

УДК 539.211

Элементный состав и свойства поверхности графита, облученного ионами ксенона

А.И.Туровец, И.С.Ташлыков

Белорусский государственный педагогический университет им. М. Танка, Минск, Беларусь
E-mail: antowa.tur@tut.by; tashl@bspu.unibel.by
Поступила в редакцию 6 декабря 2012 г.

Изучено влияние облучения ионами Xe^+ на структуру, элементный состав, топографию и смачиваемость поверхности графита. Показано, что с увеличением дозы облучения концентрация Xe на поверхности графита возрастает, а в более глубоких слоях — уменьшается. Установлено, что вызванное ионным облучением изменение топографии поверхности графита приводит к ее гидрофобизации.

Ключевые слова: графит, ионное облучение, морфология поверхности, смачиваемость, резерфордское обратное рассеяние, атомно-силовая микроскопия.

Effects of Xe^+ ion irradiation on the structure, elemental composition, topography, and wettability of the surface of graphite have been investigated. With ion irradiation fluence increase, Xe content on the graphite surface is found to be increased, and decreased in the deeper subsurface layers. It is ascertained that ion irradiation leads to the change of topography and hydrophobization of graphite surface.

Keywords: graphite, ion irradiation, surface morphology, wettability, Rutherford backscattering, atomic force microscopy.

Введение

Благодаря низкому коэффициенту теплового расширения и связанной с этим высокой стойкостью к температурным напряжениям графит применяется как незаменимый вспомогательный материал в металлообрабатывающей, чугунолитейной и сталелитейной промышленности. Важным преимуществом графита при этом является его несмачиваемость полностью восстановленными металлами и нейтральными шлаками. Применение графита при отливке деталей повышает качество отливок, уменьшает количество брака и предупреждает образование пригара. В машиностроении графит также используется как антифрикционный материал для подшипников, колец трения, торцевых и поршневых уплотнений, подпятников.

В последние десятилетия были открыты наноразмерные формы углерода, такие как фуллерены [1], углеродные нанотрубки [2,3] и графен [4], имеющие гигантский потенциал для применения. Например, механическая жесткость и прочность этих материалов беспрецедентна. Кроме того, благодаря специфическим электронным свойствам углеродные нанотрубки и графен могут стать основой электроники следующего поколения.

Из-за высокого сопротивления коррозии и низкого эффективного сечения поглощения нейтронов чистый графит используется как строительный материал и замедлитель быстрых нейтронов в ядерных реакторах деления [5,6]. Однако постоянное облучение нейтронами неизбежно вызывает изменения в структуре и свойствах графита, создавая напряжения и трещины [7,8]. Поведение графита при

облучении должно быть тщательно изучено, чтобы гарантировать безопасность реакторов в течение всего срока их работы.

Так как облучение нейтронами является достаточно дорогим и трудоемким процессом, для моделирования возможных изменений в графите предпочтительнее использовать облучение ионами, что позволяет ускорить исследования радиационно-стимулированных изменений структуры и морфологии поверхности. При ионном облучении вследствие столкновения ионов с атомами мишени в поверхностном слое материала происходит образование радиационных дефектов и обогащение внедренными примесными атомами. Оба эти процесса способны приводить к изменению свойств поверхности материала [9,10], а также к формированию наноразмерных структур с особыми свойствами [11-14].

В этой связи актуальными представляются исследования коэффициента распыления графита разных марок и его зависимости от угла падения бомбардирующих ионов, таких как водород, дейтерий, гелий, азот, аргон, а также влияния рельефа поверхности графита на распыление его поверхности [15-18]. Были изучены особенности наноструктурирования поверхности алмазоподобных пленок водорода, а также изменение их электронных и оптических свойств при бомбардировке ионами C^+ и He^+ [19,20], исследован захват кислорода, водорода и дейтерия в графите при ионной бомбардировке [21,22], механизмы и продукты эрозии при облучении графитов потоками водородной плазмы [23], поверхностные и объемные дефекты, морфология, элементный состав и структура поверхностного слоя графитов при облучении осколками деления и ионами He^+ , N^+ , Ar^+ , Cr^+ , He^+ , Bi^+ и другими тяжелыми ионами при различных дозах облучения [24-33].

Вместе с тем, недостаточно изученными остаются процессы ионно-стимулированного перераспределения компонентов графита по глубине, локализации имплантированной примеси и развития морфологии поверхности на нанометровом уровне. Недостаточно данных и о влиянии ионного облучения на смачиваемость водой поверхности графита.

В данной работе исследовано влияние облучения графита ионами He^+ на структуру, элементный состав, топографию поверхности и смачиваемость графита.

Методика эксперимента

Образцы для облучения изготавливались из природного графита (Камбрия, Англия) в виде прямоугольных параллелепипедов размером $10 \times 8 \times 2$ мм.

