

О возможности исследования временной эволюции рельефа поверхностей, подвергающихся воздействию мощных потоков энергии, непосредственно во время воздействия

Д.В.Абрамов, С.М.Аракелян, А.Ф.Галкин, И.И.Климовский, А.О.Кучерик, В.Г.Прокошев

С помощью лазерного монитора получено видеоизображение поверхности графита, подвергающейся воздействию сфокусированного лазерного излучения. Зафиксировано существование перемещающегося по нагреваемой поверхности светлого кольца. На основе измеренного углового распределения интенсивности света, рассеянного поверхностью графитового образца, предложен и реализован метод восстановления рельефа поверхности по видеоизображению. Восстановлен эволюционирующий во времени рельеф поверхности графитового образца. Определено относительное изменение высот рельефа в процессе лазерного воздействия. Исследованы статистические характеристики восстановленной формы поверхности и характер их изменения в процессе лазерного воздействия на поверхность графитового образца. Установлено, что в пределах светлого кольца возникает кольцеобразная выпуклость, определение механизма образования которой требует дальнейших исследований.

Ключевые слова: взаимодействие лазерного излучения с поверхностью, лазерный проекционный микроскоп, изменяющийся во времени рельеф поверхности.

1. Введение

Впервые лазерный проекционный микроскоп был реализован в 1973 г. в работе [1], в которой усилителем яркости изображения служил импульсно-периодический лазер на парах меди. К концу 1980-х – началу 1990-х годов основные исследования лазерных проекционных микроскопов с использованием различных лазеров на парах металлов были завершены, что нашло отражение в целом ряде публикаций [2–7]. Ожидалось, что лазерные проекционные микроскопы будут широко использоваться в микроэлектронике, лазерных технологиях, медицине и т. д.

Однако, по-видимому, единственным применением лазерных проекционных микроскопов, успешно развивающимся в настоящее время, являются лазерные системы для наблюдения в реальном времени зон взаимодействия мощных потоков энергии с поверхностями различных веществ. Основная причина, затрудняющая визуализацию этих зон обычными методами, заключается в образовании над ними ярко светящейся плазмы.

Впервые наблюдения при помощи лазерного проекционного микроскопа области взаимодействия мощных энергетических потоков с поверхностями различных веществ осуществлены в реальном времени в работах [8, 9]. Поскольку основная цель подобных экспериментов – наблюдение поверхностей, экранированных интенсивно

светящимися слоями плазмы, а не сильное увеличение их изображения, в работе [8] введен термин «лазерный монитор», подчеркивающий ту отличительную особенность лазерных проекционных микроскопов, которая позволяет использовать их в рассматриваемом случае.

За истекшее время применение лазерных мониторов позволило установить наличие жидкого углерода в областях замыкания тока на графитовых электродах слаботочной угольной дуги [10–12]. Более того, результаты этих работ радикальным образом изменили общепринятые до недавнего времени представления (см., напр., [13]) о состоянии углерода в данных условиях. Согласно результатам [10–12], угольная дуга является дугой с жидкими анодным и катодным пятнами, температура поверхности которых составляет около 4000 К.

Не менее интересные и важные научные результаты получены при исследовании плавления некоторых металлов сфокусированным лазерным излучением. Процесс плавления титана сопровождается образованием перед перемещающейся границей расплава окисной пленки [14], а на поверхности расплава свинца и титана во время воздействия на них лазерного излучения образуются капиллярные волны [14–16]. Кроме того, применение лазерных мониторов позволило, во-первых, зафиксировать эволюцию поверхности алюминиевой мишени в результате переноса энергии из плазмы, образовавшейся при воздействии лазерного импульса длительностью 15 нс на эту мишень [17], а во-вторых, определить условия замыкания тока на хромовом и гадолиниевом катодах вакуумной дуги [18–20]. В работе [21] опубликованы результаты первых наблюдений взаимодействия мощных электронных пучков с поверхностью металла. И хотя эти исследования нуждаются в дальнейшем продолжении, перспективность их проведения не вызывает сомнений.

Отличительная особенность всех перечисленных работ заключалась в том, что в них изучались двумерные изображения областей взаимодействия мощных энерге-

Д.В.Абрамов, С.М.Аракелян, А.Ф.Галкин, А.О.Кучерик, В.Г.Прокошев. Владимирский государственный университет, Россия, 600000 Владимир, ул.Горького, 87;
e-mail: laser@vpti.vladimir.ru; arak@vpti.vladimir.ru
И.И.Климовский. Институт теплофизики экстремальных состояний ОИВТ РАН, Россия, 125412 Москва, Ижорская ул., 13/19;
e-mail: klimovskii@ihed.ras.ru

Поступила в редакцию 17 марта 2005 г., после доработки – 10 марта 2006 г.

тических потоков с поверхностями различных веществ. Очевидно, что восстановление эволюционирующего во времени трехмерного рельефа поверхности, подвергающейся воздействию мощного энергетического потока, и определение статистических характеристик этого рельефа существенно расширяет и без того уникальные возможности лазерных мониторов.

