

ФОРМИРОВАНИЕ ВЫПУКЛЫХ МИКРОСТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ОБЛУЧЕНИИ

© 2007 г. А. Ю. Малышев, канд. физ.-мат. наук; Н. А. Агарева; О. А. Мальшакова;
Н. М. Битюрин, канд. физ.-мат. наук

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

E-mail: malex@ufr.app.sci-nnov.ru

Экспериментально исследовано формирование выпуклых структур на поверхности окрашенных образцов полиметилметакрилата (ПММА) при облучении их излучением второй гармоники неодимового лазера. Исследованы зависимости высоты и диаметра создаваемых выпуклых микроструктур от плотности энергии лазерного импульса. Определен порог формирования структур для различных образцов и найдены оптимальные режимы структурирования. Продемонстрирована возможность получения матриц выпуклых структур (микролинз) и структур в виде выпуклых валиков.

Коды OCIS: 350.3390, 160.5470, 230.3990, 350.3950, 120.0120, 180.3170.

Поступила в редакцию 08.09.2006.

Введение

В последнее время полимерная оптика находит широкое распространение в промышленности [1]. Сейчас бурно развивается микрооптика, интегральная и волоконная оптика, сенсорика, системы обработки изображений, где требуются рельефные выпуклые микроструктуры на поверхности оптических материалов. Обычно круглые выпуклые структуры в оптике используются в качестве микролинз. Растры микролинз и отдельные микролинзы со сферическими и асферическими поверхностями применяются как преобразователи оптических пучков, литографические маски в проекционных системах фотолитографии, оптические элементы дисплеев и сенсоров и др.

Применение лазерных микротехнологий является эффективным методом создания выпуклых микроструктур на поверхности материалов. Существует несколько промышленных методов получения выпуклых микроструктур. Одним из методов создания растров выпуклых микролинз на полимерных материалах является штампование фотополимеров с применением металлических и кремниевых штампов матриц с последующим фотоотверждением [2].

Другой метод создания растров микролинз основан на процессе контролируемого нагрева и плавления матрицы фотополимерных цилиндрических столбиков на круглых пленочных пьедесталах, полученных фотолитографией. Формирование микролинз со сферическими поверхностями происходит из расплава материала под действием сил поверхностного натяжения [3, 4]. После остывания материала на последней стадии полученные структуры

подвергаются УФ облучению для дополнительного сшивания макромолекул.

В работе [4] обсуждается метод получения матриц выпуклых структур на поверхности кварцевого стекла, основанный на ионном травлении поверхности, на которую предварительно нанесены выпуклые структуры из фоторезиста. В работе [5] рассмотрена технология изготовления микролинзовых растров на поверхности фоточувствительных стекол, включающая в себя фотолитографию, УФ облучение, термообработку и ионообменную диффузию.

Для получения выпуклых микроструктур из диэлектрических материалов используется метод формирования профиля выпуклой структуры путем лазерного испарения и переноса материала на подложку. На поверхности полимеров выпуклые микролинзы изготавливают также путем контролируемой лазерной абляции материала [6], проводя послойное удаление материала перемещающимся лазерным пучком и формируя профиль микролинзы.

В литературе рассматриваются также способы формирования выпуклых микроструктур при лазерном облучении, основанные на двух эффектах. Один из способов основан на эффекте формирования выпуклых структур путем перераспределения расплавленного полимера силами поверхностного натяжения при локальном лазерном нагреве поверхности материала ("bumping"). С помощью такого эффекта формируются выпуклые структуры на различных материалах, в том числе стеклах и полимерах. Второй способ основан на эффекте свеллинга (разбухания) материала при облучении его лазерным излучением за счет изменения объема облученного материала. Сейчас в литературе обсуждаются

различные возможные механизмы лазерного свеллинга: изменение свободного объема полимера [7, 8], переход полимера из кристаллического состояния в аморфное [9], упруго-пластическое течение материала [8], изменение объема светочувствительных компонентов среды, выделение газообразных веществ в объеме среды [10, 11] и другие.

В работе [7] показано, что облучение рентгеновским излучением областей полимерного материала полиметилметакрилата (ПММА) с последующим быстрым циклом нагрев–остывание приводит к существенному увеличению свободного объема материала в облученной области и образованию выпуклых структур. Неравновесное увеличение свободного объема полимера также возможно при локальном лазерном воздействии. На поверхности полиимида было продемонстрировано формирование выпуклых структур [9] при облучении лазерными импульсами с мощностью ниже порога испарения. Увеличение объема облученной области полиимида связано с переходом частично кристаллического состояния полимера в аморфное состояние.