После шлифовки алмазной пастой образцы облучали пучком ионов He^+ с энергией $E=20$ кэВ с плотностью тока $j_{cp} = 1,2$ мкА/см² дозами $1 \cdot 10^{14}$, $3 \cdot 10^{14}$, $1 \cdot 10^{15}$ и $3 \cdot 10^{15}$ см⁻². Облучение проводили в вакууме $\sim 4 \cdot 10^{-4}$ Па. Держатель образцов защищался охлаждаемым жидким азотом экраном, что позволяло исключить переосаждения элементов, распыляемых в процессе облучения с поверхности образца.

Элементный состав поверхности образцов изучался методом резерфордовского обратного рассеяния (РОР) ионов гелия с энергией 2 МэВ в геометрии рассеяния, при которой углы рассеяния, влета и вылета составляли $\Theta=168^\circ$, $\Theta_1=0^\circ$ и $\Theta_2=12^\circ$ соответственно. Энергетическое разрешение детектора $\Delta E=25$ кэВ обеспечивало анализ слоев графита глубиной 45 нм. Концентрационное распределение элементов по глубине определялось путем компьютерного моделирования с применением программы RUMP экспериментальных спектров РОР в каждом исследуемом слое [34]. Точность определения концентрации тяжелых элементов в каждом слое достигала тысячных долей ат.%, а легких элементов — не хуже 1-2%. Общая глубина послойного анализа достигала 2 мкм.

Морфология поверхности графита исследовалась с помощью атомно-силового микроскопа NT-206 в контактном режиме с вертикальным разрешением 0,2-0,5 нм с использованием кремниевых зондов типа CSC21 "MicroMash", обеспечивающих точное отображение элементов поверхности диаметром более 30 нм и сканирование участков размером до 3 мкм на 512 точек выборки без потери разрешения. Для получения двух- и трехмерных изображений поверхности и определения ее шероховатости использовалась программа Surface Explorer.

Применение в атомно-силовом микроскопе четырехсекционного фотодетектора позволило одновременно регистрировать вариации сил взаимодействия (нормальные и латеральные) кончика иглы кантилевера с исследуемой поверхностью от точки к точке. Нормальные отклонения зонда формируют топографический контраст поверхности (topography), а латеральные (torsion) отклонения обусловлены преимущественно различием трибологических свойств структурных элементов поверхности. Метод латеральных сил позволяет выделять области с различным действием сил трения, которые возникают вследствие упругости, адгезии, вязкости, капиллярных сил, химических особенностей и др. Величина латеральных сил характеризовалась средним значением Z_{mean} , измеряемым в условных единицах.

Данные о гидрофильности поверхности образцов получали, измеряя равновесный краевой угол

смачивания (РКУС) на установке [35]. Ошибка в измерении РКУС составляет менее 1%.

Результаты и обсуждение

Элементный состав графита

На рис.1 приведены энергетические (экспериментальный и расчетный) спектры РОР ионов He⁺ от образца графита, облученного ионами Хе⁺. Как следует из спектров, в состав графита кроме углерода входит кислород, кремний, кальций и вольфрам, а после облучения появляется сигнал от внедренного в графит ксенона. Моделирование спектров показало, что в исходных образцах содержится ~5 ат.% О, ~1 ат.% Si, ~0,1 ат.% Ca и ~0,02 ат.% W. Следует отметить значительное (20-25 ат.%) содержание водорода. Наличие W, Ca, Si, O и H, по-видимому, связано с условиями формирования природного графита.

На рис.2 представлены профили распределения компонентов по глубине образца, полученные в результате послойного анализа графита, облученного ионами Хе⁺ дозой 1·10¹⁴ см⁻². Как видно, после облучения концентрация кислорода и вольфрама в графите не меняется, профили распределения по глубине Ca и Si схожи, хотя содержание Si в ~3 раза выше при любой дозе облучения, а содержание водорода снижается от 20-30 ат.% в приповерхностном слое толщиной 45 нм до 5-9 ат.% — в объеме. Характер распределения элементов по глубине образца качественно не меняется после любых доз ионного облучения.

Расчитанный по программе TRIM [36] проективный пробег ионов Хе⁺ с энергией 20 кэВ в графите равен R_p=19,5 нм, а среднеквадратичное отклонение пробега ионов в продольном направлении составляет ΔR_p=3,6 нм. Согласно результатам послойного анализа, максимальная концентрация Хе наблюдается в слое толщиной 45 нм, что согласуется с расчетными данными для R_p и ΔR_p (рис.3).

Увеличение дозы облучения ионами Хе⁺ с 1·10¹⁴ до 1·10¹⁵ см⁻² сопровождается незначительным (на 18%) ростом концентрации Хе в области пика при снижении его концентрации по всей толщине анализируемого слоя. Этот же эффект, только более ярко выраженный, наблюдается при увеличении дозы облучения до 3·10¹⁵ см⁻². В приповерхностном слое графита концентрация Хе увеличивается в ~3,3 раза, достигая 0,43 ат.%, а в объеме снижается в ~2-15 раз, в зависимости от глубины анализируемого слоя.

