

## Образование дефектов в углеродной луковиче при облучении ионами Ag

И. В. Пономарева<sup>1)</sup>, Л. А. Чернозатонский<sup>1)</sup>

Институт биохимической физики им. Н. М. Эмануэля РАН, 119991 Москва, Россия

Поступила в редакцию 1 марта 2004 г.

После переработки 5 марта 2004 г.

Методом молекулярной динамики исследуется взаимодействие иона Ag с углеродной луковичей  $C_{60}@C_{240}@C_{540}$  и пучка ионов Ag с углеродной луковичей  $C_{60}@C_{240}@C_{540}@C_{960}$ . Исследуется энергетический порог образования вакансии в пентагоне фуллереновой оболочки луковичи в двух температурных режимах (300 и 1000 К). Обнаружены и описываются основные типы дефектов, образующиеся в луковичной структуре при различных энергиях бомбардирующих ионов. Показано, что наименее устойчивыми областями в углеродной луковиче под воздействием облучения являются пятиугольные циклы и их ближайшее окружение. Полученные результаты служат прямым подтверждением возможности образования алмазной структуры при облучении углеродных лукович ионами.

PACS: 61.48.+c

Открытие углеродных фуллеренов и нанотруб привело к возникновению нового направления в физике атомных кластеров, первоначально объединенного под названием “фуллерены и нанотрубы”. Однако направление бурно прогрессировало, и вскоре стало ясно, что такое определение уже не отражает всего многообразия накопленных знаний об этих удивительных объектах. Так возникли более узкие ответвления: синтез, механические свойства, транспортные свойства, электронные свойства, многотерминальные соединения из нанотруб, а вскоре были синтезированы и неуглеродные нанотрубы. Совсем недавно появление экспериментальных работ по облучению углеродных лукович [1, 2] и нанотруб [3] спровоцировало появление нового перспективного направления, связанного с использованием электронных и ионных пучков для изменения состояния, морфологии и свойств таких нанообъектов. Параллельно с накопленным экспериментально опытом, велись теоретические исследования влияния облучения на структуру углеродных лукович и нанотруб [4–10].

В 1996 г. в работе [2] было показано, что облучение углеродных лукович приводит к образованию алмазной структуры в их сердцевинах. Было предложено несколько моделей [2, 8–10] объясняющих такой процесс. В работе [8] была разработана термодинамическая модель трансформации графита в алмаз в неравновесных условиях (облучение и воздействие температуры), которая затем была сопоставлена с экспериментом по трансформации углеродных луко-

виц в алмаз. Согласно этой модели, в зависимости от параметров эксперимента (доза облучения, энергия пучка, температура) возможна ситуация, когда графит становится метастабильной фазой, а алмаз, напротив, – стабильной фазой.

В работе [9] методом функционала плотности было показано, что для образования в сердцевине углеродной луковичи  $C_{60}@C_{240}$  структуры, содержащей в среднем 70  $sp^3$ -атомов, требуется создание неравновесных условий: значительного притока атомов из внешних оболочек в эту сердцевинную часть луковичи (130 дополнительных атомов), локального повышения температуры до 2100 К. Однако эта величина в 2.5 раза превышает экспериментальное значение температуры [2]. Возможные этапы трансформации сердцевины углеродной луковичи в алмазоподобную структуру рассматривались в работе [10]. Однако непосредственно процесс бомбардировки углеродной луковичи в работе не изучался.

В работе [3] было показано, что облучение двух однослойных нанотруб в области их контакта приводит к их “свариванию” с образованием многотерминального соединения. Молекулярно-динамическое моделирование взаимодействия пучка ионов, приводящего к “свариванию” двух однослойных нанотруб, было предложено в работе [5]. Однако, несмотря на все многообразие экспериментов по облучению углеродных нанообъектов и объясняющих их моделей, основой для них служит исследование влияния облучения на графитоподобную сетку углеродных атомов. Можно выделить следующие объекты для изучения дефектообразования под воздействием облучения в

<sup>1)</sup>e-mail: iponomar@sky.chph.ras.ru; cherno@sky.chph.ras.ru

графитоподобной сети углеродных атомов: а) графит; б) нанотруба; в) фуллерены и “луковицы”. Различие между ними обусловлено прежде всего различной кривизной облучаемой поверхности. Более того, взаимодействие электронного или ионного пучка с фуллереном, очевидно, будет отличаться от его взаимодействия с графитовой плоскостью или идеальной нанотрубой также и из-за наличия в структуре фуллерена топологических дефектов – пятиугольников, ответственных за положительную кривизну поверхности фуллереновой молекулы. Отметим, что влияние облучения на графит исследовалось в работах [8, 11], а взаимодействие ионного пучка с углеродной нанотрубой было подробно рассмотрено в работах [4–6].