В работе [10] процесс свеллинга полимерного материала использовался для создания матрицы микролинз на поверхности ПММА, допированного веществами, выделяющими газообразные продукты реакции при облучении импульсами лазера. После воздействия лазерного импульса на такой материал происходит газонасыщение облученной области среды, увеличение объема этой области по сравнению с необлученной и формирование выпуклой микроструктуры. Для такого механизма формирования выпуклой структуры нами предложена оригинальная модель свеллинга [11], примененная к биологическим средам. В работе [12] и других работах, посвященных лазерной абляции ПММА, обнаружено, что выпуклые структуры также образуются на поверхности полимера при воздействии УФ импульсов, что связывается с увеличением свободного объема или с пластической деформацией материала [8]. Таким образом, два упомянутых эффекта интересны с точки зрения лазерного микроструктурирования поверхности полимерных материалов с целью одностадийного создания выпуклых структур полимерной оптики.

Цель данной работы – экспериментальное исследование формирования выпуклых структур микронных размеров на поверхности окрашенных полимерных образцов из ПММА под действием лазерного излучения, определение порога формирования выпуклых структур, установление оптимальных режимов микроструктурирования полимерных образцов и создание выпуклых структур на поверхности полимера.

1. Материалы и методика проведения экспериментов

В проведенных экспериментах использовался неодимовый лазер на алюмоиттриевом гранате (Nd^{3+} :АИГ) с модулированной добротностью и преобразованием излучения во вторую гармонику на нелинейном кристалле КТР. Селекция второй гармоники осуществлялась несколькими поворотными дихроичными зеркалами. Лазерное излучение второй гармоники с длиной волны 532 нм применялось нами для воздействия на полимерные образцы. Лазерные импульсы имели энергию до 10 мДж, длительность ≈ 15 нс. Пучок имел характерный диаметр 2,5 мм (по уровню 0,1), расходимость 0,7 мрад и гауссово распределение. Использовалась стандартная экспериментальная схема. Лазерное линейно поляризованное излучение второй гармоники проходило через полуволновую фазовую пластинку и тонкопленочный поляризатор. Поляризатор пропускает излучение с горизонтальной линейной поляризацией и отражает в ловушку излучение с вертикальной поляризацией. При вращении фазовой пластинки изменялся угол наклона плоскости линейной поляризации падающего излучения и соответственно соотношение между составляющими поляризации излучения относительно поляризатора. Вращение фазовой пластинки позволяло плавно изменять соотношение между прошедшим через поляризатор излучением и падающим. Таким методом изменялись энергия лазерных импульсов, воздействующих на образец. Ослабленный лазерный луч направлялся с помощью поворотного дихроичного зеркала на поверхность образца и фокусировался на ней линзами с различным фокусным расстоянием. Образец располагался на двухкоординатном перемещающемся столике. Энергия лазерных импульсов измерялась калиброванным фотодиодом, расположенным за поворотным зеркалом, и цифровым осциллографом. Калибровка фотодиода была проведена по измерителю энергии фирмы GENTEC-OE, Inc. (Канада).

При проведении экспериментов фокусировка лазерного излучения на поверхность образца проводилась линзами с фокусными расстояниями $f_1 = 50$ см и $f_2 = 2,5$ см. Характерный диаметр сфокусированного пучка (по уровню 0,1 от максимума) составлял $D_1 \sim 400$ мкм и $D_2 \sim 60$ мкм соответственно, и пучок имел небольшую эллиптичность. В экспериментах образец перемещался с помощью моторизованной подвижки в плоскости фокуса линзы поперек лазерного луча со скоростью от 0,2 до 4 мм/с и облучался лазерными импульсами с частотой следования 10 Гц. При этом была возможность изменять скорость перемещения образца так, что-

бы области воздействия (пятна) сфокусированного лазерного пучка на поверхности материала могли не перекрываться или перекрываться. При большой скорости движения образца вдоль линии его перемещения в областях воздействия пучка на поверхности образца возникала последовательность круглых выпуклых структур. Каждая структура формировалась за один лазерный импульс. За время между импульсами образец смещался на расстояние от одного до нескольких диаметров лазерного пучка. При малой скорости движения образца области воздействия лазерных импульсов перекрывались, формируя выпуклую структуру в виде линии.