Дозовые зависимости содержания Хе на разных глубинах образца графита представлены на рис.4. Как видно, с ростом дозы облучения концентрация Хе на

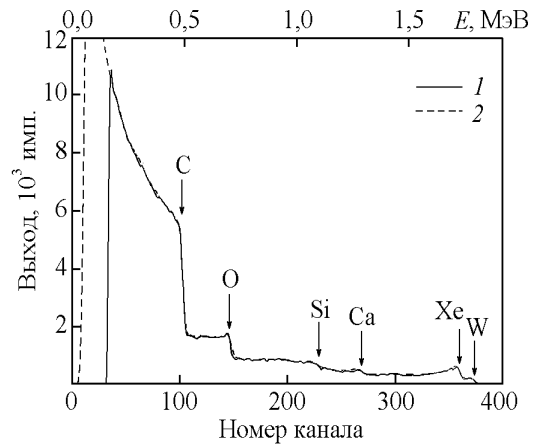


Рис.1. Экспериментальный (1) и расчетный (2) спектры РОР ионов He⁺ с E₀=2 МэВ от образца графита, облученного ионами Хе⁺ дозой 1·10¹⁴ см⁻².

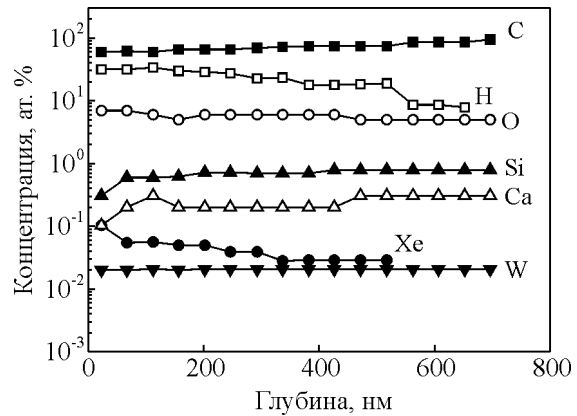


Рис.2. Распределение по глубине примесных элементов в графите, облученном ионами Хе⁺ дозой 1·10¹⁴ см⁻².

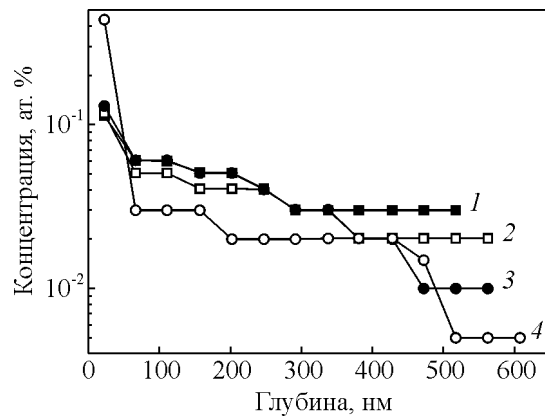


Рис.3. Распределение по глубине атомов Хе, имплантированных в графит. Доза облучения: 1 — 1·10¹⁴ см⁻²; 2 — 3·10¹⁴ см⁻²; 3 — 1·10¹⁵ см⁻²; 4 — 3·10¹⁵ см⁻².

поверхности возрастает, а в объеме — уменьшается, так что наблюдаемое увеличение содержания Хе на поверхности происходит не только за счет накопления внедренных атомов с увеличением дозы облучения,

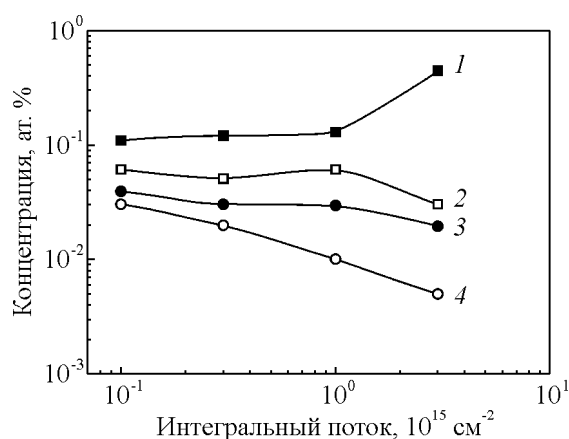


Рис.4. Дозовая зависимость концентрации имплантированного Хе в слое графита толщиной 45 нм на глубине: 1 — 45 нм; 2 — 112 нм; 3 — 292 нм; 4 — 520 нм.

но и вследствие миграции атомов ксенона из объема на поверхность.

В отличие от кремния, в котором Хе не растворяется [37] и поэтому не диффундирует при ионном облучении, в облученном графите Хе обнаруживается на глубинах ~500 нм и более, что в десятки раз превышает значения $R_p + \Delta R_p$. Таким образом,

можно сделать вывод, что при ионном облучении в графите протекает направленная вглубь образца радиационно-стимулированная диффузия атомов ксенона.

