
ТВЕРДЫЕ ТЕЛА В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

УДК 537.534:538.911

ИМИТАЦИЯ ВЫСОКОДОЗНОГО РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ ВЫСОКООРИЕНТИРОВАННОГО ПИРОЛИТИЧЕСКОГО ГРАФИТА ИМПЛАНТАЦИЕЙ ИОНОВ ГЕЛИЯ И УГЛЕРОДА

© 2025 г. Н. Н. Андрианова^{a, b}, А. М. Борисов^{a, b, c}, Е. А. Воробьева^a, М. А. Овчинников^{a, *}

^aНаучно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скobelцына, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

^bМосковский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 125993 Россия

^cМосковский государственный технологический университет “СТАНКИН”, Москва, 127055 Россия

*E-mail: ov.mikhail@gmail.com

Поступила в редакцию 15.02.2025 г.

После доработки 15.05.2025 г.

Принята к публикации 20.05.2025 г.

Экспериментально изучено воздействие высокодозного облучения на морфологию и структуру высокоориентированного пиролитического графита УПВ-1Т ионами углерода с энергией 30 кэВ и гелия с энергиями 10 и 30 кэВ в интервале температур от 50 до 600°C с флюенсом $(1.0 - 4.5) \cdot 10^{18}$ ион/см². Показано, что имплантация ионов гелия приводит как к эффектам динамического отжига радиационных нарушений кристаллической структуры графита, так и к эффектам внедрения гелия при имитации взаимодействия продуктов термоядерного синтеза с графитовыми материалами.

Ключевые слова: высокоориентированный пиролитический графит, облучение ионами C⁺ и He⁺, радиационные смещения, морфология поверхности, расслоенный графит, электронная микроскопия, спектроскопия комбинационного рассеяния света

DOI: 10.56304/S2079562925060016

ВВЕДЕНИЕ

Обращенные к плазме материалы в термоядерных установках (ТЯУ) подвергаются воздействию больших потоков атомов D, T и He, порядка 10^{19} ат. с⁻¹ · см⁻² с энергиями от десятков электронвольт до 2.5 МэВ. Полный поток нейтронов в ТЯУ может составлять 10^{18} н. с⁻¹ · см⁻² при энергиях, достигающих 14.1 МэВ. [1]. Воздействие потоков гелия на материалы стенок ТЯУ в настоящее время проходит обширную оценку. Считается, что значительные изменения поверхности металлов являются результатом захвата гелия вблизи поверхности в местах внутренних или внешних дефектов [2]. Захваченные атомы гелия образуют кластеры, что приводит к постепенному увеличению искажений решетки, которые релаксируют путем схлопывания дислокационных петель, создавая заполненные гелием пузырьки увеличивающегося размера. Эти пузырьки могут лопнуть, вызывая поверхностную пористость, и при дальнейшем облучении эрозия приводит к формированиюnanoструктурной поверхности. Влияние повреждения объемного материала из-за нейтронов с энергией 14.1 МэВ, также образующихся в реакциях D-T термоядерного синтеза, на эти взаимодей-

ствия гелия с образцами материалов ТЯУ вблизи поверхности еще предстоит оценить [3].

Основные эффекты при нейтронном облучении – это появление радиоактивности и изменения в составе и структуре материала, которые происходят в результате ядерных реакций и радиационного повреждения решетки кристалла. Главным фактором, вызывающим радиационные повреждения в материалах при взаимодействии с нейтронами, является передача кинетической энергии атомам. Энергии первично выбитых атомов имеют широкий диапазон до 100 кэВ [2].

Исследования по имитации нейтронного облучения в реакторах методом облучения ионами, позволяющими эффективно генерировать высокие уровни радиационных повреждений, проводятся путем облучения ионами различных типов [4, 5]. Наиболее часто используют так называемое самооблучение (self-irradiation) ионами атомов облучаемого материала. Для сопоставления данных ионного и нейтронного облучения используют универсальную дозовую характеристику радиационных повреждений в числе смещений на атом, СНА, которое для современных реакторов может достигать сотен единиц.