В экспериментах с различной энергией лазерных импульсов проводилось формирование линейных последовательностей выпуклых структур и анализировались такие параметры полученных структур, как диаметр d , высота h и форма. Проводилось сравнение размеров структур с пространственным распределением плотности энергии излучения по лазерному пучку для выявления порога эффекта лазерного свеллинга, лазерного испарения и деструкции материала образца. Важным моментом исследования было выявление оптимального режима лазерного микроструктурирования для создания качественных выпуклых структур.

После проведения выбора полимерных материалов и красителей с целью получения материалов с необходимыми свойствами для проведения исследований лазерного микроструктурирования было установлено, что наиболее подходящей полимерной матрицей для изготовления образцов, окрашенных азокрасителем метиловым красным и красителем марки “Рубин”, является ПММА. Было отобрано и изготовлено несколько образцов, поглощающих излучение на длине волны 532 нм.

Мы экспериментально исследовали три образца на основе ПММА: образец № 1 – органическое стекло пластифицированное по ГОСТ 17622-72 с жирорастворимым красителем марки “Рубин”, коэффициент поглощения образца $\alpha = 44 \text{ см}^{-1}$; образец № 2 – органическое стекло непластифицированное с жирорастворимым красителем марки “Рубин”, $\alpha = 60 \text{ см}^{-1}$; образец № 3 – изготовленный нами образец с красителем метиловым красным (концентрация 0,03 моль/л) и пластификатором диоктилфталатом (10 мас.%), $\alpha = 48 \text{ см}^{-1}$. Образцы № 3 получены методом полива из раствора компонентов (ПММА, краситель, пластификатор) в хлороформе. Образцы имели толщину 0,3–1 мм. Средняя шероховатость поверхности контролировалась с помощью атомно-силового микроскопа и составляла несколько нанометров.

Коэффициент поглощения полимерных образцов измерялся следующим методом. Материал образца

растворяли в хлороформе, наносили на стеклянную подложку и готовили методом полива пленку в течение трех суток. Полученную пленку отделяли от подложки и вырезали квадратный ($1 \times 1 \text{ см}$) пленочный образец с одинаковой толщиной. Толщина пленки измерялась микрометром и составляла для разных образцов от 100 до 200 мкм. Затем измеряли пропускание образца на воздействующей длине волны излучения 532 нм с помощью спектрофотометра. По известному значению пропускания пленочного образца и измеренной толщине пленки вычисляли коэффициент поглощения исследуемых образцов.

Полученные выпуклые микроструктуры на поверхности среды изучались с помощью микроскопов (“Биомед”, “Neophot”) и интерференционного профилометра “Zygo”. Мы проводили цифровое микрофотографирование выпуклых микроструктур с подсветкой структур проходящим светом и получали микрофотографии, а также изучали микроструктуры с помощью профилометра, который позволял измерять высоту и профиль структур с разрешением по горизонтали до 0,2 мкм и вертикали до 1 нм.

2. Результаты и их обсуждение

Проведены эксперименты по структурированию образца № 1 лазерным пучком, фокусируемым линзой $f_1 = 50 \text{ см}$. В экспериментах использовалась вышеописанная методика. В первую очередь мы теоретически оценили интервал энергий лазерных импульсов, в котором нужно ожидать исследуемые эффекты, используя модель [8]. Оцененный интервал энергий был взят за основу для проведения экспериментов. В экспериментах был определен интервал энергий лазерных импульсов от 2,5 до 3,6 мДж, когда на поверхности образца возникают выпуклые структуры. Мы получали выпуклые структуры, которые располагались на прямой линии длиной несколько сантиметров. Линия содержала до сотни структур, полученных примерно при одинаковой энергии лазерных импульсов. Среднеквадратичный разброс энергии этих импульсов был около 5%. Записывалось несколько линий из выпуклых структур, которые располагались на расстоянии нескольких характерных диаметров лазерного пучка. Средняя энергия лазерных импульсов для каждой линии находилась в найденном интервале и увеличивалась от линии к линии. Параметры структур вычислялись усреднением соответствующих величин по нескольким десяткам структур в одной линии. Были получены микроструктуры с диаметром от 70 до 200 мкм и высотой от 20 нм до 2 мкм. Микроструктуры имели куполообразную форму. Приме-