В настоящей работе впервые исследована возможность восстановления рельефа поверхности и расчета его некоторых статистических характеристик по двумерному распределению яркости оптического изображения. В качестве объекта исследования выбран графит. Основанием для такого выбора послужило то обстоятельство, что наблюдение эволюции поверхности графита под действием лазерного излучения представляет самостоятельную задачу, актуальность которой обусловлена тем, что одним из основных способов нагрева графита при определении параметров его тройной точки (твердое тело – жидкость – пар) является лазерное воздействие. Однако, судя по результатам различных измерений температуры $T_{тр}$ и давления $p_{тр}$ в тройной точке, эти параметры существенным образом зависят от скорости роста $\partial T/\partial t$ температуры графита. Например, согласно работе [22] при скорости нагрева около 10^3 К/с получены $p_{тр} = 0.19$ атм и $T_{тр} = 3780$ К, а по данным работы [23] – $p_{тр} = 110$ атм и $T_{тр} = 4800$ К, однако скорость нагрева составляла в этом случае 3.7×10^5 К/с.

Противоречия между результатами измерений $p_{тр}$ и $T_{тр}$, подобные отмеченному выше, частично (при скоростях нагрева порядка 10^3 К/с и менее) устраняются предложенной в работах [24, 25] фазовой диаграммой углерода. Согласно этой диаграмме при нагревании графита до температуры 2600 К и более имеет место конверсия графита в карбин, которая при лазерном воздействии наблюдалась в работе [26]. Причем по данным [25] время конверсии τ_{conv} графита в карбин при температурах около 3800 К составляло 2–3 с. Это означает, что при нагреве графита до температуры около 4000 К за время, заметно превышающее τ_{conv} , происходят конверсия графита в карбин и плавление карбина, для которого давление и температура в тройной точке равны 2×10^4 Па и 3800 К. В работе [27] для объяснения роста температуры плавления углерода с увеличением $\partial T/\partial t$ предложена фазовая диаграмма углерода, параметрами которой являются не только температура и давление, но и скорость нагрева.

Таким образом, получить надежные экспериментальные данные, на основе которых могут быть объективно проверены различные точки зрения на фазовую диаграмму углерода, можно, по-видимому, только с помощью лазерных мониторов.

2. Результаты исследования эволюции поверхности графита с помощью лазерного монитора

В эксперименте использовалась та же установка, что и в работе [15], схематически изображенная на рис.1. Образец графита *б* нагревался излучением YAG:Nd³⁺-лазера *1*, подводимым к образцу с помощью поворотного зеркала *4* и фокусирующей линзы *3*. Лазер работал в импульсно-периодическом режиме с частотой повторения импульсов 150 Гц и длительностью импульса 2.5 мс. Средняя мощность излучения *P* изменялась в пределах

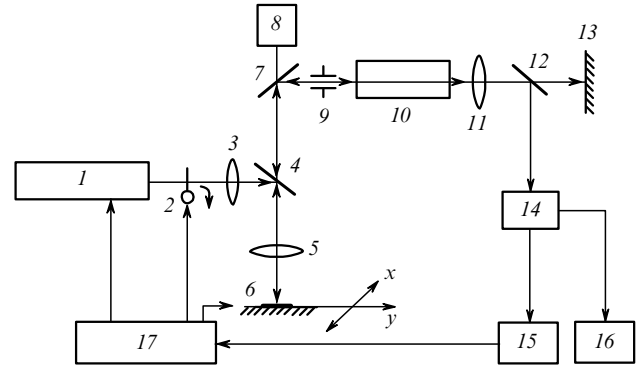


Рис.1. Схема экспериментальной установки:

1 – YAG:Nd³⁺-лазер; 2 – шторка; 3 – корректирующая линза; 4 – зеркало; 5 – объектив; 6 – исследуемый образец на координатном столе; 7 – поворотное зеркало; 8 – пьезосистема управления поворотным зеркалом; 9 – диафрагма; 10 – лазер на парах меди; 11 – проекционная система; 12 – светоделительная пластина; 13 – экран; 14 – цифровая видеокамера; 15 – компьютер; 16 – монитор; 17 – блок управления мощным лазером и координатным столом.

20–60 Вт. Наблюдение зоны взаимодействия лазерного излучения с поверхностью графитового образца осуществлялось с помощью лазерного монитора, включающего в себя лазерный усилитель на парах меди (в режиме сверхсветимости) *10*, поворотное зеркало *7* и диафрагму *9*. Изображение зоны взаимодействия, получаемое с помощью лазерного монитора, регистрировалось цифровой видеокамерой *14*.

В экспериментах использовались образцы из спектрально чистого графита (содержание примесей порядка 10^{-5} %, марка СЭУ, ТЭУ309-96), электрографитированные щетки (марка ЭГ-2А) с незначительным количеством примесей (нормативная зольность 0.95%, содержание примесей Fe, Si, Ca от 0.2 до 0.05 %) и графит плотностью 1.8 г/см³ с относительно большим количеством примесей. Поперечные размеры зоны фокусировки d_f излучения Nd-лазера и зоны наблюдения $d_{об}$ составляли соответственно около 0.1 см и около 0.3 мм.