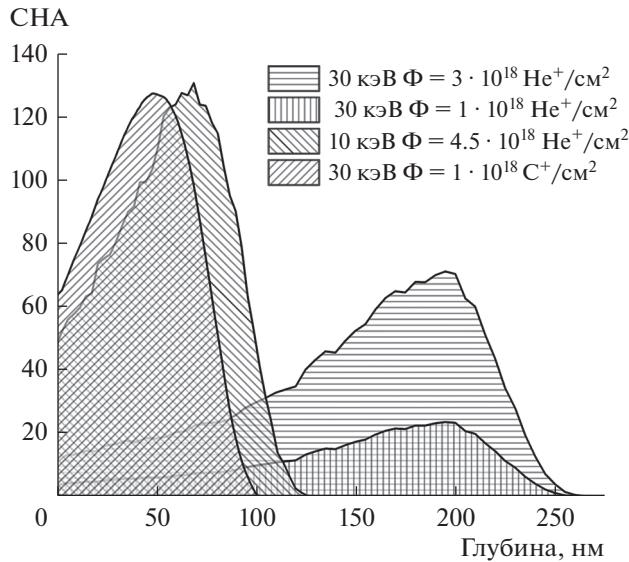


Рис. 1. Профили числа смещений на атом (СНА) для выбранных условий ионного облучения графита.

В настоящей работе для оценки влияния радиационных повреждений на углеродные материалы, вызываемых быстрыми ядрами гелия и нейтронами, проводили сравнение результатов модификации поверхности ВОПГ пучками ионов He^+ и C^+ при сопоставимых уровнях радиационных смещений в числе СНА.

ЭКСПЕРИМЕНТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В эксперименте образцы ВОПГ марки УПВ-1Т облучали ионами C^+ и He^+ на масс-монохроматоре НИИЯФ МГУ [6] с энергией 30 кэВ с одним и тем же флюенсом $\Phi = 1 \cdot 10^{18}$ ион/ см^2 . Плотность тока ионов C^+ и He^+ составляла 0.2 и 0.3 мА/ см^2 , соответственно. Дополнительно были проведены облучения ионами He^+ с энергиями 10 и 30 кэВ и флюенсами, приводящими к сопоставимым с облучением ионами C^+ профилям и величинам радиационных смещений порядка 10^2 СНА на глубине пробега частиц (70 и 130 СНА), рис. 1. Профили СНА для подобранных случаев облучения были рассчитаны по методике [7] с использованием моделирования облучения с помощью программы SRIM [8]. Из результатов моделирования видно, что максимумы радиационных нарушений для ионов C^+ и He^+ с энергией 30 кэВ составляют ~ 100 и 250 нм, соответственно.

Температуру образцов T при облучении варьировали от 50 до 600°C, учитывая сильные зависимости от T структурных и размерных изменений графитов как при нейтронном, так и ионном облучении [9, 10]. Контроль температуры осуществлялся при помощи хромель-алюмелевой термо-

пары, расположенной на обращенной к пучку ионов поверхности образца и прикрепленной держателем мишени так, чтобы термопара не попадала в область падения пучка. Анализ морфологии и структуры образцов проводили при помощи растровой электронной микроскопии (РЭМ) и спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) на длине волны 473 нм.

РЕЗУЛЬТАТЫ

РЭМ-изображения поверхности образцов ВОПГ после облучения ионами He^+ и C^+ с энергией 30 кэВ и флюенсом $1 \cdot 10^{18}$ ион/ см^2 при температурах $T = 50, 400$ и 600°C приведены на рис. 2. Видно, что в большинстве случаев ионное облучение приводит к зависящей от сорта ионов и температуры мишени фрагментации поверхности ВОПГ. Так, облучение при $T = 50^\circ\text{C}$ приводит к образованию сетки субмиллиметровых тонких отслоений поверхности ВОПГ для ионов C^+ и He^+ . Для ионов He^+ размеры чешуйчатых отслоений больше как по площади, так и по толщине, см. рис. 2а, 2б.

Сравнение результатов облучения ВОПГ при повышенных температурах показывает кардинальные различия в изменениях исходно зеркальной поверхности ВОПГ для ионов He^+ и C^+ (рис. 2в–2е). При облучении ионами C^+ при $T = 400^\circ\text{C}$ (рис. 2г) поверхность покрывается узором из неглубоких кратеров диаметром 3–5 мкм с субмикронными вискероподобными стенками. Эта морфология характерна для интервала температур облучения от 150 до 500°C. Облучение ионами He^+ при этих же температурах приводит к макроскопической фрагментации поверхности в виде