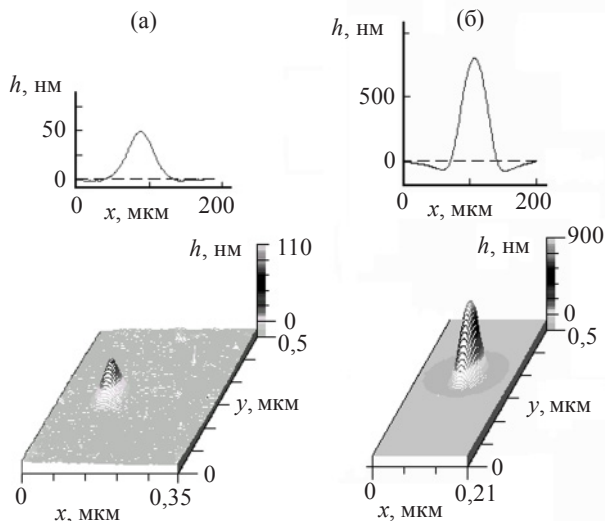


Рис. 1. Профили выпуклых микроструктур на образце № 1. а – структура вблизи порога ее появления, б – структура, полученная в оптимальном режиме.

ры микроструктур приведены на рис. 1, где показан трехмерный профиль и сечение выпуклых структур. Структура на рис. 1а получена вблизи порога лазерного свеллинга при плотности энергии в импульсе $F = 4,3 \text{ Дж/см}^2$ и имеет высоту $h = 0,05 \text{ мкм}$ и диаметр $d = 80 \text{ мкм}$. Структура на рис. 1б получена в оптимальном режиме структурирования при плотности энергии $F = 4,7 \text{ Дж/см}^2$ и имеет высоту $h = 0,8 \text{ мкм}$ и диаметр $d = 90 \text{ мкм}$. На рис. 1б видно, что при формировании выпуклой структуры вокруг нее возникает кольцевая ямка, лежащая ниже исходной поверхности образца, глубина которой в несколько раз меньше высоты выпуклой структуры. Этот экспериментальный факт ставит вопрос о том, какой из исследуемых эффектов (свеллинг или перераспределение расплава полимера) вносит основной вклад в формирование структуры. Ответ на него может дать результат вычисления изменения объема материала в области, где возникает выпуклая структура. Мы провели такие вычисления путем интегрирования по профилю структуры в цилиндрических координатах. Установлено, что выпуклые структуры формируются за счет лазерного свеллинга вблизи порога их возникновения, так как объем материала в области структуры увеличивается и примерно соответствует объему выпуклой структуры. В случае же увеличения энергии лазерных импульсов начинает играть существенную роль в формировании выпуклой структуры эффект перераспределения расплавленного полимера силами поверхностного натяжения. Структура на рис. 1б сформирована за счет этих двух эффектов. Вклады эффектов здесь сравнимы. Это означает, что эти два

эффекта, ответственные за появление выпуклых структур на поверхности полимера, одновременно могут вносить вклад в их формирование. При дальнейшем увеличении энергии лазерного импульса за формирование выпуклых структур отвечает эффект перераспределения расплава полимера.

В результате проведения экспериментов были получены зависимости высоты и диаметра выпуклой структуры от энергии воздействующих лазерных импульсов. Они были пересчитаны в зависимости высоты и диаметра выпуклой структуры от плотности энергии лазерного импульса в центре пучка с учетом гауссова распределения энергии в пучке. На рис. 2 приведена экспериментальная зависимость высоты выпуклой структуры от плотности энергии лазерного импульса с указанием экспериментальной погрешности. Анализ этой зависимости позволил определить пороговую плотность энергии лазерного импульса (порог) F_{th} формирования выпуклой структуры, которая является одновременно пороговой для эффекта лазерного свеллинга. Установлено, что для образца № 1 $F_{th} = 4,2 \text{ Дж/см}^2$. Теоретическая зависимость на рис. 2 получена по ранее предложенной нами модели лазерного свеллинга [8]. Эта модель основана на упруго-пластическом деформировании материала под действием механических напряжений в возникающей термоупругой волне при поглощении лазерного импульса. Из рис. 2 видно, что теоретическая кривая удовлетворительно согласуется с экспериментом в тех точках, где существенный вклад в формирование структуры вносит эффект лазерного свеллинга, т. е. вблизи порога появления выпуклой структуры. Другую часть экспериментальной зависимости эта модель не описывает, так как там основную роль в формировании структуры играет эффект перераспределения расплава материала.