Наиболее информативные изображения динамики области лазерного воздействия на поверхности графита получены для образцов графита плотностью 1.8 г/см³, что обусловлено относительно большим количеством примесей, существенно увеличивающих отражательную способность поверхности графита. В качестве примера на рис.2 представлены несколько изображений поверхности графитового образца, представляющих собой отдельные кадры видеозаписи, полученной с помощью лазерного монитора. Анализ наблюдаемой динамики области лазерного воздействия показывает, что нагрев поверхности графита сопровождается ее деформацией, в результате которой формируется четко выраженное светлое кольцо с поперечным размером около 0,01 мм, расширяющееся с некоторой скоростью по поверхности образца. Образование и перемещение светлых колец, подобных изображенному на рис.2, происходит наиболее интенсивно в диапазоне мощностей лазерного излучения $P = 40 - 65$ Вт. Увеличение P в указанном диапазоне приводит к росту скорости перемещения кольца от примерно 1 до 10 см/с. При мощностях около 52 Вт первоначальное перемещение светлого кольца заканчивается и оно стабилизируется на поверхности графита. Стабилизированное светлое кольцо можно наблюдать в обычный оптический микроскоп. Если $P = 52 - 65$ Вт,

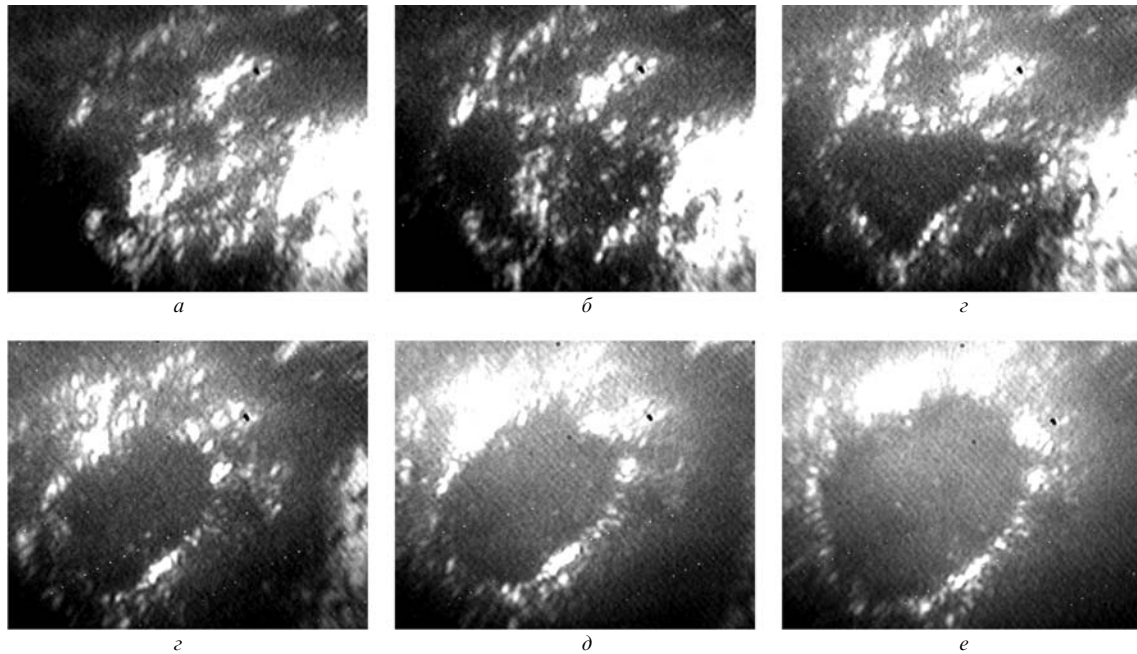


Рис.2. Изображения поверхности графита, эволюционирующей под действием лазерного излучения, в различные моменты времени t относительно начала воздействия: a – до взаимодействия, $t = 0$; b – начало взаимодействия, $t = 0.24$ с; c – расширение области модификации поверхности, $t = 0.36$ с; d – формирование яркой кольцевой зоны, $t = 0.44$ с; e – расширение кольцевой зоны, $t = 0.56$ с; f – стабилизация размеров кольцевой зоны, $t = 0.76$ с. Мощность лазерного излучения 46 Вт, поперечный размер области наблюдения около 0.3 мм.

после стабилизации светлого кольца происходит его исчезновение. При $P > 65$ Вт светлое кольцо не образуется, а воздействие лазерного излучения на поверхность образца приводит к возникновению на ней темного пятна с расширяющимися границами.

Сопоставление изображений поверхности графита, представленных на рис.2, позволяет сделать некоторые выводы. Во-первых, яркости отдельных областей поверхности графита при прохождении по ним светлого кольца совпадают (рис.2, d – e). Это указывает на то, что отражение лазерного излучения от поверхности графита в области светлого кольца обусловлено теми же причинами, что и отражение излучения от поверхности графита перед воздействием на нее лазерного излучения (рис.2, a). Во-вторых, поскольку примеси распределены по объему графита равномерно, можно предположить, что образование кольца на поверхности графита обусловлено временной эволюцией ее профиля под действием лазерного излучения, или, говоря другими словами, формированием области, расположенной более или менее перпендикулярно направлению распространения излучения лазера на парах меди и поэтому имеющей большую яркость, чем соседние участки поверхности. В-третьих, выравнивание яркости изображения поверхности графитового образца вне пределов светлого кольца (рис.2, e) может быть следствием сублимации этой поверхности как во время воздействия лазерного излучения, так и после него.