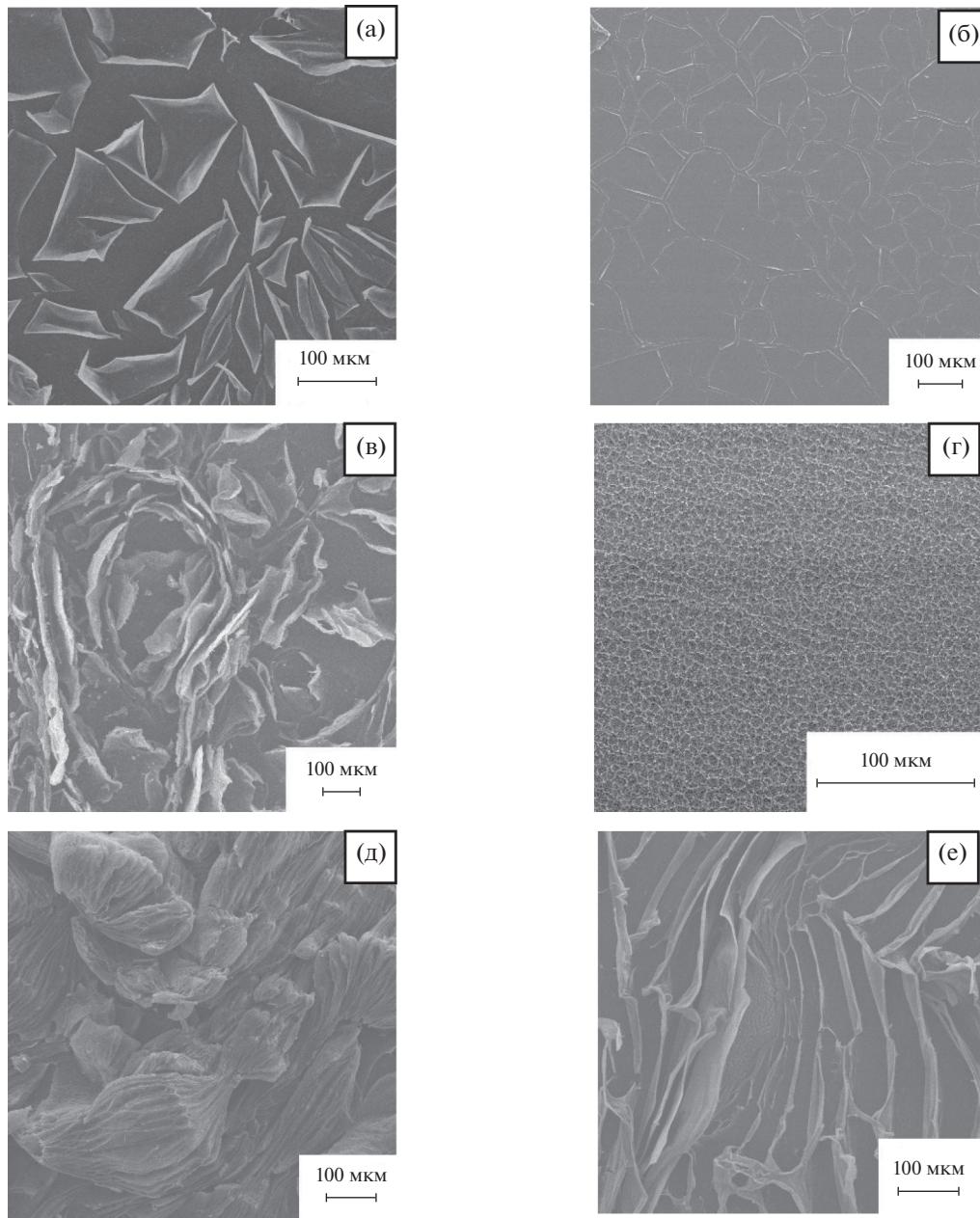


Рис. 2. РЭМ-изображения поверхности образцов ВОПГ после облучения ионами He^+ (а, в, д) и C^+ (б, г, е) с энергией 30 кэВ и $\Phi = 1 \cdot 10^{18}$ ион/ см^2 при температурах 50°C (а, б), 400°C (в, г) и 600°C (д, е).

чешуек, которые отслаиваются от поверхности и изгибаются вплоть до скручивания. Толщина чешуек при облучении ионами He^+ с энергией 30 кэВ при температуре $T = 400^\circ\text{C}$ составляет ~ 500 нм, рис. 2в.

Облучение ионами C^+ при 600°C (рис. 2е) приводит, в отличии от облучения в интервале температур 150–500°C, к многочисленным отслоениям в виде чешуек. Отслоения представляют собой тонкие пленки толщиной ~ 100 нм, что сопоставимо с пробегом ионов углерода в графите. Облуче-

ние ионами He^+ при $T = 600^\circ\text{C}$ приводит наряду с чешуйчатой фрагментацией поверхности при меньших температурах к тысячекратному расслоению чешуек (рис. 2д) в виде типичных форм частиц вспененного терморасширенного графита (ТРГ) [11].

