

Образование наноструктур на поверхности стеклоглерода при лазерном воздействии

Д.В.Абрамов, М.Н.Герке, А.О.Кучерик, С.В.Кутровская, В.Г.Прокошев, С.М.Аракелян

Разработана экспериментальная методика получения наноструктур в поле мощного лазерного излучения на поверхности углеродосодержащих материалов. Особенностью данного метода является возникновение жидкого углерода внутри области воздействия при облучении образца в атмосферном воздухе и давлении, близком к 1 атм. Внутри лазерной каверны и за границей области воздействия обнаружено несколько типов наноструктур: квазидомены и «нанопики». Предложены механизмы их формирования. Зарождение квазидоменов связано с процессом кристаллизации расплава. Формирование групп «нанопиков» вне области воздействия происходит в процессе осаждения горячих паров материала, покидающих область воздействия. Найдены зависимости изменения морфологических свойств получаемых наноструктур от длительности воздействия и радиальных размеров характерных зон каверны от мощности лазерного излучения.

Ключевые слова: стеклоглерод, наноструктуры, лазерная абляция.

1. Введение

Исследование возможности образования наноструктур на поверхности углеродосодержащих образцов является в настоящее время одним из наиболее активно развивающихся направлений лазерной физики [1–4]. Развитие этого направления связано с тем, что свойства образующихся наноструктур существенно зависят от параметров лазерного излучения (длины волны, длительности импульса, формы пучка). В разработанных в последнее время лазерных системах используются данные параметры, изменяющиеся в широких диапазонах, что позволяет рассчитывать на генерацию наноструктур с заданными свойствами.

В настоящей работе в качестве объекта исследования был выбран стеклоглерод. Из-за своей аморфной структуры, этот материал сравнительно легко поддается воздействию лазерного излучения с интенсивностью, не превышающей 10^7 Вт/см². Указанный диапазон интенсивностей в настоящее время достаточно часто используется в технологических лазерных системах.

В проведенных экспериментах обнаружены зависимости морфологических свойств генерируемых наноструктур от расстояния от центра области воздействия. Показано, что механизмы их образования имеют различную природу. Зафиксированы признаки образования расплава в центре лазерной каверны и осаждения газовой фазы за границами области воздействия.

2. Экспериментальная установка

Образец из стеклоглерода подвергался воздействию излучения лазера на YAG: Nd³⁺ с длиной волны $\lambda = 1.06$ мкм, работающего в импульсно-периодическом режиме с частотой следования импульсов $f = 150$ Гц и длительностью импульса $\tau = 1.5 - 2.5$ мс. Размер пятна излучения на образце изменялся от 100 до 400 мкм. Средняя мощность излучения варьировалась в пределах 30–80 Вт, при этом обеспечивалась интенсивность излучения на поверхности образца до 10^7 Вт/см². Время воздействия t составляло от 1 до 10 с.

3. Результаты экспериментов

Свойства образцов после воздействия на них лазерного излучения исследовались с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ). Результатом зондирования материала являлись изображения его поверхности. В ходе экспериментов удалось установить, что наиболее яркие признаки плавления стеклоглерода обнаруживаются при максимальной мощности $P = 80$ Вт, длительности воздействия не менее 3 с и давлении ~ 1 атм.

На рис.1 приведено изображение характерной кавер-

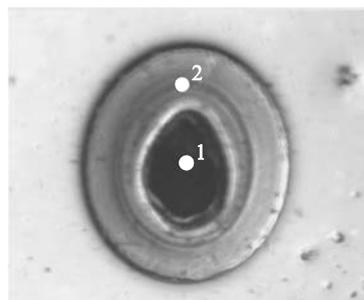


Рис.1. Изображение каверны с увеличением $28\times$ при мощности $P = 30$ Вт и времени воздействия $t < 3$ с.

Д.В.Абрамов, М.Н.Герке, А.О.Кучерик, С.В.Кутровская, В.Г.Прокошев, С.М.Аракелян. Владимирский государственный университет, факультет прикладной математики и физики, Россия, 600000 Владимир, ул. Горького, 87; e-mail: laser@vpti.vladimir.ru, kucherik@vlsu.ru

Поступила в редакцию 12 марта 2007 г., после доработки – 28 мая 2007 г.