Топография поверхности облученного графита

Из результатов проведенных расчетов следует, что при облучении графита ионами Хе⁺ дозой $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и выше происходит многократное перекрытие каскадов смещения, что не позволяет наблюдать результаты единичного воздействия ионов на поверхность образца. При плотности тока ионного пучка $j_{\text{ср}} = 1,2 \text{ мкА/см}^2$ каждую секунду на площадь $\sim 13 \text{ нм}^2$ попадает один ион, тогда как страгглинг пробега ионов Хе⁺ с энергией 20 кэВ в поперечном направлении составляет 2,9 нм [36], то есть площадь поперечного сечения каскада смещений в два раза больше — $\sim 26 \text{ нм}^2$. Следовательно, можно считать, что за 1 с происходит перекрытие не менее двух каскадов, создаваемых ионами Хе⁺ в графите.

Изображения поверхности исходного графита и графита, имплантированного разными дозами ионов Хе⁺, представлены на рис.5. Параметры, характери-

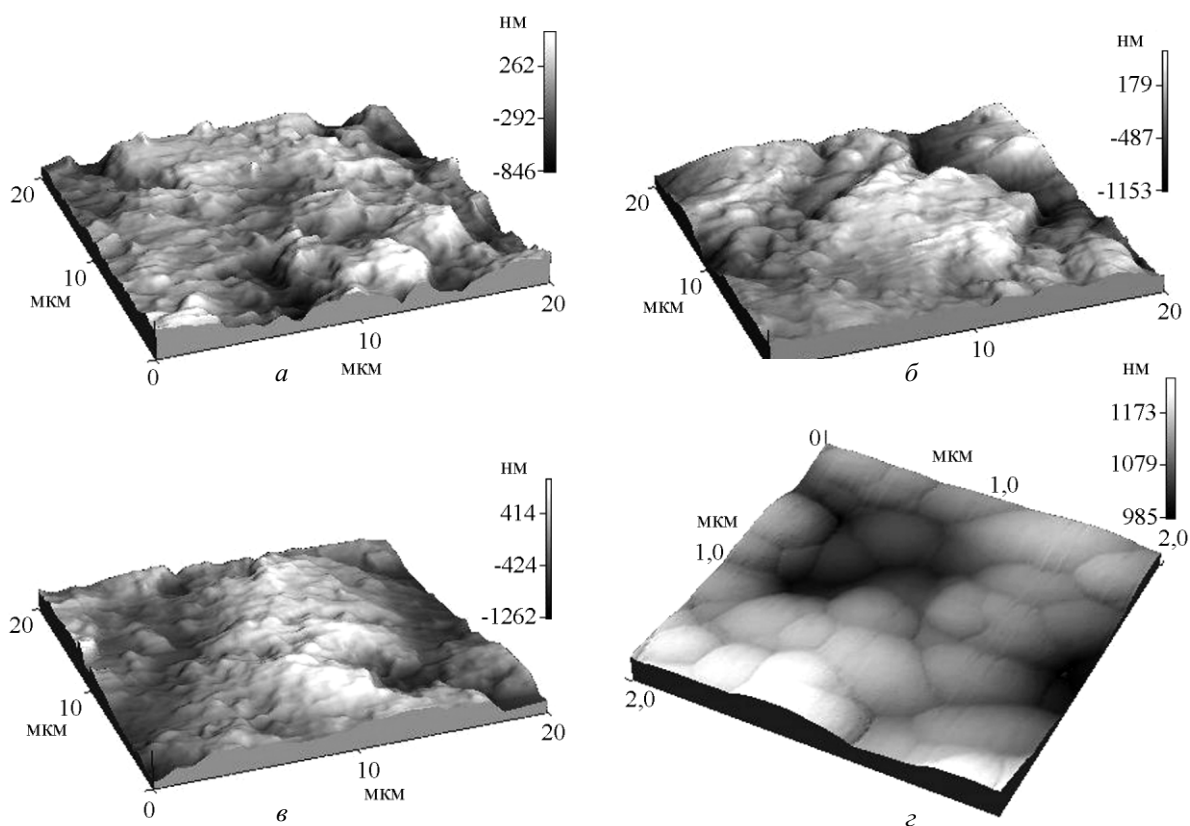


Рис.5. 3-D АСМ-изображение поверхности графита в исходном состоянии (а) и облученного ионами Хе⁺ дозами $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (б), $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (в) и $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (г).

зующие морфологию поверхности образцов, приведены в Таблице.

Как видно, шероховатость исходной поверхности графита обусловлена наличием крупных (~15-20 мкм) и мелких (1-2 мкм) чешуек и пор между ними (рис.5а). При облучении дозой $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ происходит распыление преимущественно мелких чешуек (рис.5б) и углубление пор между ними, в результате чего полная площадь поверхности уменьшается, а ее средняя шероховатость возрастает. Морфология поверхности становится более простой и и представляет собой совокупность крупных неоднородностей, разделенных глубокими порами.

При дозе облучения $\geq 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ происходит более равномерное распыление поверхности. Поры между неоднородностями расширяются, а чешуйки (и крупные, и мелкие) приобретают округлую форму, что приводит к уменьшению полной площади и средней шероховатости поверхности графита (рис.5в).