Профили СНА при флюенсе $1 \cdot 10^{18}$ ион/ см^2 для ионов C^+ и He^+ с энергией 30 кэВ различаются по глубине и максимальному значению СНА, рис. 1. С целью сопоставления облучений ионами C^+ и He^+ дополнительно были проведены облуче-

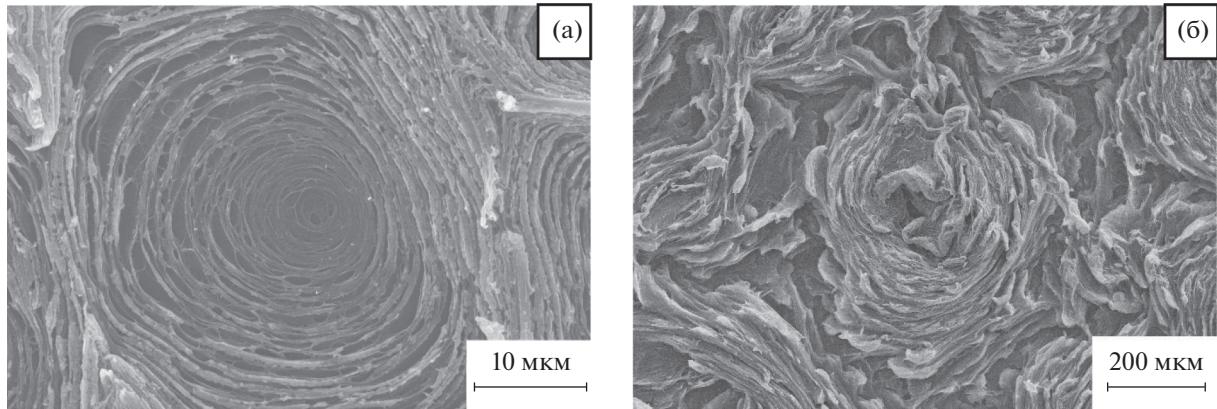


Рис. 3. РЭМ изображения поверхности образцов ВОПГ после облучения ионами He^+ с энергией 10 кэВ с $\Phi = 4.5 \cdot 10^{18}$ ион/ см^2 при $T = 250^\circ\text{C}$ (а) и 30 кэВ с $\Phi = 3 \cdot 10^{18}$ ион/ см^2 при $T = 600^\circ\text{C}$ (б).

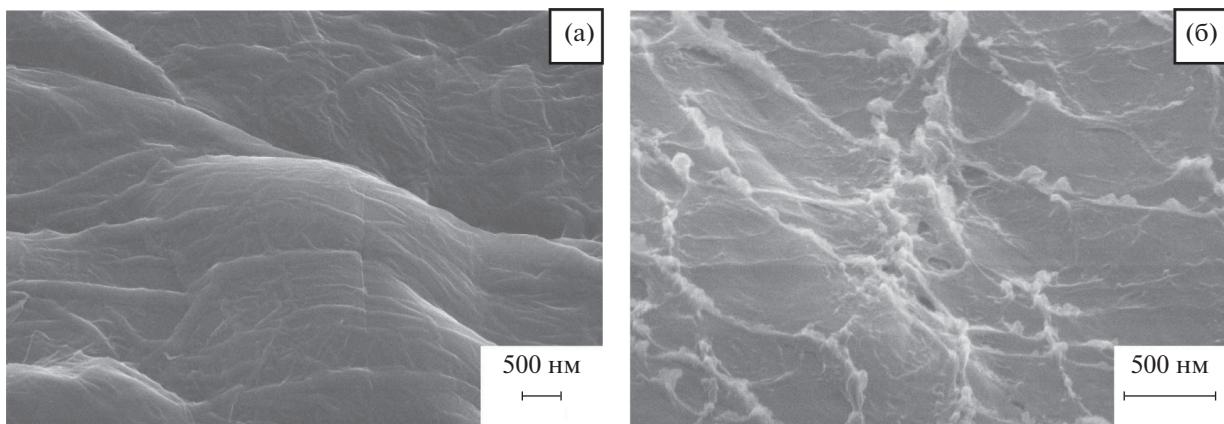


Рис. 4. РЭМ изображения отслоившихся чешуек на поверхности образцов ВОПГ после облучения ионами He^+ (а) и C^+ (б) с энергией 30 кэВ при $T = 600^\circ\text{C}$. $\Phi = 1 \cdot 10^{18}$ ион/ см^2 .