Корректность двух первых выводов подтверждается фотографированием зоны взаимодействия лазерного излучения с поверхностью графита с помощью оптического микроскопа после окончания взаимодействия (рис.3). Анализ фотографии позволил установить следующее.

1. На месте стабилизированного светлого кольца наблюдается выпуклость (указана стрелкой).

2. Внутри стабилизированного светлого кольца образуется каверна глубиной около 100 мкм. Глубина каверны определялась с помощью оптического микроскопа.

3. Каверна наблюдается и в том случае, когда в результате воздействия лазерного излучения происходит исчезновение светлого кольца.

Сказать что-либо определенное на основе оптических изображений поверхности графита, подвергшейся лазерному воздействию, о высоте кольцевой выпуклости и характере изменения рельефа поверхности внутри и вне кольца не представляется возможным. Ответ на вопросы о высоте светлого кольца и характере изменения статистических характеристик поверхности графита в области лазерного воздействия получен в данной работе с помощью впервые предложенного и реализованного метода восстановления профиля поверхности по ее двумерному изображению с помощью лазерного монитора.

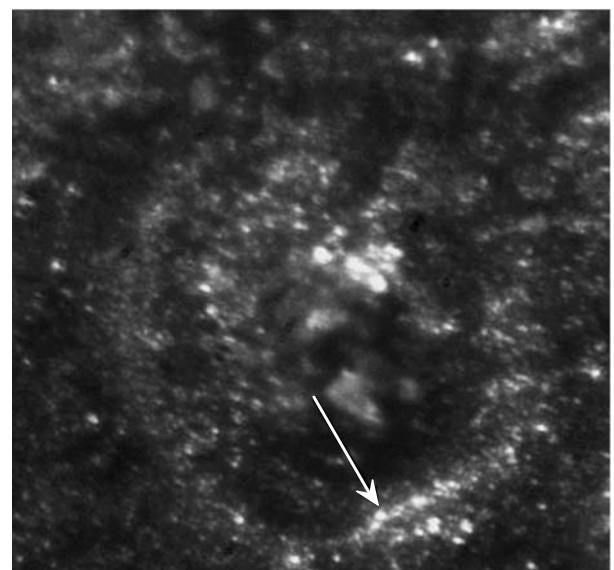


Рис.3. Поверхность графита после воздействия лазерного излучения мощностью 46 Вт.

3. Метод восстановления профиля поверхности графита, эволюционирующей под действием лазерного излучения

Известные в настоящее время методы восстановления трехмерного рельефа поверхности по ее двумерным изображениям (см., напр., [28]) основываются на компьютерном синтезе искомого рельефа из нескольких изображений поверхности, равномерно освещаемой удаленным локальным (точечным) источником света.

Лазерные мониторы (проекторные микроскопы) в принципе позволяют восстановить рельеф наблюдаемой с их помощью поверхности по одному двумерному изображению. При этом для количественного (точного) восстановления рельефа необходимо знание усредненных по времени пространственно-угловых характеристик лазерного излучения, углового распределения интенсивности отраженного от исследуемой поверхности света (далее – индикатриса отражения) и пространственно-углового распределения коэффициента усиления в активной среде лазера. Однако качественное восстановление рельефа поверхности при условии независимости индикатрисы отражения от угла падения лазерного излучения на поверхность может быть осуществлено на основе очевидной зависимости яркости точки изображения поверхности от угла наклона α микроплощадки, на которой эта точка расположена. В данном случае под углом наклона подразумевается угол между нормальными к поверхности и микроплощадке. В дальнейшем этот метод для определенности называется методом углов наклона микроплощадок, или методом наклонов. В наиболее простом случае, когда лазерное излучение падает на наблюдаемую поверхность нормально (угол падения $\beta \approx 0$), основные допущения, используемые в этом методе, формулируются следующим образом:

- отражательные свойства (индикатриса отражения) поверхности постоянны по всей области наблюдения;
- источник излучения и приемник расположены на одной оси;
- яркость в отдельных точках изображения, соответствующая определенной микроплощадке на наблюдаемой поверхности, является функцией угла наклона этой микроплощадки; считаем, что характерный размер площадки много больше длины волны излучения.

К сожалению, авторам данной работы не известны результаты измерений индикатрисы отражения графитовых образцов. Поэтому нами были проведены измерения индикатрисы отражения в соответствии с методикой, описанной в [29]. Эти данные приведены на рис.4. Видно, что вплоть до угла падения 50° изменением индикатрисы можно пренебречь. Угловая ширина индикатрисы $\Delta\alpha_{\text{ref}}$ по уровню половины от максимального значения

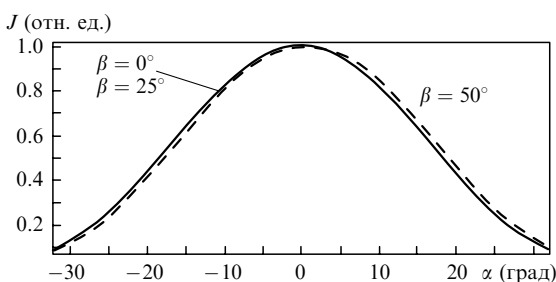


Рис.4. Зависимости интенсивности рассеянного света от угла наблюдения при различных углах β падения излучения ($\lambda = 510.6$ нм).

