = 400 ºС концентрация азота намного меньше — 7%.

Согласно рентгеновскому анализу квазикристалл УПВ-1Т характеризуется наличием двух текстурных компонентов — основного с осью [001], нормальной к поверхности пластинки УПВ-1Т, и дополнительного с осью [001], направленной под 32º относительно поверхности УПВ-1Т. Радиационные повреждения приводят к уменьшению основного текстурного компонента и росту дополнительного.

Можно предположить, что ионно-индуцированное двойникование кристаллитов приводит к текстурной перестройке поверхностного слоя УПВ-1Т аналогично наблюдаемой при нейтронном облучении и эти текстурные изменения отвечают за формирование наклонных столбчато-игольчатых морфологических элементов при ионном облучении с учетом анизотропии диффузионных процессов в высокоориентированном пиролитическом графите.

Авторы выражают благодарность М.А. Тимофееву за анализ поверхностей при помощи растровой электронной микроскопии и Е.А. Питиримовой за анализ при помощи дифракции быстрых электронов на отражение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Виргильев Ю.С.** Конструкционные углеродные материалы для установок термоядерного синтеза. — Неорганические материалы, 1994, т. 30, с. 903.
2. **Фиалков А.С.** Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе. — М.: Аспект-пресс, 1997. 718 с.
3. **Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Машкова Е.С., Немов А.С.** Распыление высокоориентированного пирографита при высокодозной бомбардировке молекулярными ионами азота. — Известия РАН. Сер. физ., 2006, т. 70, с. 820—824.
4. **Borisov A.M., Mashkova E.S., Nemov A.S., Virgiliev Yu.S.** Sputtering of HOPG under high-dose ion irradiation. — Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. B, 2007, vol. 256, p. 363—367.
5. **Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Машкова Е.С., Немов А.С., Питиримова Е.А.** Угловые и температурные зависимости ионно-электронной эмиссии высокоориентированного пирографита. — Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтр. исслед., 2006, № 1, с. 7—13.
6. **Клечковская В.В., Ракова Е.В., Тихонова А.А., Толстихина А.Л.** Электронография как метод исследования поверхностных слоев и тонких пленок. — Итоги науки и техники. Сер. Пучки заряженных частиц и твердое тело. Т. 3. — М.: ВИНИТИ, 1990, с. 98—155.
7. **Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Машкова Е.С., Немов А.С.** Исследование рельефа, развивающегося на поверхности поликристаллической меди при высокодозном распылении ионами аргона. — Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтр. исслед., 2005, т. 3, с. 79—84.
8. **Топорец А.С.** Оптика шероховатой поверхности. — М.: Машиностроение, 1988. 191 с.
9. **Cramer S.N., Oblow E.M.** Feasibility study of a honeycomb vacuum wall for fusion reactors — Nucl. Fusion, 1975, vol. 15, p. 339—343.
10. **Ziegler J.F., Cuomo J.J., Roth J.** Reduction of ion sputtering yield by special surface microtopography. — Appl. Phys. Letters, 1977, vol. 30, p. 268—271.
11. **Mattox D.M., Sharp D.J.** Influence of surface morphology on the low energy hydrogen ion erosion yields of beryllium. — J. Nucl. Mater., 1979, vol. 80, p. 115—119.
12. **Hopman W.C.L., Ay F., Hu W., Gadgil V.J., Kuipers L., Pollnau M., de Ridder R.M.** Focused ion beam scan routine, dwell time and dose optimizations for submicrometre period planar photonic crystal components and stamps in silicon. — Nanotechnology, 2007, vol. 18, p. 195305 (11 p.).
13. **Carter G.** The physics and applications of ion beam erosion. — J. Phys. D: Appl. Phys., 2001, vol. 34, p. R21—R22.
14. **Habenicht S.** Morphology of graphite surfaces after ion-beam erosion. — Phys. Rev. B., 2001, vol. 63, p. 125419 (7 p.).
15. **Chan W.L., Chason E.** Making waves: kinetic processes controlling surface evolution during low energy ion sputtering. — J. Appl. Phys., 2007, vol. 101, p. 121301 (46 p.).
16. **Sigmund P.** Theory of sputtering. I. Sputtering yield of amorphous and polycrystalline targets. — Phys. Rev., 1969, vol. 184, p. 383—416.
17. **Sigmund P.** A mechanism of surface micro-roughening by ion bombardment. — J. Mater. Sci., 1973, vol. 8, p. 1545—1559.
18. **Bradley R.M., Harper J.M.E.** Theory of ripple topography induced by ion bombardment. — J. Vac. Sci. Technol. A, 1988, vol. 6, p. 2390—2395.
19. **Борисов А.М., Машкова Е.С., Экштайн В.** Закономерности распыления и электронной эмиссии графита при высокодозном облучении ионами азота. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2002, вып. 1—2, с. 122—135.
20. **Borisov A.M., Eckstein W., Mashkova E.S.** Sputtering and ion induced electron emission of graphite under high dose nitrogen bombardment. — J. Nucl. Mater., 2002, vol. 304, p. 15—20.
21. **Elst K., Vandervorst W.** Influence of the composition of the altered layer on the ripple formation. — J. Vac. Sci. Technol. A, 1994, vol. 12, p. 3205—3216.
22. Распыление под действием бомбардировки частицами. Вып. 3. Характеристики распыленных частиц, применения в технике. Под ред. Р. Бериша и К. Виттмака. — М.: Мир, 1998. 551 с.
23. **Bogomolova L.D., Borisov A.M., Kurnaev V.A., Mashkova E.S.** Modification of graphite surface layers by nitrogen ion irradiation. — Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res.B, 2003, vol. 212, p. 164—168.
24. **Romanovsky E.A., Bespalova O.V., Borisov A.M., Goryga N.G., Kulikauskas V.S., Sukharev V.G., Zatekin V.V.** On carbon nitride synthesis at high-dose ion implantation. — Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. B, 1998, vol. 139, p. 355—358.
25. **Bogomolova L.D., Borisov A.M., Krasil'nikova N.A., Mashkova E.S., Nemov A.S., Tarasova V.V.** Study of near surface layer of graphite produced by nitrogen ion bombardment at high doses. — Radiat. Effects and Defects in Solids, 2002, vol. 157, p. 493—508.
26. **Soder D., Roth J., Moller W.** Anisotropy of ion-beam-induced self-diffusion in pirolitic graphite — Phys. Rev., 1988, vol. B 37, p. 815—825.