ния ионами He^+ при двух условиях, когда максимальные значения СНА для C^+ и He^+ близки друг к другу при одной энергии ионов (30 кэВ He^+ с флюенсом $3 \cdot 10^{18}$ ион/ см^2), и когда профили СНА близки как по максимальному значению, так и по форме (10 кэВ He^+ с флюенсом $4.5 \cdot 10^{18}$ ион/ см^2). Сравнение и анализ полученных данных показал, что качественные различия ионно-индуцированной морфологии после облучения ионами C^+ и He^+ остаются такими же, что описаны выше после облучения этими ионами при одной и той же энергии и одним и тем же флюенсом. Облучение ВОПГ ионами He^+ с энергией 10 кэВ до $4.5 \cdot 10^{18}$ ион/ см^2 при температуре 250°C дополнительно фрагментирует поверхность с образованием овальных кратеров с расслоенными концентрическими стенками на не отслоившихся участках поверхности и расслоенных стенках чешуек, рис. 3а. Такая же структура наблюдалась и при облучении ионами He^+ с энергией 30 кэВ и флюенсом $3 \cdot 10^{18}$ ион/ см^2

при трехкратном различии пробегов He^+ и C^+ , см. также [12]. Поперечный размер слоистых кратеров составляет десятки мкм с десятками слоев в стенках, рис. 3а. Кроме того, увеличение флюенса ионов He^+ при 600°C увеличивает размеры областей вспененного графита, ср. рис. 3б и рис. 2д.

На субмикронном уровне сходство облучения ВОПГ ионами C^+ и He^+ состоит в образовании микроскладок на поверхности, рис. 4, образующих сетчатую прожилковую структуру и связываемую с ионно-индуцированными механическими напряжениями [12, 13]. При облучении гелием картина дополняется блистерами, рис. 4а. Сетки микроскладок поверхности при этом наблюдаются как около блистеров, так и на куполах блистеров. Как блистеры, так и сетки микроскладок наблюдаются, в основном, на отслоенных участках субмиллиметровых чешуек.

Значительное влияние температуры облучаемых образцов на их кристаллическую структуру показывает спектроскопия комбинационного рас-

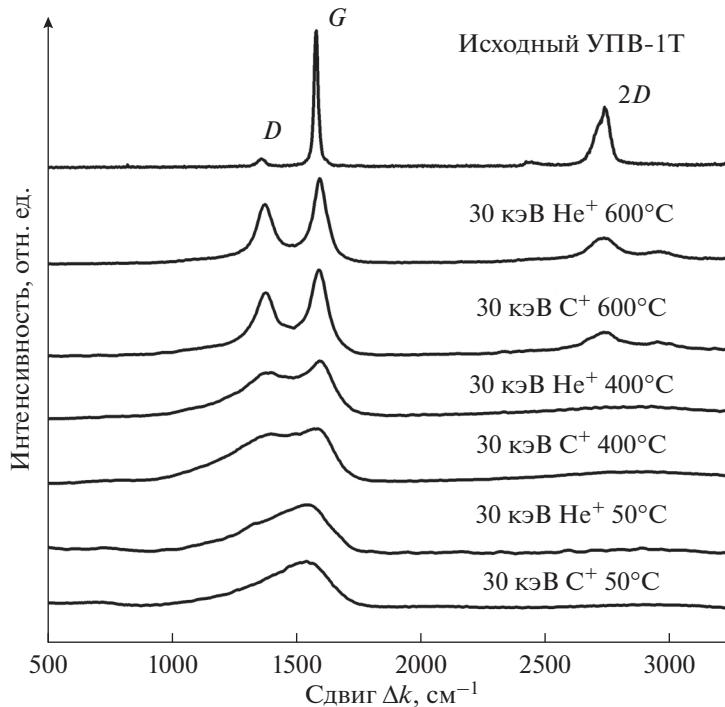


Рис. 5. Спектры КРС ВОПГ до и после облучения ионами C^+ и He^+ с энергией 30 кэВ $\Phi = 1 \cdot 10^{18}$ ион/ cm^2 .