Целью настоящей работы является изучение взаимодействия ионного пучка с углеродной луковичей – макромолекулой, состоящей из вложенных друг в друга фуллеренов различного диаметра, расстояние между которыми близко к межслоевому расстоянию в графите [12].

*Бомбардировка углеродной луковичи  $C_{60}@C_{240}@C_{540}$  ионом Ag.* Для изучения воздействия ионного пучка на углеродную луковичу мы использовали метод молекулярной динамики с шагом интегрирования уравнений движения 0.5 фс. Для моделирования межатомного взаимодействия “углерод-углерод” был использован многочастичный эмпирический потенциал, гладко переходящий в дальнедействующий потенциал Леннарда–Джонса на межатомных расстояниях, превышающих радиус обрезания эмпирического потенциала [13–15]. Такой эмпирический потенциал ранее применялся для моделирования взаимодействия “углерод-углерод” при бомбардировке однослойных нанотруб ионами аргона [4–6], электронами [16], пучков однослойных и многослойных нанотруб ионами  $CH_3^+$  [7], а также для моделирования процесса напыления ионов на полимерные поверхности [17, 18]. Для моделирования взаимодействия ионов аргона между собой и с атомами углерода использовался потенциал Леннарда–Джонса [19]. Использование простого отталкивательного потенциала для моделирования облучения углеродных нанотруб ионами Ag показало, что он адекватно описывает такие процессы, как образование одиночных и кластерных вакансий в структуре, вращение связи по типу Стоун-Валеса и некоторые другие типы дефектов [4–6].

Недавно было показано [4], что при бомбардировке однослойных углеродных нанотруб ионами Ag доминирующим типом образующихся в структуре нанотрубы дефектов является одиночная вакансия,

причем порог образования такой вакансии составляет 50 эВ. Максимальное количество образующихся дефектов приходится на энергию 600 эВ, затем оно уменьшается, а, начиная с энергии 1000 эВ, дальнейшее увеличение энергии ионов не приводит к изменению количества образующихся в трубе дефектов. Так как эти данные содержат полную информацию о взаимодействии ионов с бездефектной гексагональной сеткой углеродных атомов, то в данной работе основное внимание уделено взаимодействию ионов с атомами пентагонов в структуре луковичи.

В первой вычислительной серии углеродная луковича  $C_{60}@C_{240}@C_{540}$ , состоящая из трех фуллереновых оболочек, бомбардировалась ионом Ag. В качестве мишени для иона был выбран один из атомов пятиугольника во внешней оболочке луковичи. В качестве параметров модельного эксперимента мы использовали: температуру луковичи ( $T$ ), энергию бомбардирующего иона ( $E_{in}$ ). Для температурного контроля был использован термостат Берендсена [20]. В этом методе изотермический процесс реализуется посредством помещения системы в тепловой резервуар, температура которого постоянна. Длительность процесса бомбардировки одним ионом составляла  $\Delta t = 2.5$  пс. При таком выборе величины  $\Delta t$  время столкновения иона, обладающего минимальным из использованных в модельном эксперименте значений  $E_{in}$ , составляет  $(1/10)\Delta t$ , что позволяет проследить эволюцию дефектов после столкновения с ионом.

Основными задачами первой вычислительной серии были:

- определение энергетического порога образования вакансии в месте расположения атома-мишени в низкотемпературном режиме ( $T = 300$  К) и высокотемпературном режиме ( $T = 1000$  К);
- определение основных типов дефектов в структуре луковичи, инициированных образованием вакансии.

*Низкотемпературный режим: температура луковичи 300 К.* В первом модельном эксперименте (МЭ) энергия налетающего иона  $E_{in}$  составляла 40 эВ, а в каждом следующем МЭ мы увеличивали энергию бомбардирующего иона на 10 эВ. Было обнаружено, что, начиная с энергии 100 эВ, в структуре фуллереновых оболочек лукович образуются дефекты. При таком значении энергии  $E_{in}$  атом-мишень выбивается и в структуре внешней оболочки образуется вакансия, окруженная тремя радикалами (рис.1а).