27. **Burchell T.D.** Radiation effects in graphite and carbon-based materials. — MRS Bulletin, 1997, vol. 22, № 4, p. 29—35.
28. **Takahiro K., Zhang K., Rotter F., Scwen D., Ronning C., Hofsass H., Krauser J.** Morphological change of carbon surface by sputter erosion. — Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. B, 2007, vol. 256, p. 378—382.
29. **Виргильев Ю.С., Гундорова Н.И., Куроленкин Е.И., Лебедев Ю.Н., Макарченко В.Г., Непрошин Е.И., Попелюхина М.И., Харитонов А.В.** Изменение структуры и свойств высокоориентированного пиролитического графита при нейтронном облучении. — Изв. АН СССР. Сер. Неорганические материалы, 1980, т. 16, № 4, с. 669—673.
30. **Виргильев Ю.С., Гундорова Н.И., Куроленкин Е.И., Непрошин Е.И., Харитонов А.В.** Радиационные эффекты при облучении высокоориентированного пирографита. — Физика и химия обработки материалов, 1982, № 2, с. 3—8.
31. **Виргильев Ю.С., Чугунова Т.К., Макарченко В.Г., Муравьева Е.В.** Воздействие радиации на структуру и свойства пиролитического графита. — Изв. АН СССР. Сер. Неорганические материалы, 1984, т. 20, № 8, с. 1378—1382.
32. **Bacon D.J., Rao A.S.** The structure of graphite bombarded with light, gaseous ions. — J. Nucl. Mater., 1980, vol. 91, p. 178—188.
33. **Niwase K., Tanabe T.** Modification of graphite structure by D^+ and He^+ bombardment — II. — J. Nucl. Mater., 1991, vol. 179—181, p. 218—222.

Статья поступила в редакцию 6 марта 2008 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2008, вып. 4, с. 37—48.

УДК 533. 924

ВЛИЯНИЕ АММИАКА НА ПЕРЕНОС И ОСАЖДЕНИЕ УГЛЕВОДОРОДНЫХ РАДИКАЛОВ В РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА С ПОЛЫМ КАТОДОМ

В.Л. Буховец, А.Е. Городецкий, Р.Х. Залавутдинов, А.П. Захаров
(Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН)

Рассмотрено влияние аммиака (NH_3) на скорость осаждения аморфных углеводородных (a-C:H)-пленок в тлеющем разряде постоянного тока на основе проточной смеси водород—метан. Скорость осаждения измерялась ex-situ-методом рентгеноспектрального микроанализа. Добавление аммиака к потоку H_2—CH_4 в количестве, равном потоку метана, полностью подавляло осаждение a-C:H-пленок в полом катоде, уменьшало скорость роста пленок в области положительного столба, но увеличивало скорость их осаждения в области послесвечения. Масс-спектрометрический анализ газовых потоков в тлеющем разряде, расчет массового баланса газообразных и твердых продуктов плазмолиза показали, что подавление осаждения a-C:H-пленок в полом катоде вызвано последовательными реакциями осаждения и эрозии пленок с образованием синильной кислоты (HC≡N).

Ключевые слова: тлеющий разряд, углеводородные пленки, осаждение, удаление, аммиак, токамак, дивертор.

AMMONIA INFLUENCE ON TRANSPORT AND DEPOSITION OF HYDROCARBON RADICALS IN DIFFERENT REGIONS OF GLOW DISCHARGE WITH HOLLOW CATHODE. V.L. BUKHOVETS, A.E. GORODETSKY, R.Kh. ZALAVUTDINOV, A.P. ZAKHAROV. The ammonia (NH_3) influence on deposition rate of amorphous hydrocarbon (a-C:H) films in a direct current glow discharge on the base of a flowing hydrogen/methane mixture has been considered. The deposition rate was measured ex-situ by electron probe microanalysis. The ammonia addition to the H_2—CH_4 mixture in the amount equal to methane flow rate suppressed completely the a-C:H-films deposition in a hollow cathode, decreased a film growth rate in a positive column region but increased a film deposition rate in an afterglow region. The mass-spectrometry analysis of the gas flows in the glow discharge, a mass balance calculation of plasmolysis gaseous and solid products showed that a-C:H-films deposition suppression in the hollow cathode was caused by successive reactions of the film deposition and erosion with the formation of hydrocyanic acid (HC≡N).

Key words: discharge glow, hydrocarbon films, deposition, removal, ammonia, tokamak, divertor.