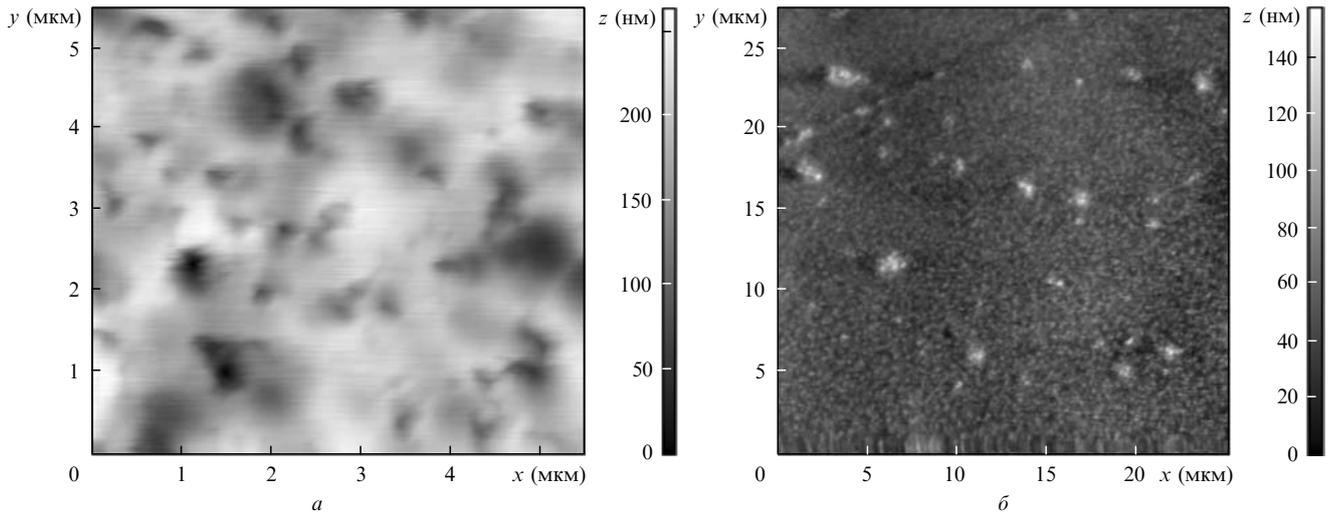


Рис.2. АСМ-изображение поверхности образца при времени воздействия $t < 3$ с и мощности $P = 80$ Вт: двумерные рельефы области 1 (а) и области 2 (б).

ны, образующейся на поверхности стеклоглуглера при времени воздействия лазерного излучения $t < 3$ с. Проведенные эксперименты показали, что процесс образования каверн при $t < 3$ с имеет следующие характерные особенности:

- возникновение двух визуально различных областей: 1 – область непосредственного воздействия с гладким рельефом; 2 – область кольцевых структур, сильно рассеивающая свет (рис.1);

- наноструктурирование поверхности образца, обнаруженное с помощью АСМ: в области 1 имелись структуры типа сталогнитов – провалов поверхности (рис.2,а), а для области 2 характерно образование наноструктур в виде «пиков», которые принято называть в настоящее время «нанопиками» [5] (рис.2,б).

Отметим, что размеры структур типа сталогнитов различны и колеблются от 0.08 до 5 мкм по их основанию. При этом средний продольный размер этих структур достигает 200–400 нм.

Обнаруженные внутри области 2 «нанопики» с диаметрами основания 0.4–0.5 мкм и высотами 60–300 нм имеют вид разрозненных структур и находятся у центрального кольца. По направлению к внешнему краю встречаются более уплотненные образования с меньшей высотой, но с большим основанием.

При увеличении времени воздействия ($t > 3$ с) происходил рост числа визуально различных областей, в которых при сканировании можно было проследить качественное изменение рельефа поверхности. Наиболее ярко оно проявлялось в изменении радиального размера наблюдаемой области в целом, глубины центральной зоны каверны, высот рельефа в переходных областях, а также в образовании множества разломов в центральной зоне (рис.3).