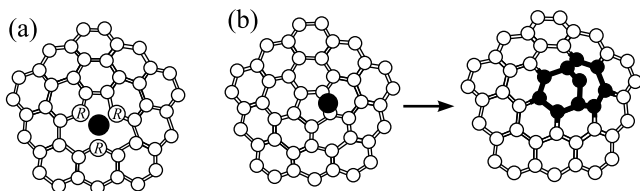


Рис.1. Образование вакансии в оболочке луковицы с последующей адсорбцией освободившегося атома смежной оболочкой. (а) Одиночная вакансия в оболочке луковицы. Выбитый из оболочки атом показан крупным черным кружком. Окружающие вакансию радикалы помечены буквой **R**. (б) Адсорбция атома углерода оболочкой луковицы. Слева свободный атом (крупный черный кружок) расположен над одной из связей пятиугольника. Справа атом встраивается в оболочку, разрывая связь в пятиугольнике. Адсорбированный атом имеет ненасыщенную связь

Выбитый атом углерода (черный крупный атом на рис.1) адсорбируется смежной оболочкой луковицы. Этот атом разрывает одну из связей в пятиугольнике смежной оболочки и встраивается в нее (рис.1b). Такой процесс аналогичен процессу адсорбции, описанному в работе [21]. Отметим, что равновесному состоянию луковицы соответствует такое расположение ее оболочек, при котором пятиугольники в различных оболочках расположены друг под другом [10].

При энергии  $E_{in} = 110$  эВ из пятиугольника выбивается атом-мишень, однако лишь две из трех его связей разрываются. Тот атом внешней оболочки, с которым атом-мишень связан, смещается в глубь луковицы, так что единственная связь атома-мишени направлена теперь по радиусу луковицы.

Таким образом, при  $T = 300$  К энергетический порог образования вакансии в месте расположения атома-мишени составляет 100 эВ.

**Высокотемпературный режим:** температура луковицы 1000 К. Основываясь на результатах предыдущего этапа, мы начали вычисления с энергии  $E_{in}$ , равной 110 эВ, и на каждом последующем шаге уменьшали ее на 10 эВ.

При энергии  $E_{in} = 110$  эВ ион выбивает атом-мишень, который адсорбируется смежной оболочкой, как показано на рис.1b, одновременно образуя связь с атомом внешней оболочки. Два из трех окружающих вакансию атомов с ненасыщенными связями объединяются, образуя пятиугольник [22].

Налетающий ион с энергией 100 эВ выбивает атом-мишень, который затем адсорбируется смежной оболочкой (см. рис.1b). Перегруппировка атомов, окружающих образовавшуюся во внешней оболочке вакансию, приводит к образованию дефекта,

показанного на рис.2а. В центре такого дефекта расположен атом с координационным числом  $K =$

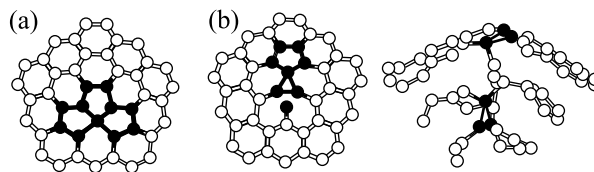


Рис.2. Примеры дефектов, образующихся в луковице при ее бомбардировке ионами Ag. (а) Дефект с четырехкоординированным атомом в центре, образовавшийся в результате перегруппировки радикалов (**R**) на рис.1а. (б) Группа связанных дефектов, образующихся в луковице при  $T = 1000$  К и энергии  $E_{in} = 80$  эВ. Слева показан дефект во внешней оболочке, справа три оболочки луковицы связаны (темным отмечены треугольные циклы атомов)

$= 4$ . Образование четырехкоординированного атома в окрестности вакансии возможно и в гексагональной сети, тогда такой атом одновременно является вершиной двух пятиугольников и двух шестиугольников [22].

По-иному ведет себя атом-мишень, выбитый из внешней оболочки луковицы налетающим ионом с энергией  $E_{in} = 90$  эВ. По-прежнему на месте этого атома после процесса взаимодействия с ионом образуется вакансия, окруженная тремя радикалами (рис.1а), два из которых, объединяясь впоследствии, образуют пятиугольник. Далее атом-мишень выбивает один из атомов смежной оболочки и занимает его место, освободившийся же в результате такого процесса атом адсорбируется внутренней оболочкой –  $C_{60}$ .