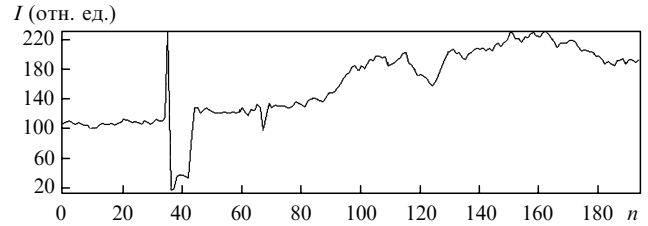


Рис.5. Зависимость яркости изображения одномерной поверхности от порядкового номера n точек наблюдения.

интенсивности составляет порядка 30° . Угол схождения лазерного излучения $\Delta\alpha_{\text{las}}$, определяемый как угол в вершине конуса, образованного сфокусированным лазерным излучением, в наших экспериментах составлял около 4° . Сопоставление значений $\Delta\alpha_{\text{ref}}$ и $\Delta\alpha_{\text{las}}$ показывает, что применительно к графиту можно воспользоваться условием $\beta = 0$.

Рассмотрим метод восстановления профиля поверхности на примере изображения, которое характеризуется определенным распределением яркости $I(x)$ по длине (одномерный случай). На рис.5 это распределение представлено в виде зависимости $I(n)$, где n – порядковый номер точек наблюдения, равноудаленных друг от друга. Точка изображения с порядковым номером 36 и максимальной яркостью $I = I_{\text{max}}$ определяется как точка, принадлежащая микроплощадке, для которой угол наклона $\alpha = 0$. Кроме того, предполагается, что положение этой микроплощадки соответствует положению верхней точки рельефа. Такое предположение однозначно определяет знак угла наклона α для $n < 36$ и $n > 36$.

При расчетах использовались экспериментальные значения индикатрисы отражения (см. рис.4). С целью качественной оценки влияния формы индикатрисы отражения на характеристики рельефа и для упрощения расчетов в данной работе также были использованы модельные зависимости угла наклона микроплощадки от яркости I в точке наблюдения, соответствующей этой микроплощадке, которые аппроксимируют реальную индикатрису отражения.

На рис.6 приведен рельеф, восстановленный из распределения яркости (рис.5), для зависимости угла α от яркости I , определяемой соотношением

$$\alpha = c^{-1} \arctan \frac{I_{\text{max}} - I}{I_{\text{max}}},$$

где I_{max} – максимальная яркость изображения; c – константа аппроксимации. Было установлено, что высота выступов и глубина впадин восстановленных профилей поверхности зависят от вида модельной зависимости $\alpha = f(I)$. Однако качественно (по расположению выступов и впадин) профили хорошо согласуются друг с другом.

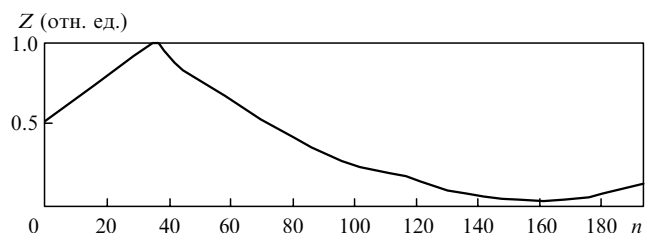


Рис.6. Восстановленный рельеф одномерной поверхности (Z – высота рельефа относительно минимального уровня, принимаемого за нулевой).

Очевидно, что для разных индикатрис отражения (для разных модельных зависимостей угла α от яркости I) профили поверхности, восстановленные по одному и тому же изображению, количественно будут различаться. Однако качественно (в смысле чередования выступов и впадин, образующих рельеф) эти профили будут соответствовать друг другу.

В рассмотренном одномерном случае углы наклона соседних микроплощадок определяются только их ориентацией относительно микроплощадки с углом $\alpha = 0$, соответствующей точке (в рассмотренном случае это точка 3б) изображения с максимальной яркостью. В двумерном случае ориентация поверхности рассчитывается по изменению яркости относительно соседних точек изображения. Для расчета угла наклона поверхности необходимо учесть ориентацию микроплощадки по всем радиальным направлениям, проходящим через ее центр. В данном алгоритме мы ограничимся направлениями на центры восьми соседних ячеек. Размер каждой ячейки 16×16 пикселей. Недостатком такого разбиения является появление на границах ячеек изображения разрывов, приводящих к неопределенности в ориентации микроплощадок в отдельных ячейках относительно друг друга. Для устранения такой неопределенности использовался следующий подход. Во-первых, восстановление рельефа поверхности начиналось из середины одной из центральных ячеек изображения. Во-вторых, восстановление рельефа поверхности продолжалось в ячейках, имеющих общие границы с исходной, начиная с граничных точек. Это позволило исключить возможность возникновения разрывов. Далее процедура повторялась для ячеек, примыкающих к восстановленной области. Корректное построение рельефа требует предварительного анализа изображения с целью определения точек с максимальной (минимальной) высотой.

Методика восстановления рельефа поверхности по результатам измерения яркости оптического изображения, полученного при помощи лазерного монитора, проверялась на тестовых двумерных изображениях трехмерных объектов с известными свойствами. Восстановленные рельефы качественно хорошо согласуются с исходными объектами.