В области 1 находится переплавленный углерод, внутри области перепады высот рельефа достаточно велики (рис.4,а). В областях 2 и 3 (рис.4,б,в) имеются почти регулярные квазидоменные структуры. Из-за высокой повторяемости структур их изображение напоминает нанозерна на поверхности материалов, обрабатываемых при высоких давлениях и температурах [1, 3]. Различие формы границ квазидоменов позволяет считать, что они сформировались под действием разных процессов. Обра-

зование в области 3 ярко выраженных правильных многоугольников (в нашем случае – пяти- и шестиугольников) позволяет в соответствии с работами [3, 6] говорить о кристаллизации тонкого слоя однородной жидкости на аморфной поверхности. Разрушение правильных границ квазидоменов в области 2, возможно, обусловлено влиянием температурного фактора [3].

На границе каверны (область 4) образуются кольцевые структуры. Между ними поверхность сильно неоднородна, фиксируются множественные «складки» и напороховатости (рис.4,з).

В областях 5, 6, 7 были обнаружены «нанопики», при этом на поверхности образцов удалось выделить переходную область. Ее отличительной особенностью является наличие исходного рельефа образца под «новообразованиями» (рис.5). Данная область имеет четкие границы, ее размер зависит от мощности и длительности воздействия лазерного излучения. Возможно, процесс формирования переходной области связан с осаждением горячих паров материала, покидающих область воздействия. Можно утверждать, что разрушение поверхности в твердой фазе под действием возникающих термических

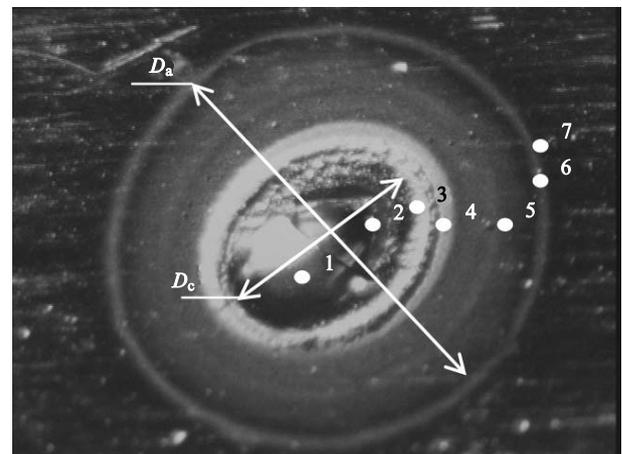


Рис.3. Изображение каверны на поверхности стеклоглуглера с увеличением $28\times$ при мощности $P = 76$ Вт и времени воздействия $t = 5$ с; D_a и D_c – диаметры всей наблюдаемой области и каверны соответственно.