Сложный каскад дефектов в структуре луковицы образуется при энергии иона  $E_{in} = 80$  эВ. Дефект во внешней оболочке показан на рис.2b слева. Радикал во внешней оболочке (см. левую часть рис.2b) разрывает связь с атомами смежной оболочки. Атом-мишень адсорбируется смежной оболочкой, выбивая из нее атом и провоцируя образование в ней дефектов, являющихся комбинацией элементарных дефектов, показанных на рис.2 и 3а. Результатом сложной траектории движения атома-мишени, выбитого из внешней оболочки, является связывание всех трех оболочек между собой (рис.2b, справа). Характерной особенностью такой структуры также является наличие двух треугольников (см. рис.2b).

При энергии иона  $E_{in} = 70$  эВ атом-мишень также встраивается в смежную оболочку, выбив один из ее атомов, который впоследствии адсорбируется внутренней оболочкой. Однако в данном случае, встраи-

Распределение углеродных атомов ( $N_{at}$ ) в луковиче  $C_{60}@C_{240}@C_{540}$  по координационному числу  $K$  в различных температурных режимах ( $T = 300$  К и  $T = 1000$  К) после бомбардировки ионом Ag с энергией  $E_{in}$ .

$K$	$E_{in}$	$T = 300$ К			$T = 1000$ К									
		90 эВ	100 эВ	110 эВ	20 эВ	30 эВ	40 эВ	50 эВ	60 эВ	70 эВ	80 эВ	90 эВ	100 эВ	110 эВ
1		0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	$N_{at}$	0	4	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1
3		840	836	837	840	838	840	838	834	836	832	838	838	838
4		0	0	2	0	2	0	1	6	4	7	1	1	1

ваясь во внутреннюю оболочку, он разрывает одну из связей гексагона (а не пентагона как на рис.1b), что приводит к образованию вместо двух гексагонов двух гептагонов. Следует отметить, что при таком механизме адсорбируемый атом имеет ненасыщенную связь, которая ориентирована в направлении от центра луковичи. Такая конфигурация обладает чрезвычайно высокой реакционной способностью, что в данном конкретном случае приводит к образованию химической связи с атомом смежной центральной оболочки. В результате этот атом смежной оболочки переходит в  $sp^3$ -состояние.

На следующем шаге энергия иона была равна 60 эВ. Из бомбардируемого пятиугольника выбивается димер. Следствием образования двойной вакансии является возникновение ненасыщенных связей у четырех атомов (рис.3а, слева), окружающих вакансии, насыщение которых приводит к образова-

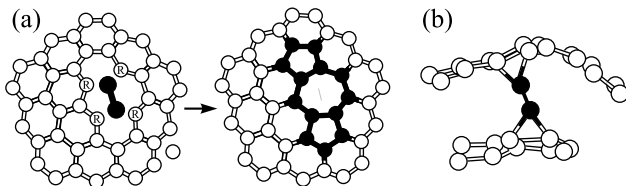


Рис.3. Дефект образующийся в луковиче при  $T = 1000$  К и энергии  $E_{in} = 60$  эВ. (а) Слева черным показан димер, выбитый из внешней оболочки – радикалы, окружающие двойную вакансию, обозначены буквой R. Справа показано объединение радикалов, в результате чего образуются два пятиугольника и семиугольник (показаны темным). (b) Темным показан выбитый димер, связавший две оболочки

нию двух пятиугольников и одного семиугольника (рис.3а, справа). Ось выбитого димера ориентирована по радиусу луковичи, благодаря чему он связывает внешнюю и среднюю оболочки (рис.3b). Также недалеко от основного дефекта образуется  $sp^3$ -связь между атомом внутренней и атомом средней оболочки.