Оценка эволюции статистических характеристик рельефа поверхности графита под действием лазерного излучения осуществлялась с использованием статистики Херста [30] для области изображения вблизи центра лазерного пучка, при этом светлое кольцо (см. рис.2) оказывается за пределами выбранной области. Следует отметить, что статистика Херста [30] достаточно широко используется при оценке сложных горных рельефов и шероховатостей поверхностей [31]. Показатель Херста рассчитывался по соотношению

$$\frac{R(\Delta r)}{S(\Delta r)} \approx \Delta r^H, \quad (1)$$

где $R(\Delta r)$ – размах, т. е. разность между максимальной и минимальной высотами рельефа на расстоянии Δr от центра лазерного пучка по всем радиальным направлениям; $S(\Delta r)$ – стандартное отклонение высот; $\Delta r = r/r_0$; r – расстояние от центра лазерного пучка; r_0 – размер одного пикселя.

Отношение (1) определяет характерный масштаб шероховатости поверхности. Значение показателя Херста позволяет найти коэффициент корреляции из следующей формулы [30]:

$$C(\Delta r) = 2^{2H-1} - 1, \quad (2)$$

где H зависит от Δr в соответствии с (1), а $C(\Delta r)$ аналогично коэффициенту корреляции двумерного случайного изотропного распределения высот [32].

Согласно формуле (2), при $H = 0.5$ корреляция отсутствует, что соответствует гауссову распределению высот. Однако при $H \neq 0.5$ мы получаем $C(\Delta r) \neq 0$.

4. Результаты восстановления профиля поверхности графита, эволюционирующей под действием лазерного излучения

На рис.7 представлены восстановленные по приведенной выше методике трехмерные рельефы поверхности графита, соответствующие двумерным изображениям, приведенным на рис.2. Видно, что вначале поверхности

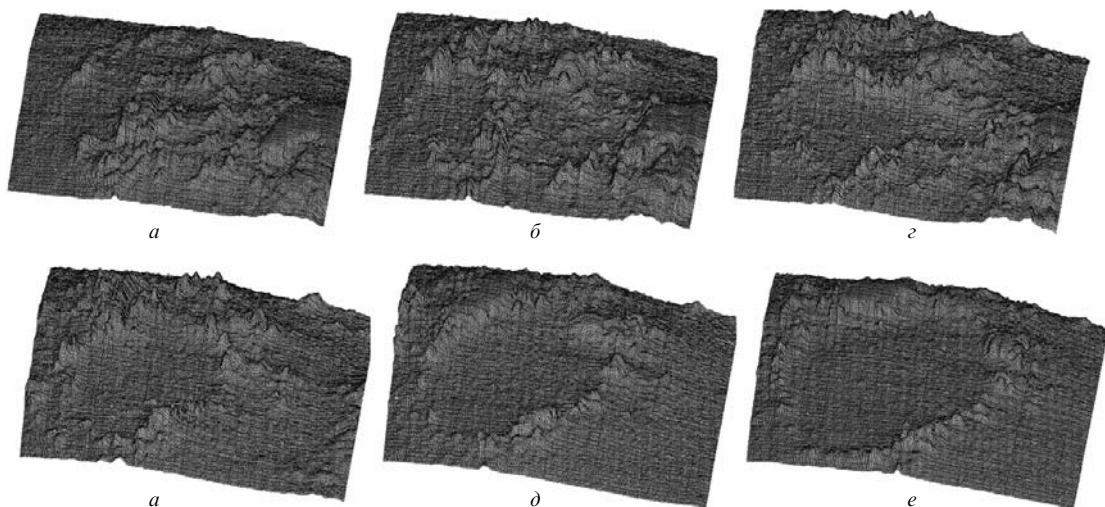


Рис.7. Восстановленные изображения поверхностей графита, эволюционирующих под действием лазерного излучения в различные моменты времени t относительно начала воздействия: a – до взаимодействия, $t = 0$; b – начало взаимодействия, $t = 0.24$ с; c – расширение области модификации поверхности, $t = 0.36$ с; d – формирование яркой кольцевой зоны, $t = 0.44$ с; e – расширение кольцевой зоны, $t = 0.56$ с; e – стабилизация размеров кольцевой зоны, $t = 0.76$ с. Мощность лазерного излучения 46 Вт, поперечный размер области наблюдения около 0.3 мм.