сияния света (КРС). На рис. 5 приведены спектры КРС до и после облучения ВОПГ ионами C^+ и He^+ с энергией 30 кэВ и $\Phi = 1 \cdot 10^{18}$ ион/ cm^2 в интервале температур от 50 до 600°C. Спектры КРС содержат два основных пика первого порядка: пик G (графитовый пик) при сдвиге частоты $\Delta k \sim 1580$ cm^{-1} и пик D , обусловленный несовершенством кристаллической структуры, при $\Delta k \sim 1350$ cm^{-1} , а также соответствующие им пики второго порядка: $2D$ пик (обертон D пика) и др. [14, 15]. Аморфизация поверхностного слоя при температурах близких к комнатной приводит в спектрах КРС к широкому куполу вместо разделенных G и D пиков. С увеличением температуры облучения происходит динамический отжиг радиационных нарушений с разделенными, но уширенными G и D пиками. Такая трансформация спектров КРС при ионном облучении является характерной для графитов и связывается со значительной концентрацией радиационных дефектов в облученном слое [16–18], при этом сам слой остается графитоподобным. В целом, КРС показывает схожий уровень структурной дефектности поверхности ВОПГ при облучении ионами углерода и гелия для каждого температурного интервала. Наиболее упорядоченная структура графита формируется при температуре облучения 600°C.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Накопленные данные для различного вида углеродных материалов показывают сильное влияние температуры мишени, облучаемой ионами углерода, на структуру и морфологию поверхностного слоя. Так, облучение алмаза при комнатной температуре ионами C^+ с энергиями порядка десятков кэВ приводит к образованию аморфного поверхностного слоя. При повышенных температурах (200–500°C) происходит графитизация алмаза с образованием на поверхности слоя, имеющего металлическую проводимость [19]. Однако при температурах в интервале 600–700°C имплантация ионов углерода не разрушает кристаллическую решетку и приводит к внутреннему росту алмаза [19, 20]. Аналогичное поведение с температурой облучения проявляет противоположность алмаза по кристаллической упорядоченности – стеклообразный углерод или просто стеклоуглерод. Этот рентгенаморфный материал можно назвать аморфным лишь условно, поскольку он имеет фуллереноподобную наноструктуру, доставшуюся ему от сложной надмолекулярной структуры полимерных препаров. Также, как и в случае алмаза, облучение ионами C^+ стеклоуглерода при комнатной температуре приводит к разупорядочению его структуры, облучение при повышенных температурах 200–500°C – к графитации и, наконец, при достаточно высоких температурах облучения, более 500°C, структура стеклоуглерода сохраняется [21, 22]. Ионно-

индуцированные аморфизация и графитация являются пороговыми по флюенсу облучения. Здесь мы рассматриваем только большие флюенсы, выше пороговых, когда структура поверхностного слоя практически не меняется с флюенсом ионного облучения, т.е. становится стационарной и зависит только от температуры облучаемой мишени.

Что касается графита, то на практике имеют дело с искусственными графитами большого числа марок и технологий. Наиболее близким к аллотропной форме кристаллического углерода как по плотности, так и кристаллической структуре является высокоориентированный пиролитический графит (ВОПГ). Его часто используют как модельный материал при изучении радиационных процессов в графитовых материалах, см., например, [13, 17]. Структура ВОПГ также сильно меняется в зависимости от сорта ионов, флюенса и температуры облучаемой мишени [10, 23].

Как уже отмечалось, для имитации нейтронного воздействия используют облучение различными ионами. При этом только облучение углеродом не вносит примеси в ядерные графиты и кажется наиболее подходящим. Поскольку торможение ионов углерода происходит аналогично торможению смещенных атомов углерода как при нейтронном, так и ионном облучении, измененный поверхностный слой при имплантации ионов углерода будет отражать изменения в структуре, вызываемые нейтронами в объеме материала. К настоящему времени накоплено значительное количество данных по аморфизации ВОПГ нейтронным и ионным облучением при температурах близких к комнатной [18, 24, 25]. Данных по самооблучению ионами C^+ гораздо меньше. Остается неясным, в частности, вопрос о том, происходит ли внутренний рост ВОПГ, как в алмазе и стеклоуглероде, и, если происходит, то при какой температуре ВОПГ.

Полученные данные для облучения ионами C^+ показывают, что отмеченные выше качественные различия ионно-индуцированной морфологии на поверхности ВОПГ соответствуют трем интервалам различной ионно-лучевой модификации стеклоуглерода и алмаза и по данным РЭМ и КРС могут быть описаны следующим образом.

Облучение ВОПГ ионами углерода с энергией 30 кэВ при температуре $T = 50^\circ\text{C}$ приводит к аморфизации поверхностного слоя. Ионно-индуцированный максимум объемного разбухания лежит под поверхностью на глубине максимума радиационных смещений, см. рис. 1. Возникающий при этом градиент деформации вызывает растягивающие напряжения и разрывы поверхностного слоя в виде чешуйчатых отслоений с гладкой поверхностью. В интервале температур облучения от 150 до 500°C аморфизация не происходит, но температура недостаточна для полного

динамического отжига радиационных нарушений в графите. Слоистая глобулярная ионно-индуцированная морфология и спектры КРС соответствуют турбостратному графиту. И, наконец, при динамическом отжиге трехмерного графита $T \geq 600^\circ\text{C}$ происходит сохранение структуры ВОПГ с внутренним эпитаксиальным ростом графита. Радиационный объемный рост приводит к многочисленным продольным трещинам на зеркальной поверхности ВОПГ с отслаиванием чешуек с гладкой поверхностью.