При  $E_{in} = 50$  эВ атом-мишень не выбивается из бомбардируемого пятиугольника, однако сильно смещается внутрь луковичи, что приводит к разрыву одной из его связей. Таким образом, во внешней оболочке луковичи возникают два радикальных атома, причем один из них (атом-мишень), получив импульс от иона Ag, смещается внутрь, что приводит к его связыванию с атомом смежной оболочки, а второй смещается в противоположную сторону. Далее развитие каскада дефектов в луковиче происходит по следующему сценарию: атом средней оболочки, связанный теперь с атомом-мишенью, смещается по направлению от центра луковичи, что приводит к разрыву одной из его связей. В результате в структуре средней оболочки образуется радикал. Этот радикал смещается в глубь структуры и образует связь с одним из атомов внутренней оболочки, который в результате становится тетраэдрально координированным. Таким образом, налетающий ион с энергией 50 эВ приводит к возникновению каскада однотипных дефектов в оболочках луковичи. Очевидно, что в данном случае энергии иона уже не достаточно для того, чтобы выбить атом-мишень из оболочки. Полученные же в результате столкновения энергия и импульс идут на разрыв связи и смещение образовавшихся радикалов в противоположные стороны относительно друг друга. Следует отметить, что такой каскадный механизм образования дефектов является чрезвычайно продуктивным для связывания оболочек луковичи.

При  $E_{in} = 40, 30, 20$  эВ вакансии в оболочке луковичи не образуются. Отметим, что при таких низких энергиях атом-мишень часто смещается вглубь, что приводит к образованию  $sp^3$ -связи с атомом смежной оболочки.

Распределение атомов по координационному числу для различных энергий иона Ag приведено в таблице. Из таблицы видно, что максимальное число атомов с  $K = 4$  в высокотемпературном режиме приходится на энергии бомбардирующего иона 60–80 эВ.

Таким образом, в данной вычислительной серии установлено, что пороговое значение энергии для

образования вакансии в месте расположения атома-мишени зависит от температуры и составляет 100 эВ при  $T = 300$  К и 60 эВ при  $T = 1000$  К. При невысоких энергиях иона (20–40 эВ) образуются  $sp^3$ -связи между внешними оболочками.

Отметим, что здесь были описаны подробно не все возможные типы дефектов, а лишь наиболее часто встречающиеся.

**Бомбардировка углеродной луковичи  $C_{60}@C_{240}@C_{540}@C_{960}$  пучком ионов Ag.** В отличие от идеальной нанотрубы, в фуллерене не все атомы эквивалентны по отношению к ионному пучку из-за наличия в структуре топологических дефектов в форме пятиугольников. Для установления различий во взаимодействии атомов луковичи, принадлежащих пентагонам и гексагонам, с бомбардирующими ионами мы провели следующий модельный эксперимент: поверхность углеродной луковичи  $C_{60}@C_{240}@C_{540}@C_{960}$ , состоящей из четырех оболочек, облучалась пучком ионов Ag. Мы увеличили количество оболочек в луковиче на одну по сравнению с предыдущим этапом для того, чтобы увеличить площадь взаимодействия ионного пучка с луковичей. Отношение площади сечения налетающего пучка к максимальной площади сечения луковичи  $\sim 1.1$ . Доза облучения составляла  $0.5 \cdot 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>. При такой дозе облучения минимальное расстояние между ионами Ag в пучке равно 4.5 Å, что в рамках выбранного нами потенциала позволяет рассматривать их как слабо взаимодействующие друг с другом. Отношение массы налетающего пучка к массе луковичи равно 0.09, благодаря чему отпадает необходимость моделирования подложки для компенсации импульса налетающего пучка. Продолжительность одного МЭ составляла  $\Delta t = 10$  пс. Мы увеличили  $\Delta t$  по сравнению с предыдущим этапом в 4 раза. Так как с увеличением количества бомбардирующих ионов увеличивается количество дефектов в структуре, то эволюция дефектов носит теперь коллективный характер, что приводит к увеличению времени установления равновесия в структуре.

**Низкотемпературный режим: температура луковичи 300 К.** В рамках этого этапа мы провели три вычислительных серии в низкотемпературном режиме ( $T = 300$  К) для энергий ионов в пучке, равных 0.1 кэВ, 0.5 кэВ и 1.0 кэВ. В каждой вычислительной серии было проведено 12 МЭ для различной ориентации луковичи по отношению к пучку. Луковича вращалась на угол 90° относительно каждой из главных осей инерции при направлении пучка, перпендикулярном данной оси.

Основным типом дефектов в структуре при энергии ионов в пучке 0.1 кэВ является образование  $sp^3$ -связи между двумя внешними оболочками. Только в одном из МЭ мы наблюдали образование вакансии в пятиугольнике. Также лишь в одном МЭ облучение привело к разрыву связи между двумя атомами пятиугольника. Вакансий в шестиугольниках при данной энергии ионов не образуется.