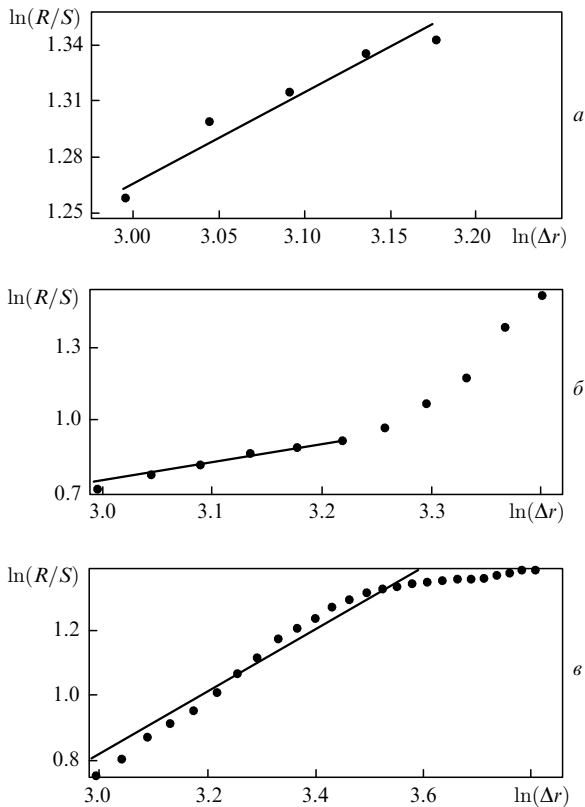


Рис.8. Зависимости $\ln(R/S)$ от $\ln(\Delta r)$ для изображений представленных на рис.7,б (а), рис.7,г (б) и рис.7,е (в).

имеют сложный хаотический рельеф, однако, начиная с момента времени $t = 0.44$ с, на месте светлого кольца (см. рис.2,з–е) отчетливо наблюдается кольцеобразная выпуклость. Высота этой выпуклости меняется во времени примерно от 3 мкм (рис.2,б – образование светлого кольца) до 10 мкм (рис.2,е – стабилизация положения светлого кольца) В течение остального времени, вплоть до окончания воздействия лазерного излучения, высота выпуклости не меняется.

На рис.8 приведены зависимости отношения R/S от Δr в двойном логарифмическом масштабе для рис.7,б, г, е. Прямой линией показана аппроксимирующая зависимость, соответствующая статистике Херста. Показатель Херста определяется как тангенс угла наклона прямой. Значения показателя Херста и коэффициента корреляции для рис.7,б, г, е представлены в табл.1.

Табл.1.

Номер рисунка	H	$C(\Delta r)$
7,б	0.53	0.042
7,г	0.68	0.283
7,е	0.96	0.892

По результатам расчета показателя Херста и коэффициента корреляции (см. табл.1) можно сделать следующие выводы.

1. В начальный момент времени рельеф поверхности практически соответствует случайному гауссовому распределению высот с коэффициентом корреляции 0.042. В процессе лазерного воздействия на поверхность графита неоднородности рельефа поверхности становятся более крупномасштабными. На это указывает увеличение по-

казателя Херста [31] от 0.53 в начале лазерного воздействия до 0.96 через 0.52 с.

2. Коэффициент корреляции высот рельефа вблизи центра области лазерного воздействия (в точках, удаленных на расстояние $r < 100$ мкм) значительно увеличивается за тот же промежуток времени, т. е. лазерное воздействие упорядочивает состояние поверхности, т. к. появляется статистическая связь в распределении высот рельефа.

3. Смена наклона зависимости R/S на рис.8,в происходит при значении r , достаточно хорошо соответствующем размеру области лазерного воздействия.

5. Заключение

В данной работе впервые с помощью лазерного монитора осуществлено наблюдение поверхности графита непосредственно во время воздействия на нее лазерного излучения. Зафиксировано существование светлого кольца, перемещающегося по нагреваемой лазерным излучением поверхности графита. Предложен и реализован метод восстановления рельефа поверхности по видеоизображению, получаемому с помощью лазерного монитора. Установлено, что в пределах светлого кольца возникает кольцеобразная выпуклость, механизм образования которой требует дальнейших исследований. Однако, основываясь на высказанной в работах [33, 34] гипотезе теплового взрыва, инициируемого выделением энергии при твердофазном переходе графит – карбин, можно предположить (в качестве рабочей гипотезы), что образование кольцеобразной выпуклости обусловлено расширением углерода вследствие его нагрева за счет энергии, выделяющейся при данном переходе.

Еще один возможный механизм образования кольцеобразной выпуклости может быть обусловлен конкуренцией двух процессов. С одной стороны, деформация поверхности в области лазерного воздействия происходит из-за насыщения поверхностного слоя дефектами и(или) вследствие диффузии атомов окружающих газов. С другой стороны, из-за сублимации поверхности графита в области лазерного воздействия образуется каверна. Эффект деформации поверхности в области лазерного воздействия и влияние на него диффузии окружающего газа исследован для кремния в работах [35, 36], однако для графита такие работы нам неизвестны.

Определенный вклад в формирование кольцевой выпуклости на поверхности графита может дать его конденсация за пределами области лазерного воздействия.

В проведенных экспериментах прямого подтверждения плавления графита не обнаружено. Возможно, одна из причин этого заключается в больших скоростях нагрева графита, заметно превышающих скорости нагрева, при которых должна иметь место значительная конверсия графита в карбин. Для проверки возможности плавления углерода при атмосферном давлении в дальнейших экспериментах предполагается существенно снизить скорость нагрева графита.

Авторы благодарят К.А.Гамыгина за помощь в проведении экспериментальных исследований.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 05-08-33410).

1. Земсков К.И., Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г. *Квантовая электроника*, 1, 14 (1974).