Характерной особенностью поверхности графита после облучения ионами Xe^+ дозой $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ является появление полусферических чешуек диаметром от 0,2 до 0,8 мкм (рис.5з), связанное, по-видимому, с образованием скоплений атомов ксенона в поверхностном слое. Косвенное подтверждение этого было получено при АСМ исследовании поверхности графита, имплантированной ионами Xe^+ дозой $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, в разных режимах. На рис.6а приведено трехмерное АСМ изображение поверхности графита, полученное в режиме "topography", в на рис.6б — в режиме "torsion". Области поверхности облученного графита, покрытые чешуйками, обладают более низким, чем гладкие области, сопротивлением механическому воздействию, что можно объяснить возникновением локальных скоплений ксенона в поверхностных слоях графита.

В работе [26] было качественно установлено, что при облучении графита ионами He^+ , Ar^+ и Bi^+ с

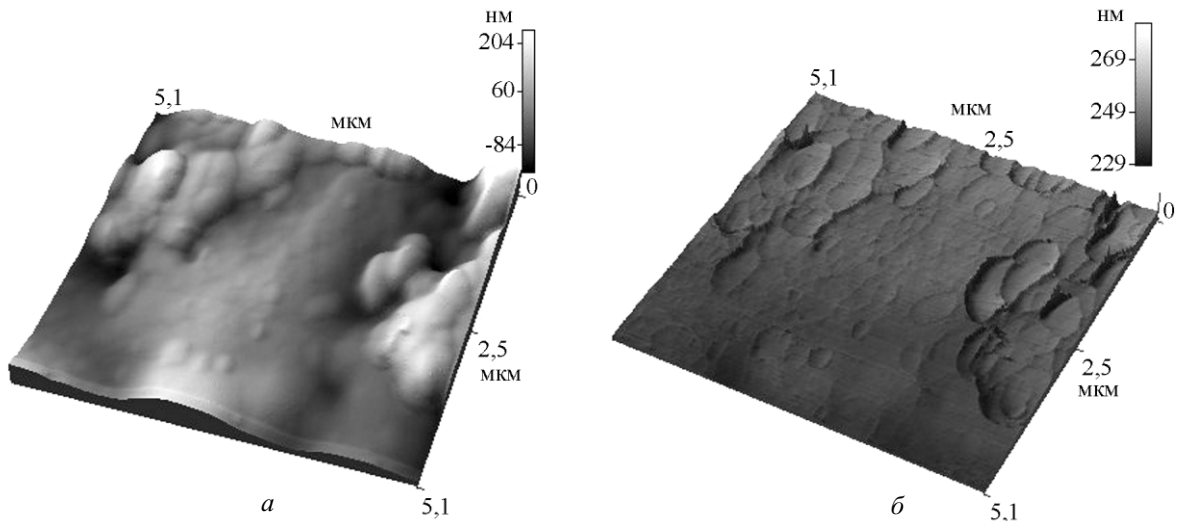


Рис.6. 3D АСМ-изображение поверхности графита, облученного ионами Xe^+ дозой $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, полученное в режиме "topography" (а) и "torsion" (б).

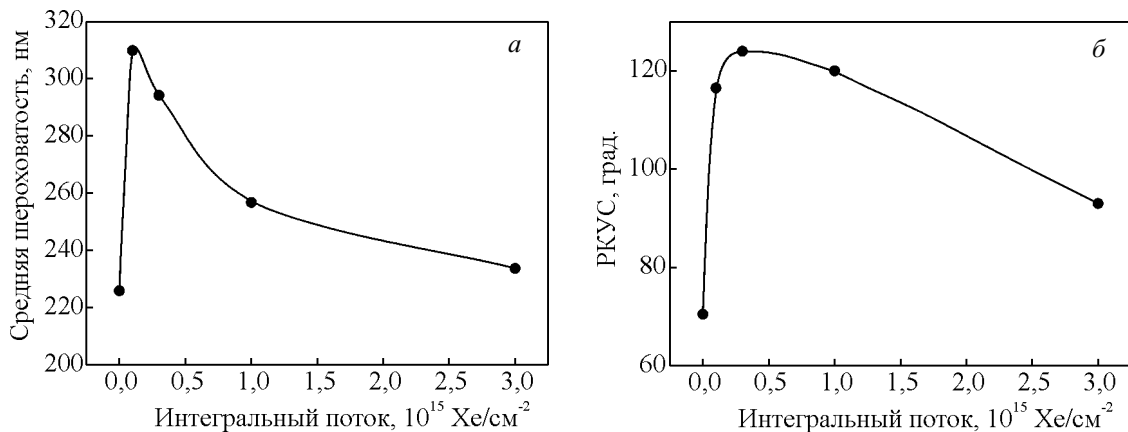


Рис.7. Дозовые зависимости средней шероховатости (а) и РКУС (б) поверхности графита, облученного ионами Xe^+ .