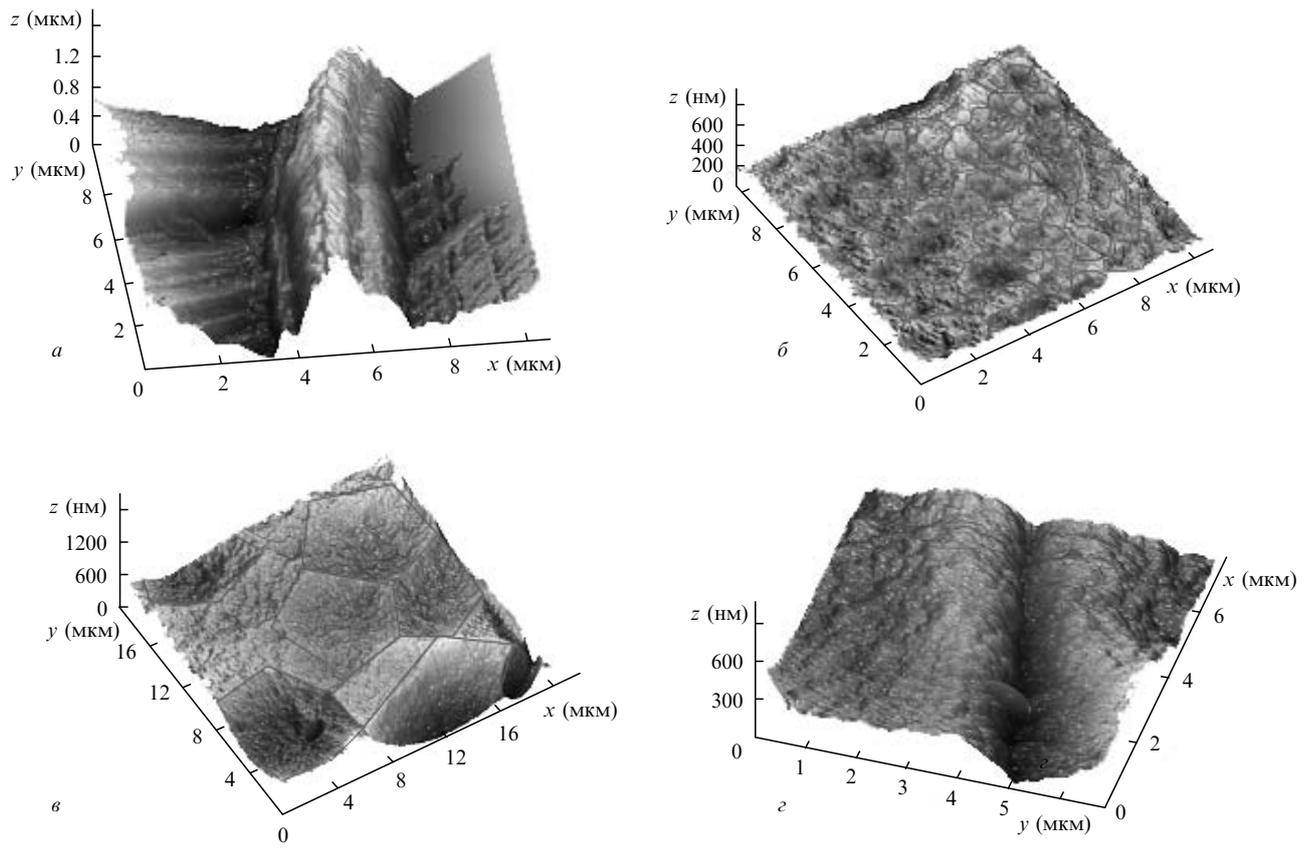


Рис.4. АСМ-изображение поверхности образца в различных областях: центральной (а), удаленной от центра на расстояние ~ 50 мкм (б), на внутренней (в) и внешней (г) границах каверны.