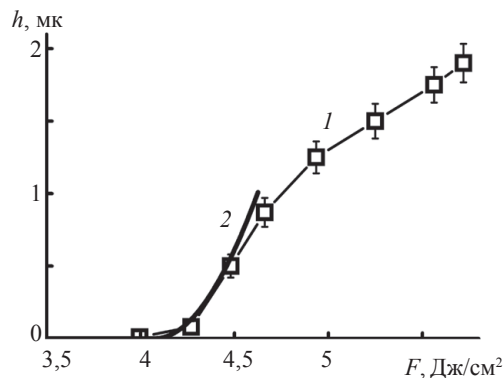


Рис. 2. Зависимости высоты h выпуклой структуры от плотности энергии F в центре лазерного пучка для образца № 1. 1 – экспериментальная зависимость, 2 – теоретическая зависимость.

Были проведены также эксперименты с увеличением энергии в импульсе выше границы найденного нами интервала формирования выпуклых структур. Из анализа экспериментальных данных получено, что порог начала испарения материала составляет $\approx 5,6$ Дж/см². Структура, сформированная лазерным импульсом при превышении этого порога, принимала вид выпуклого кольца, в центре которого находился кратер. На периферии структуры также возникал кольцевой провал, что указывает на формирование структуры за счет эффекта перераспределения расплава полимера. При увеличении плотности энергии в центре лазерного пучка превышает порог испарения материала, а на периферии пучка плотность энергии меньше этого порога, но выше порога свеллинга материала. В центральной части микроструктуры образовывался кратер вследствие испарения материала.

Зависимость диаметра выпуклой микроструктуры d от плотности энергии лазерного импульса в центре пучка F показана на рис. 3. Диаметр полученных выпуклых структур сравним с диаметром пучка, который составлял ≈ 240 мкм по уровню 0,5. Был проведен простейший анализ этой зависимости в предположении, что диаметр структуры соответствует размеру гауссова пучка на уровне пороговой плотности энергии возникновения выпуклой микроструктуры, определенной нами. При этом рассматривался лазерный импульс с энергией, соответствующей формированию этой структуры. Полученное аналитическое выражение имеет вид

$$d = D_1 \sqrt{\ln(F/F_{th})/2}.$$

Соответствующая этому выражению кривая показана на рис. 3 пунктирной линией. Из рис. 3 следует, что полученная теоретическая зависимость близка к экспериментальной зависимости. Различие же зависимостей связано с тем, что в анализе не учитывается эффект перераспределения расплава материала. Для улучшения согласования теоретических оценок с экспериментом необходимо учитывать вклад этого эффекта.

Аналогичным образом были проведены эксперименты по структурированию образцов № 2 и № 3 лазерным пучком, фокусируемым линзой $f_1 = 50$ см. Для образцов № 2 и № 3 также были найдены интервалы энергий лазерных импульсов, при которых возникают выпуклые структуры за счет двух исследуемых эффектов. Для образца № 2 этот интервал 2–3,4 мДж, а для образца № 3 – 2,5–4 мДж. Диаметр получаемых выпуклых микроструктур изменялся от 70 до 250 мкм. Высота изменялась для образца № 2 от 20 нм до 1,8 мкм, а для образца № 3 от 0,1 мкм до 2 мкм. Микроструктуры имели куполообразную форму, также измеренную на профилемере. Определена пороговая плотность энер-

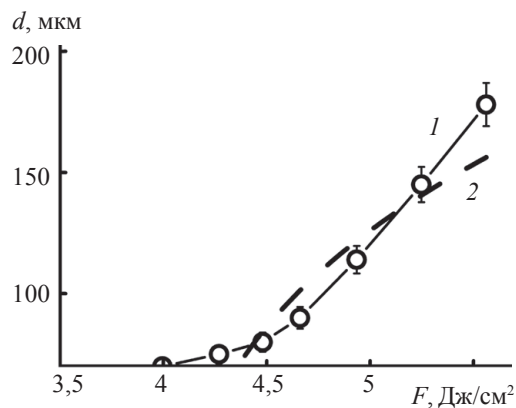


Рис. 3. Зависимости диаметра d выпуклой структуры от плотности энергии в центре лазерного пучка F для образца № 1. 1 – экспериментальная зависимость, 2 – теоретическая оценка.