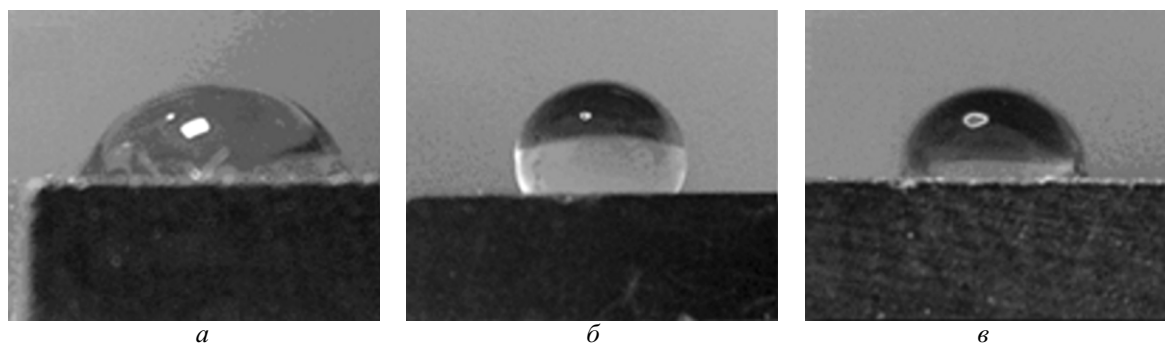


Рис.8. Фотографии капли на поверхности исходного графита (а) и графита, облученного ионами Xe^+ дозами $3 \cdot 10^{14}$ (б) и $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (в).

энергиями 20-30 кэВ дозами 10^{14} - 10^{16} см^{-2} существует некоторая пороговая доза облучения, различная для разных ионов, при превышении которой степень шероховатости поверхности снижается или, по крайней мере, не меняется. Согласно нашим результатам, при облучении графита ионами Xe^+ с энергией 20 кэВ таким пороговым значением является доза облучения $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Средняя шероховатость исходного графита составляет $R_a = 226,2 \text{ нм}$, возрастает на 37% после облучения ионами Xe^+ дозой $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и снижается при дальнейшем увеличении дозы (рис.7а). Такая дозовая зависимость дает возможность изменять шероховатость поверхности графита путем изменения дозы облучения.

Можно предложить несколько механизмов, ответственных за формирование поверхности облученного графита. Это образование аморфной фазы, накопление в поверхностном слое облученного графита газообразного ксенона, а также распыление поверхности и переосаждение распыленного углерода.

Наблюдаемое увеличение и последующее снижение шероховатости поверхности графита при облучении можно связать с первоначальным накоплением атомов Хе в поверхностных слоях и возможностью разрыва связей между графитовыми плоскостями, установленной в [38] при изучении поведения конструкционного графита при облучении ионами азота (30 кэВ, $1 \cdot 10^{15}$ - $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$). Переосаждение распыленного углерода в наших экспериментах не может вносить заметный вклад в формирование структуры поверхности из-за отмеченных выше конструктивных особенностей экспериментальной установки.

Краевой угол смачивания

Измерения равновесного краевого угла смачивания дистиллированной водой поверхности графита показали, что облучение ионами Xe^+ вызывает изменение величины РКУС от $70,6^\circ$ для исходного

графита до $93,2^\circ$ - $123,9^\circ$ для облученного, то есть приводит к гидрофобизации поверхности графита.

Как можно судить по изменению формы капли воды на поверхности образца (рис.8), дозовая зависимость изменения РКУС качественно подобна соответствующей зависимости шероховатости поверхности (Таблица, рис.7б). Некоторые различия в области доз $3 \cdot 10^{14}$ - $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ можно объяснить увеличением полной площади облученной поверхности графита, а значит и числа и размера неоднородностей и углублений между ними, препятствующих растеканию капли (Таблица). Учитывая практически полную неизменность элементного состава поверхности облученного графита, это позволяет сделать вывод, что изменение смачиваемости водой поверхности облученного ионами Xe^+ графита обусловлено, в основном, изменением шероховатости поверхности.

Таблица

Характеристики топографии поверхности и значения РКУС образцов графита

	Доза облучения ионами Xe^+ , см^{-2}				
	—	$1 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{15}$	$3 \cdot 10^{15}$
Проективная площадь, мкм^2	401,2	401,2	401,2	401,2	401,2
Полная площадь, мкм^2	434,9	426,5	432,0	430,3	419,5
R_a , нм	226,2	309,7	294,7	257,2	233,5
РКУС, град.	70,6	116,2	123,9	119,9	93,2

Выводы

Методом РОР и моделированием экспериментальных спектров с помощью программы RUMP исследован элементный состав и послойное распределение элементов в графите, облученном ионами Xe^+ дозами от $1 \cdot 10^{14}$ до $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. В составе графита обнаружены примеси O, Si, Ca, W и H, Распределение примесей по глубине образцов в исходном графите достаточно равномерное, а в облученном графите

обнаружено некоторое увеличение концентрации Н и О и снижение концентрации С, Si и Са в приповерхностных слоях.