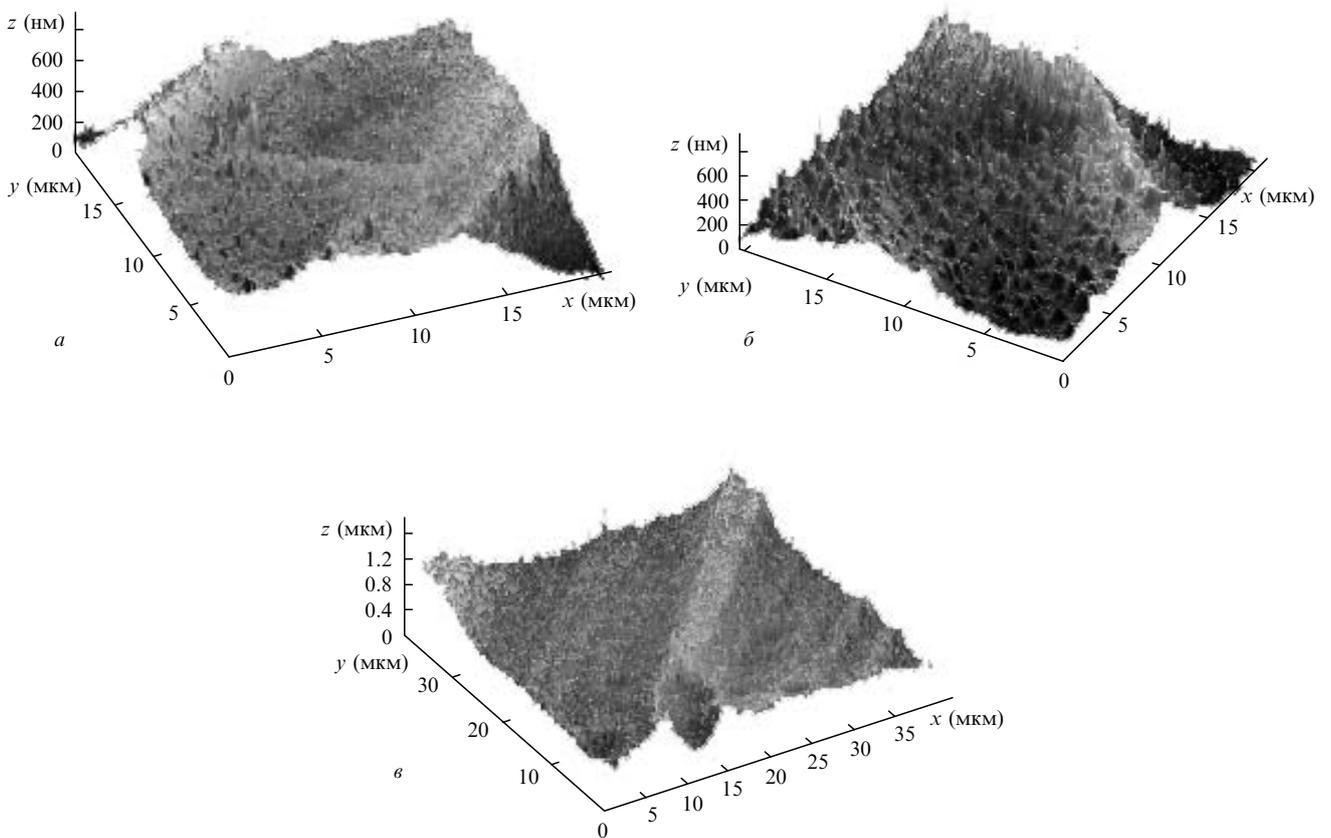


Рис.5. «Нанопики» в области 5 (область напыления) (а), области 6 (образование внешнего ободка) (б) и области 7 (осаждение на исходную поверхность) (в).

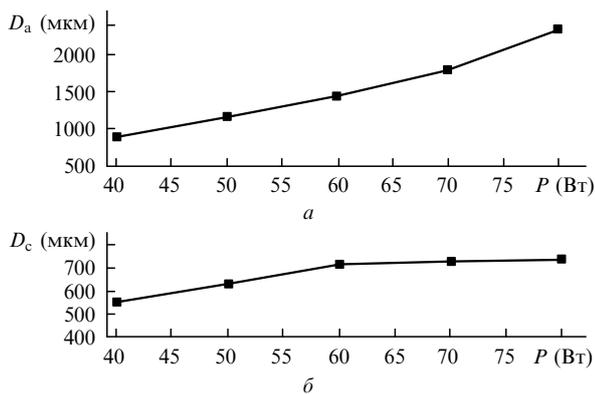


Рис.6. Зависимости от мощности лазерного излучения диаметров всей модифицированной области (a) и каверны (b).

напряжений в этом случае не является доминирующим механизмом, поскольку сохраняется первоначальный рельеф поверхности.

В данной серии экспериментов излучение Nd:YAG-лазера подводилось под углом к нормали к поверхности образца. За счет этого прослеживалось вытекание жидкой фазы углерода в направлении сформированного канала плавления под действием давления паров отдачи [7] (рис.3). Однако образование «нанопиков», диагностируемых с помощью АСМ, происходит на всей поверхности кольцевых областей 5, 6, 7 с примерно одинаковой частотой. Следовательно, можно утверждать, что кристаллизация расплава не влияет на образование данных структур.

Проведенные исследования позволили установить зависимости изменения морфологических свойств от длительности воздействия лазерного излучения. Явной зависимости этих свойств от мощности лазерного излучения получить не удалось, поскольку с увеличением мощности наблюдался рост радиальных размеров типичных областей (рис.3). На рис.6 представлены зависимости диаметров каверны и области модифицированной поверхности от мощности излучения. Таким образом, опытным пу-