Сравнение модификации ВОПГ при облучении ионами C^+ и He^+ при сопоставимом уровне радиационных смещений показывает, что радиационные нарушения и их динамический отжиг играют определяющую роль в модификации ВОПГ облучением ионов He^+ . При аморфизации графита, которая происходит по данным, полученным в результате облучения ионами углерода при температуре облучения $T = 50^\circ\text{C}$, высокодозная имплантация ионов гелия приводит также к чешуйчатому расслоению. При всех структурных состояниях облучаемого графитового слоя на чешуйках наряду со связанными с имплантацией гелия блистерами наблюдаются также дефекты пластической деформации в виде складок поверхности микронных размеров [12, 18].

В интервале температур облучения от 150 до 500°C , где радиационные нарушения по данным облучения ионами C^+ отжигаются частично и образуется турбостратный графит со слоистой структурой, имплантация гелия также приводит к чешуйчатому расслоению поверхности. На поверхности образуются макроскопические колодцы-кратеры из концентрических перфорированных графитовых слоев. Число колец в колодцах тем больше, чем больше флюенс облучения. Подобная структура на поверхности ниobia после облучения ионами He^+ связывалась с формированием каналов выхода имплантированного гелия после удаления крышек блистеров [3].

При динамическом отжиге радиационных нарушений при $T = 600^\circ\text{C}$ и сохранении трехмерного упорядочения графита имплантация ионов He^+ приводит к чешуйчатой фрагментации поверхности ВОПГ и тысячекратному расслоению чешуек в виде типичных форм частиц терморасширенного графита, см. рис. 2д и рис. 3б. Из-за многократного уменьшения в процессе облучения плотности расслоенного вспененного графита геометрический пробег ионов He^+ с флюенсом многократно возрастает. В результате толщина вспененного поверхностного слоя может составлять десятки мкм, что на три порядка величины больше проективного пробега около 200 нм. Начинаяющееся от поверхности расслоение приводит к образованию лепестковой структуры вспененного графита, аналогично лепестковой структу-

ре ТРГ при терморасширении интеркалированного графита [11]. Интеркалянтами при получении ТРГ служат различные молекулярные соединения (H_2SO_4 , Br_2 , SbCl_5 и др.), которые при быстром нагреве разлагаются и вспенивают графит. Характерными при этом являются газонаполненные пузырьки с остаточным интеркалянтом в морфологии вспененного графита. Наблюдаемые при облучением ионами He^+ блистеры на чешуйках (рис. 4а) являются визуальным аналогом пузырьков в ТРГ, хотя механизм образования блистеров при имплантации гелия представляется существенно другим. Имеются весомые доказательства об отсутствии гелия в блистерах, а их образование связано с ионно-индуцированными сжимающими напряжениями [26, 27].