Пиковое содержание Хе с увеличением дозы облучения с $1 \cdot 10^{14}$ до $1 \cdot 10^{15}$ см⁻² возрастает на ~18%, а после облучения дозой $3 \cdot 10^{15}$ см⁻² увеличивается в 3,3 раза. Глубина проникновения ионов Хе⁺ при этом увеличивается на 17% и при дозе облучения $3 \cdot 10^{15}$ см⁻² достигает 650 нм, что намного превышает значения проективного пробега и страгглинга ионов Хе⁺ в графите, рассчитанные по программе TRIM. Такое расхождение объясняется протеканием процессов радиационно-стимулированной диффузии Хе в графите. Содержание Хе в более глубоких слоях графита с повышением дозы облучения уменьшается с 0,03 до 0,005 ат.%.

Установлено пороговое значение дозы облучения ионами Хе⁺, равное $1 \cdot 10^{14}$ см⁻², при превышении которого шероховатость поверхности снижается, что, возможно, связано с облегчением распыления графита вследствие накоплением атомов Хе в поверхностных слоях и разрывом связей между графитовыми плоскостями. После дозы облучения $3 \cdot 10^{15}$ см⁻² на поверхности графита образуются полусферические чешуйки диаметром от 0,2 до 0,8 мкм, формирование которых связывается с образованием кластеров Хе в поверхностных слоях.

Обнаружено, что облучение графита ионами Хе⁺ приводит к гидрофобизации его поверхности, о чем свидетельствует увеличение равновесного краевого угла смачивания дистиллированной водой. Дозовая зависимость РКУС подобна соответствующей зависимости величины шероховатости поверхности, что позволяет изменять смачиваемость графита водой путем варьирования дозы облучения ионами Хе⁺.

Литература

1. Kroto H.W., Heath J. R., O'Brien S.C., et al. C60: Buckminsterfullerene. *Nature*, 1985, v.318, p.162-163.
2. Радускевич Л.В., Лукьянович В.М. О структуре углерода, образующегося при термическом разложении окиси углерода на железном контакте. *ЖФХ*, 1952, т.26, с.88-95.
3. Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 1991, v.354, p.56-58.
4. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., et al. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 2004, v.306, p.666-669.
5. Fuller E.L., Okoh J.M. Kinetics and mechanisms of the reaction of air with nuclear grade graphites: IG-110. *J.Nucl.Mater.*, 1997, v.240, No.3, p.241-250.
6. Lim Y.S., Chi S.H., Cho K.Y. Change of properties after oxidation of IG-11 graphite by air and CO₂ gas. *J.Nucl.Mater.*, 2008, v.374, No.1-2, p.123-128.
7. Babout L., Mummery P.M., Marrow T.J., et al. The effect of thermal oxidation on polycrystalline graphite studied by X-ray tomography. *Carbon*, 2005, v.43, No.4, p.765-774.
8. Neighbour G.B., Hacker P.J. The variation of compressive strength of AGR moderator graphite with increasing thermal weight loss. *Mater.Lett.*, 2001, v.51, No.4, p.307-314.
9. Gomez-Navarro C., Pablo P.J.D., Gomez-Herrero J., et al. Tuning the conductance of single-walled carbon nanotubes by ion irradiation in the Anderson localization regime. *Nature Mater.*, 2005, v.4, p.534-539.
10. Kim D.-H., Jang H.-S., Kim C.-D., et al. Enhancement of the field emission of carbon nanotubes straightened by application of argon ion irradiation. *Chem.Phys.Lett.*, 2003, v.378, p.232-237.
11. Tuboltsev V., Raisanen J. Sculpturing nanowires with ion beams. *Small*, 2009, v.5, p.2687-2691.
12. Bell D.C., Lemme M.C., Stern L.A., et al. Precision cutting and patterning of graphene with helium ions. *Nanotechnology*, 2009, v.20, No.45, ID 455301.
13. Lemme M.C., Bell D.C., Williams J.R., et al. Etching of graphene devices with a helium ion beam. *ACS Nano*, 2009, v.3, p.2674-2676.
14. Tapaszto L., Dobrik G., Nemes-Incze P., et al. Tuning the electronic structure of graphene by ion irradiation. *Phys.Rev.B*, 2008, v.78, iss.23, ID 233407, 4 p.
15. Суворов А.Л., Гусева М.И., Коршунов С.Н. и др. Распыление углеродных материалов ионами водорода, дейтерия и гелия в припороговой области энергий. *ВАНТ, сер. Физ. радиац. поврежд. и радиац. материаловедение*, 2000, вып.4, с.6-9.
16. Kustner M., Eckstein W., Dose V., et al. The influence of surface roughness on the angular dependence of the sputter yield. *Nucl.Instrum.Meth.Phys.Res.B*, 1998, v.145, p.320-331.
17. Машкова Е.С., Молчанов В.А., Фаязов И.М. и др. Экспериментальное и компьютерное изучение угловой зависимости коэффициента распыления графита. *Поверхность. Физика, химия, механика*, 1994, №2, с.33-37.
18. Борисов А.М., Машкова Е.С., Немов А.С. и др. Влияние ионно-индуцированного рельефа на высокодозное распыление графита. *ВАНТ, сер. Термоядерный синтез*, 2004, вып.2, с.65-72.
19. Файзрахманов И.А., Базаров В.В., Жихарев В.А. и др. Влияние бомбардировки ионами углерода на наноструктуру алмазоподобных пленок. *ФТП*, 2001, т.35, вып.5, с.612-618.
20. Файзрахманов И.А., Базаров В.В., Степанов А.Л. и др. Модификация наноструктуры алмазоподобных пленок углерода бомбардировкой ионами ксенона. *ФТП*, 2003, т.37, вып.6, с.748-752.
21. Айрапетов А.А., Беграмбеков Л.Б., Вергазов С.В. и др. Захват и удержание кислорода и дейтерия в углеграфитовом композите при облучении в дейтериевой плазме с примесью кислорода. *ВАНТ, сер. Термоядерный синтез*, 2009, вып.3, с.25-29.
22. Денисов Е.А., Компаниец Т.Н. Взаимодействие графита с атомарным водородом. *ЖТФ*, 2001, т.71, вып.2, с.111-116.