При энергии 0.5 кэВ также наиболее часто встречающимся типом дефектов является связывание внешних оболочек посредством  $sp^3$ -связей. Однако в трех из 12 МЭ образуются одиночные вакансии в пятичленных циклах. Образование вакансий в шестиугольниках при заданных параметрах МЭ не наблюдается.

При облучении луковичи пучком ионов с энергией 1 кэВ количество образующихся вакансий резко возрастает. Положение шестиугольников относительно пятиугольников в фуллерене  $C_{960}$  можно охарактеризовать, воспользовавшись следующей терминологией. Шестиугольники, непосредственно прилегающие к пятиугольникам, назовем первой координационной сферой пятиугольника (КСП). Шестиугольники, следующие за ними, – второй КСП. Таким образом, каждый пятиугольник в фуллерене  $C_{960}$  имеет три собственных КСП (они показаны на вставке к рис.4). Сам пятиугольник будем называть нулевой КСП. На графике рис.4 крестиками показано рас-

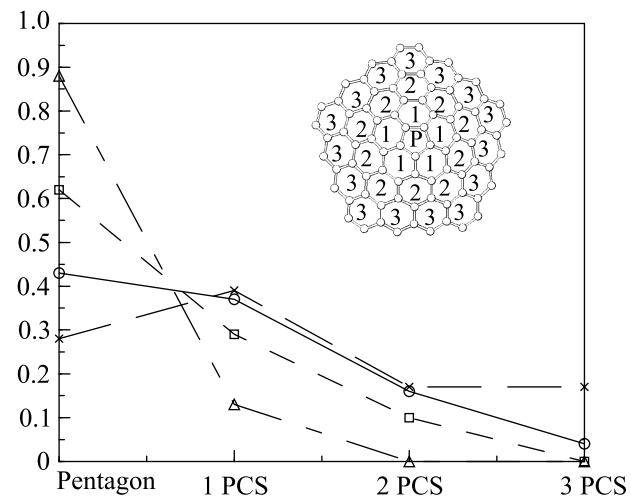


Рис.4. Распределение относительного числа вакансий по координационным сферам пятиугольника. По оси ординат отложено отношение количества вакансий в данной КСП к суммарному числу вакансий во всех КСП. Крестиками отмечены результаты моделирования при  $T = 300$  К и  $E_{in} = 1$  кэВ; треугольниками –  $T = 1000$  К и  $E_{in} = 0.1$  кэВ; квадратиками –  $T = 1000$  К и  $E_{in} = 0.5$  кэВ; кружками –  $T = 1000$  К и  $E_{in} = 1$  кэВ

пределение относительного числа вакансий по КСП. Из графика видно, что максимум распределения приходится на первую координационную сферу.

**Высокотемпературный режим:** температура луковичи 1000 К. Мы провели аналогичные вычисления в высокотемпературном режиме. Распределение атомов по КСП представлены на графике рис.4. Из графика видно, что для всех трех использованных в исследовании энергий ионов в пучке максимальное число вакансий образуется в атомах пятиугольников. В качестве общей тенденции следует отметить, что число образовавшихся вакансий уменьшается с увеличением номера КСП, то есть по мере удаления от пятиугольников. При энергии ионов 1 кэВ также образуются кластерные вакансии [4], а при некоторых ориентациях пучка по отношению к луковиче выбиваются все атомы пентагона. При энергиях 0.5 и 1 кэВ выбитые атомы углерода уже обладают достаточной энергией для образования вакансий во внутренних оболочках луковичи. Максимальная глубина проникновения дефектов в луковичу составляет две оболочки для энергий ионов 0.1 кэВ, 3 оболочки для энергий ионов 0.5 кэВ и при энергиях ионов 1 кэВ все четыре оболочки луковичи повреждены.

Основные выводы данного вычислительного этапа:

- при выбранных энергиях ионов в пучке и дозе облучения максимальное число вакансий образуется в пентагонах, а количество образовавшихся вакансий уменьшается по мере удаления от областей пятиугольников;
- глубина проникновения дефектов увеличивается с увеличением энергии пучка;
- при высоких энергиях ионов в пучке в структуре луковичи образуются кластерные вакансии и вакансии в пентагонах смежных оболочек, расположенных под пентагоном с первичными вакансиями.