Надо отметить, что отмеченные радиационные эффекты являются максимальными для ВОПГ и могут в той или иной степени проявляться в разрабатываемых конструкционных реакторных графитах. В частности, в [28] показано, что облучение ионами He^+ различных по микроструктуре углеродных материалов при одних и тех же условиях приводит для ВОПГ к аналогичному описанному выше чешуйчатому расслоению поверхности, для углеродного волокна из ПАН с упорядоченной структурой оболочки к расслаиванию на ленты вдоль оси волокна, для углеродного волокна из вискозы с преобладающей аморфной структурой к появлению на гладкой поверхности волокна блистеров и, наконец, для стеклоуглерода к отсутствию видимых морфологических изменений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение модификации ВОПГ при облучении ионами углерода и гелия при сопоставимом уровне радиационных смещений показывает, что радиационные нарушения и их динамический отжиг играют определяющую роль в модификации ВОПГ облучением ионами гелия и приводят как к эффектам радиационных нарушений решетки графита, так и к эффектам внедрения гелия при имитации взаимодействия продуктов термоядерного синтеза с графитовыми материалами. Динамический отжиг при температуре ВОПГ 600°C приводит наряду с чешуйчатой фрагментацией поверхности при меньших температурах к тысячекратному расслоению чешуек в виде типичных форм частиц вспененного расслоенного графита. Такие значительные эффекты модификации графита надо учитывать, если для имитации облучения нейтронами в реакторах используется облучение ионами гелия.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FSFS-2025-0006) и государственного задания МГУ. При выполнении работы использовано оборудование “Ускорительного комплекса МГУ”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Берии Р. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2010. № 7. С. 5–18.
2. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Вып. 2. Распыление сплавов и соединений, распыление под действием электронов и нейтронов, рельеф поверхности. Под ред. Бериша Р. 1986. Москва: Мир.
3. Parish C.M., Hijazi H., Meyer H.M., Meyer F.W. // Acta Mater. 2014. V. 62. P. 173–181.
4. Вас Гэри С. Основы радиационного материаловедения. Металлы и сплавы. 2014. Москва: Техносфера.
5. Федин П.А., Прянишников К.Е., Зиятдинова А.В. и др. // Ядерн. физ. инжинир. 2023. Т. 14 (5). С. 498–503.
6. <http://beam.sinp.msu.ru/>.
7. Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Воробьева Е.А. и др. // Ядерн. физ. инжинир. 2024. Т. 15 (3). С. 224–231.
8. Ziegler J.F., Biersack J.P. SRIM. 2013. <http://www.srim.org>
9. Virgil'ev Yu.S., Kalyagina I.P. // Inorg. Mater. 2004. V. 40. P. S33–S49.
10. Andrianova N.N., Borisov A.M., Mashkova E.S., et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B. 2013. V. 315. P. 117–120.
11. Фиалков А.С. Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе. 1997. Москва: Аспект Пресс.
12. Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Воробьева Е.А. и др. // Ядерн. физ. инжинир. 2025. Т. 16 (1). С. 19–29.
13. Liu D., Cherns D., Johns S., et al // Carbon. 2021. V. 173. P. 215–231.
14. Zhao Y., Lv S., Gao J., et al. // J. Nucl. Mater. 2023. V. 577. P. 154308.
15. Ferrari A.C., Robertson J. // Phys. Rev. B. 2000. V. 61. P. 14095.
16. Pimenta M.A., Dresselhaus G., Dresselhaus M.S., et al. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2007. V. 9 (11). P. 1276.
17. Niwase K. // Int. J. Spectr. 2012. V. 2012. P. 197609.
18. Galy N., Toulhoat N., Moncoffre N., et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B. 2017. V. 409. P. 235–240.
19. Nelson R.S., Hudson J.A., Mazey D.J., Piller R.C. // Proc. R. Soc. Lond. A. 1983. V. 386. P. 211–222.
20. Borisov A.M., Kazakov V.A., Mashkova E.S., Ovchinnikov M.A. // Vacuum. 2018. V. 148. P. 195–200.
21. McCulloch D.G., Prawer S. // J. Appl. Phys. 1995. V. 78. P. 3040–3047.
22. Andrianova N.N., Borisov A.M., Kazakov V.A., et al. // Vacuum. 2020. V. 179. P. 109469.

23. Andrianova N.N., Borisov A.M., Mashkova E.S., et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 2144. P. 012022.
24. Виргильев Ю.С., Гундорова Н.И., Куроленкин Е.И. и др. // Изв. АН СССР. Сер. Неорганические материалы. 1980. Т. 16 (4). С. 669–673.
25. Виргильев Ю.С., Гундорова Н.И., Куроленкин Е.И. и др. // Физика и химия обработки материалов. 1982. № 2. С. 3–8.
26. Bacon D.J., Rao A.S. // J. Nucl. Mater. 1980. V. 91. P. 178–188.
27. Hinks J.A., Haigh S.J., Greaves G. et al. // Carbon. 2014. V. 68. P. 273–284.
28. Andrianova N.N., Borisov A.M., Vorob'eva E.A., et al. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2024. V. 88 (4). P. 491–497.

Emulation of High-Fluence Reactor Irradiation of Highly Oriented Pyrolytic Graphite by Implantation of Helium and Carbon Ions

N. N. Andrianova^{1, 2}, A. M. Borisov^{1, 2, 3}, E. A. Vorobyeva¹, and M. A. Ovchinnikov^{1, *}

¹*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

²*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993 Russia*

³*Moscow State University of Technology “STANKIN”, Moscow, 127055 Russia*

**e-mail: ov.mikhail@gmail.com*

Received February 15, 2025; revised May 15, 2025; accepted May 20, 2025

Abstract—The effect of high-fluence irradiation on the morphology and structure of highly oriented pyrolytic graphite UPV-1T by carbon ions with energies of 30 keV and helium ions with energies of 10 and 30 keV in the temperature range from room temperature to 600°C with fluence $(1.0 – 4.5) \times 10^{18}$ ions/cm⁻² has been studied experimentally. It is shown that implantation of helium ions leads both to the effects of dynamic annealing of radiation damage of the graphite crystal structure and to the effects of helium implantation in simulating the interaction of fusion products with graphite materials.

Keywords: highly oriented pyrolytic graphite, irradiation with C⁺ and He⁺ ions, radiation damage, surface morphology, exfoliated graphite, electron microscopy, Raman spectroscopy