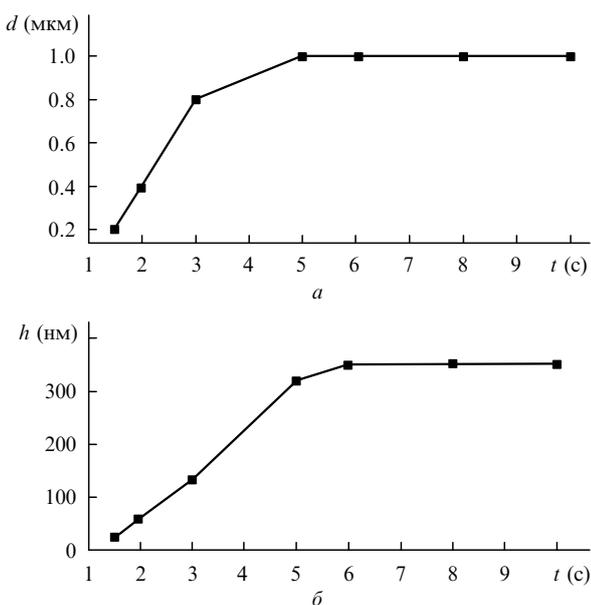


Рис.7. Зависимости среднего диаметра «нанопиков» на полувысоте d (a) и их средней высоты h (b) от времени облучения.

тем удалось определить, что изменение мощности воздействия при фиксированном времени облучения не влияет на геометрические параметры наноструктур, а определяет их пространственное распределение.

Для измерения геометрических размеров образующихся за областью воздействия «нанопиков» на полученном рельефе поверхности выделялись хорошо различимые, отдельно стоящие наноструктуры. Из зависимостей, приведенных на рис.7, видно, что рост среднего диаметра «нанопиков» от времени воздействия прекращается при $t = 5$ с. Такое поведение хорошо согласуется с ранее изложенной теорией образования наноструктур в процессе осаждения горячих паров.

Изменение высоты наблюдаемых «нанопиков» также прекращается со временем и при $t \geq 6$ с средняя высота образующихся структур не изменяется (рис.7, b). Скорее всего это связано с тем, что при больших временах воздействия поверхность равномерно покрывается оседающими атомами углерода.

4. Заключение

Таким образом, экспериментально разработан метод получения наноструктур в поле мощного лазерного излучения на поверхности стеклоуглерода. Особенностью данного метода является возникновение жидкого углерода внутри области воздействия при облучении в воздухе и давлении, близком к 1 атм.

Внутри лазерной каверны и за границей области воздействия обнаружено несколько типов наноструктур, отличающихся друг от друга. Характерный вид структур, зафиксированных вблизи центра воздействия, позволяет предположить, что в процессе воздействия образуется жидкая фаза.

Зарождение квазидоменов связано, по всей видимости, с процессом кристаллизации расплава [4], а формирование групп «нанопиков» вблизи кольцевых структур в соответствии с работами [5, 8] обусловлено процессами микроплавления и массопереноса. Выявлено, что формирование групп «нанопиков» вне области воздействия связано с процессами осаждения горячих паров углерода на холодную поверхность.

Авторы выражают благодарность И.И.Климовскому и А.Ф.Галкину за помощь в работе.

Работа поддержана грантами РФФИ № 05-08-33410-а и 06-08-96332-р-центр-а.

1. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. *Наноструктурные материалы: Учебное пособие для студентов вузов* (М.: Издательский центр «Академия», 2005).
2. Лозовик Ю.В., Попов А.М. *УФН*, **167** (7), 151 (1997).
3. Суздаев И.П. *Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов* (М.: КомКнига, 2006).
4. Гусев А.И. *Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии* (М.: Физматлит, 2005).
5. Simakin A.V., Voronov V.V., Shafeev G.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5121**, 103 (2003).
6. Гапонов-Грехов А.В., Ломов А.С., Рабинович М.И. *Письма в ЖЭТФ*, **44** (5), 242 (1986).
7. Абрамов Д.В., Аракелян С.М., Галкин А.Ф., Квачева Л.Д., Климовский И.И., Кононов М.А., Михайлицин Л.А., Кучерик А.О., Прокошев В.Г., Савранский В.В. *Письма в ЖЭТФ*, **84** (5), 315 (2006).
8. Асиновский Э.И., Кириллин А.В., Костановский А.В. *УФН*, **172** (8), 931 (2002).