Таким образом, в работе показано, что при равномерном облучении углеродной луковичи ионным пучком вероятность образования вакансии распределена неравномерно по поверхности луковичи и уменьшается по мере удаления от областей пятиугольников. Энергетический порог образования вакансии в пятиугольном цикле зависит от температуры и уменьшается с ее возрастанием. Основные пути насыщения связей радикальных атомов, окружающих образовавшуюся вакансию - это образование связи между двумя соседними радикалами в оболоч-

ке и образование межоболочечных связей. В результате последнего процесса в структуре луковичи могут возникать  $sp^3$ -атомы. Другой механизм образования  $sp^3$ -атомов – смещение атомов оболочки при столкновении с ионом, в результате чего образуется  $sp^3$ -связь с атомом соседней оболочки. Освободившийся в результате столкновения атом углерода в большинстве случаев адсорбируется соседней оболочкой при разрыве одной из связей образующих ее атомов. Выбитый атом сам может являться источником образования вакансии в соседних оболочках. Вакансия в оболочке луковичи является короткоживущей ( $T_{life} < 2.5$  пс). В целом, бомбардировка углеродной луковичи ионным пучком приводит к образованию в ее структуре значительного числа топологических дефектов в форме 5- и 7-угольников, реже в структуре возникают трехчленные циклы.

На атомном уровне показано, что бомбардировка углеродной луковичи ионами Ag приводит к связыванию ее оболочек и образованию в ней  $sp^3$ -атомов при относительно невысоких температурах, что является прямым подтверждением возможности трансформации углеродной луковичи в алмаз под воздействием облучения [1, 2].

Работа выполнена в рамках проекта “Фуллерены и атомные кластеры” Российской программы “Актуальные направления в физике конденсированных сред”.

- 
1. P. Wesolowski, Y. Lyutovich, F. Banhart et al., Appl. Phys. Lett. **71**, 1948 (1997).
  2. F. Banhart and P. M. Ajayan, Nature **382**, 433 (1996).
  3. M. Terrones, F. Banhart, N. Grobert et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 075505(2002).
  4. I. V. Krashennnikov, K. Nordlund, M. Sirviö et al., Phys. Rev. **B63**, 245405 (2001).
  5. A. V. Krashennnikov, K. Nordlund, and J. Keinoneon, Phys. Rev. **B66**, 245403 (2002).
  6. A. V. Krashennnikov, K. Nordlund, and J. Keinoneon, Phys. Rev. **B65**, 165423 (2002).
  7. B. Ni, R. Andrews, D. Jacques et al., J. Phys. Chem. **B105**, 12719 (2001).
  8. M. Zaiser and F. Banhart, Phys. Rev. Lett. **79**, 3680 (1997).
  9. R. Astala, M. Kaukonen, and R. M. Nieminer, Phys. Rev. **B63**, 081402 (2001).
  10. И. В. Пономарева, Л. А. Чернозатонский, Письма в ЖЭТФ **76**, 532 (2002).
  11. T. L. Daulton, M. A. Kirk, R. S. Lewis, and L. E. Rehn, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. **B175-177**, 12 (2001).

12. D. Ugarte, *Nature* **359**, 707 (1992).
13. D. W. Brenner, O. A. Shendorova, J. A. Harrison et al., *J. Phys.:Condens. Matter* **14**, 783 (2002).
14. D. W. Brenner, *Phys. Status. Solidi* **B217**, 23 (2000).
15. S. Sinnott, O. A. Shendorova, C.T. White, and D. W. Brenner, *Carbon* **36**, 1 (1998).
16. I. Jang, S. B. Sinnott, D. Danailov, and P. Keblinski, *Nanoletters* **4**, 109 (2004).
17. M. B. J. Wijesundara, Y. Ji, B. Ni et al., *J. Appl. Phys.* **88**, 5004 (2000).
18. M. B. J. Wijesundara, L. Hanley, B. Ni, and S. B. Sinnott, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **97**, 23 (2000).
19. G. C. Maitland, M. Rigby, E. B. Smith, and W. A. Wakeham, *Intermolecular forces: their origin and determination*, Clarendon, Oxford (1981).
20. H. J. C. Berendsen, J. P. M. Postma, W. F. van Gunsteren et al., *J. Chem. Phys.* **81**, 3684 (1984).
21. K. Nordlund, J. Keinoneon, and T. Mattila, *Phys. Rev. Lett.* **77**, 699 (1996).
22. P. M. Ajayan, V. Ravikumar, and J.-C. Charlier, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 1437 (1998).