2. *Оптические системы с усилителями яркости* (Горький: изд-е ИПФ АН СССР, 1988).
3. Земсков К.И., Казарян М.А., Петраш Г.Г. *Труды ФИАН*, **206**, 3 (1991).
4. Земсков К.И., Казарян М.А., Матвеев В.М., Петраш Г.Г. *Труды ФИАН*, **206**, 63 (1991).
5. Кузнецова Т.И., Кузнецов Д.Ю. *Труды ФИАН*, **206**, 101 (1991).
6. Васильев Ю.П., Земсков К.И., Иванов А.В., Казарян М.А., Петраш Г.Г., Чвыков В.В. *Труды ФИАН*, **206**, 136 (1991).
7. Земсков К.И., Казарян М.А., Петраш Г.Г. *Труды ФИАН*, **212**, 168 (1991).
8. Батенин В.М., Климовский И.И., Селезнева Л.А. *ДАН СССР*, **303**, 857 (1988).
9. Абросимов Г.В., Польский М.М., Саенко В.Б. *Квантовая электроника*, **15** (4), 850 (1988).
10. Батенин В.М., Глина В.Ю., Климовский И.И., Селезнева Л.А. *ТВТ*, **29** (6), 1204 (1991).
11. Асиновский Э.И., Батенин В.М., Климовский И.И., Марковец В.В. *Докл. РАН*, **369** (5), 614 (1999).
12. Асиновский Э.И., Батенин В.М., Климовский И.И., Марковец В.В. *ТВТ*, **39** (5), 794 (2001).
13. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда* (М.: Наука, 1987).
14. Прокошев В.Г., Галкин А.Ф., Климовский И.И., Данилов С.Ю., Абрамов Д.В., Аракелян С.М. *Квантовая электроника*, **25**, 337 (1998).
15. Прокошев В.Г., Климовский И.И., Галкин А.Ф., Абрамов Д.В., Аракелян С.М. *Изв. РАН. Сер. физич.*, **61**, 1560 (1997).
16. Багаев С.Н., Кучерик А.О., Абрамов Д.В., Аракелян С.М., Климовский И.И. *Докл. РАН*, **395** (2), 183 (2004).
17. Батенин В.М., Климовский И.И., Кобылянский А.И., Селезнева Л.А., Сергиенко Г.В., Недоспасов А.В., Шелюхаев Б.П. *ТВТ*, **28**, 1093 (1990).
18. Батенин В.М., Климовский И.И., Полищук В.П., Синельщиков В.А. *Матер. Всерос. науч.-образ. Олимпиады «Плазма, XX в.»* (Петрозаводск: изд-во Петрозаводского ун-та, 1998, ч. I, с. 321–324).
19. Батенин В.М., Климовский И.И., Полищук В.П., Синельщиков В.А. В сб.: *Физика экстремальных состояний вещества-2004* (Черноголовка, Ин-т проблем химической физики РАН, 2004).
20. Батенин В.М., Климовский И.И., Полищук В.П., Синельщиков В.А. *ТВТ*, **41**, 670 (2003).
21. Климовский И.И., Калинин С.В., Селезнева Л.А., Дяков Т., Карджиев М., Маразов О. Глина В.Ю. *Сварочное производство*, **2**, 17 (1991).
22. Whittaker A.G., Kintner P.L. *Abstr. 12th Bien. Conf. Carbon* (Pittsburg, Pa., 1975, pp. 45–47).
23. Musella M., Ronchi C., Brykin M., Sheindlin M. *J. Appl. Phys.*, **84**, 2530 (1998).
24. Whittaker A.G. *Science*, **200** (4343), 763 (1978).
25. Whittaker A.G. *Nature*, **276** (5689), 695 (1978).
26. Касагочкин В.И., Казаков М.Е., Савранский В.В., Набатников А.П., Радимов Н.П. *ДАН СССР*, **205** (5), 1104 (1971).
27. Климовский И.И., Марковец В.В. *Тезисы докл. Всерос. симп. «Современные проблемы неравновесной термодинамики и эволюции живых систем»* (М.: МАКС Пресс, 2004, с. 17).
28. *Principles of 3D Image Analysis and Synthesis*. Ed. by V.Girod, G.Greiner (Niemann: Kluwer Acad. Publ., 2002).
29. Беннет Дж.М., Маттсон Л. *Шероховатость поверхности и рассеяние* (С.-Петербург: изд-е ВНИЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова», 1993).
30. Федер Е. *Фракталы* (М.: Мир, 1991).
31. Мандельброт Б. *Фрактальная геометрия природы* (Москва–Ижевск: изд-е Ин-та компьютерных исследований, 2002).
32. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. *Введение в статистическую радиофизику и оптику* (М.: Наука, 1981).
33. Асиновский Э.И., Асиновский С.Э., Бородина Т.И., Кириллин А.В., Костановский А.В., Фортвов В.Е. В сб.: *Научные труды Института теплофизики экстремальных состояний ОИВТ РАН*. Под ред. В.Е.Фортвова и А.П.Лихачева (М.: изд-е ОИВТ РАН, 2001, вып. 3-2000, с. 55–70).
34. Асиновский Э.И., Асиновский С.Э., Бородина Т.И., Кириллин А.В., Костановский А.В. *Препринт ОИВТ РАН* № 1–449 (М., 2000).
35. Банишев А.Ф., Голубев В.С., Кремнев А.Ю. *Квантовая электроника*, **25**, 941 (1998).
36. Банишев А.Ф., Голубев В.С., Кремнев А.Ю. *Изв. РАН. Сер. физич.*, **63**, 1964 (1999).