23. Архипов Н.И., Сафронов В.М., Барсук В.А. и др. Эрозия углеграфитовых материалов при облучении интенсивными потоками плазмы. ВАНТ, сер. Термоядерный синтез, 2009, вып.4, с.3-13.
24. Li Z.C., Yu D.P., Liu B.X. Manipulation of ordered layered structures by interface-assisted ion-beam mixing in immiscible Ag-Co and Ag-Ni systems. Phys.Rev.B, 2002, v.65, No.24, ID 245403, 6 p.
25. Hu Y., Li Z.C., Zhang Z.J. Ion-implantation-induced patterns formation on silicon substrates. Physica E, 2009, v.41, No.5, p.833-837.
26. Суворов А.Л., Чеблук Ю.Н., Лазарев Н.Е. и др. Исследование поверхностных и объемных дефектов в углероде и кремнии методами автоионной и сканирующей туннельной микроскопии. ЖТФ, 2000, т.70, вып.3, с.56-61.
27. Козодаев М.А., Макеев О.Н., Хохряков В.Ф. и др. СТМ-анализы поверхностной структуры графита, подвергнутого импульсному облучению осколками деления. ВАНТ, сер. Физ. радиац. поврежд. и радиац. материаловедение, 2000, вып.4, с.31-33.
28. Борисов А.М., Железнов В.В., Куликаускас В.С. и др. Модификация поверхностного слоя графита при высокодозном распылении ионами азота энергии 15-30 кэВ. Вест. Нижегородского универ. им. Н.И. Лобачевского, сер. Физика твердого тела, 2001, №2, с.71-80.
29. Дидык А.Ю., Латышев С.В., Семина В.К. и др. Исследование воздействия ионов криптона с энергией 305 МэВ на высокоориентированный пиролизический графит. Письма в ЖТФ, 2000, вып.17, с.1-6.
30. Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Куликаускас В.С. и др. Исследование измененного поверхностного слоя высокоориентированного пирографита при высоких флюенсах ионного облучения. ВАНТ, сер. Термоядерный синтез, 2008, №4, с.37-48.
31. Амирханов И.В., Дидык А.Ю., Хофман А. и др. Распыление твердых тел под действием тяжелых ионов и температурные эффекты в электронной и решеточной подсистемах. Физика элементарных частиц и атомного ядра, 2006, №6, с.1592-1644.
32. Li Zhengcao, Chen Dongyue, Fu Xiaogang, et al. The influence of pores on irradiation property of selected nuclear graphites. Adv.Mater.Sci.Eng., 2012, v.2012, ID 640462, 6 p.
33. Liu J., Hou M.D., Trautmann C., et al. STM and Raman spectroscopic study of graphite irradiated by heavy ions. Nucl.Instrum.Meth.Phys.Res.B, 2003, v.212, p.303-307.
34. Doolittle L.R. A semiautomatic algorithm for Rutherford backscattering analysis. Nucl.Instrum.Meth.Phys.Res.B, 1986, v.15, p.227-238.
35. Ташлыков И.С., Барайшук С.М. Элементный состав, топография и смачиваемость поверхности графита, модифицированного ионно-ассистированным осаждением покрытий. Изв.ВУЗов, Порошковая металлургия и функциональные покрытия, 2008, №1, с.30-35.
36. Zigler J.F., Biersak J.P., Littmark U. The stopping range of ions in solids. NY: Pergamon Press, 1985, 321 p.
37. Villars P., Prince A., Okamoto H. Handbook of ternary alloy phase diagrams. OH: ASN International, 1996, 13808 p.
38. Лигачева Е.А., Иванов М.Г., Гаврилов Н.В. и др. Влияние облучения ионами азота на свойства пиролизического графита. Изв.ВУЗов, Порошковая металлургия и функциональные покрытия, 2008, №2, с.42-46.