гии лазерного импульса для возникновения выпуклых структур, также соответствующая порогу эффекта лазерного свеллинга. Для образца № 2 этот порог $F_{th} = 3,2$ Дж/см², а для образца № 3 – $F_{th} = 4$ Дж/см². Сопоставляя пороги эффекта лазерного свеллинга для трех исследованных образцов с коэффициентами поглощения этих образцов, мы видим, что зависимость порога лазерного свеллинга от коэффициента поглощения среды близка к обратнo пропорциональной. В работе [8] такая зависимость была получена нами аналитически.

Установлено также, что порог начала испарения материала составляет $\approx 4,3$ Дж/см² для образца № 2 и $\approx 6,5$ Дж/см² для образца № 3. При небольшом превышении этого порога для образца № 2 в центральной части микроструктуры возникал кратер, обусловленный испарением материала с поверхности среды. При превышении порога испарения образца № 3 происходило термическое разложение красителя, входящего в состав образца, и испарение материала образца с образованием кратера в центральной части микроструктуры.

После проведенного исследования параметров выпуклых структур для трех образцов на профилемере “Zygo” и анализа экспериментальных данных о порогах возникновения выпуклых структур и порогах начала испарения материала нами найден интервал оптимальной плотности энергии лазерного импульса, необходимой для формирования качественных выпуклых структур. При этом оптимальная плотность энергии в центре пучка должна на 10–20% превышать пороговую плотность энергии возникновения выпуклой структуры F_{th} , но должна быть меньше порога испарения или деструкции материала, превышающего порог свеллинга на 30–50%. В случае образца № 1 оптимальные значения $F = 4,3–5,2$ Дж/см².

Мы провели эксперименты по созданию рельефных выпуклых структур, которые подтверждают возможности метода лазерного микроstructuring на окрашенных полимерных образцах. Формирование структур проведено нами на образце № 1 в оптимальном режиме обработки ($F \sim 5 \text{ Дж/см}^2$) и при скорости движения образца 2 мм/с за счет обсужденных выше двух эффектов. Получена матрица выпуклых микроструктур (микролинз), центры которых располагаются на расстоянии 200–250 мкм друг от друга. Профиль структур имеет гладкую форму, которая может быть описана квадратичной функцией. На рис. 4 показана микрофотография матрицы микролинз и ее профиль, определенный на профилометре “Zygo”. Микроструктуры имеют диаметр 130 мкм и высоту 1,4 мкм. На образце № 2 также были созданы матрицы выпуклых микроструктур (микролинз) с подобными параметрами.

Для получения меньшего поперечного размера структур проведены эксперименты с фокусировкой лазерного излучения короткофокусной линзой $f_2 = 2,5 \text{ см}$ с энергией в импульсе 0,35 мДж. Скорость перемещения образца (0,5 мм/с) выбиралась меньше, чем при фокусировке длиннофокусной линзой, чтобы получаемые выпуклые микроструктуры

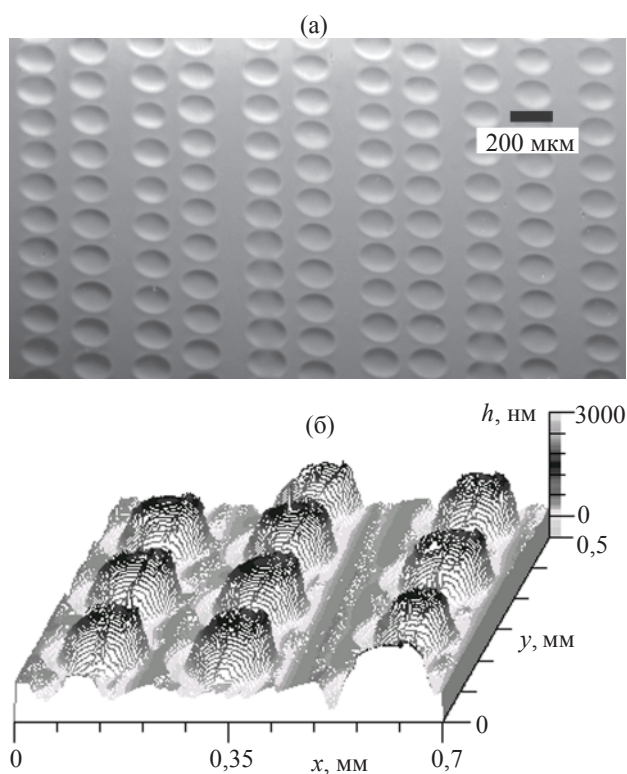


Рис. 4. Матрица выпуклых структур (микролинз), полученных на образце № 1. а – микрофотография, б – профиль выпуклых структур, определенный на профилометре.

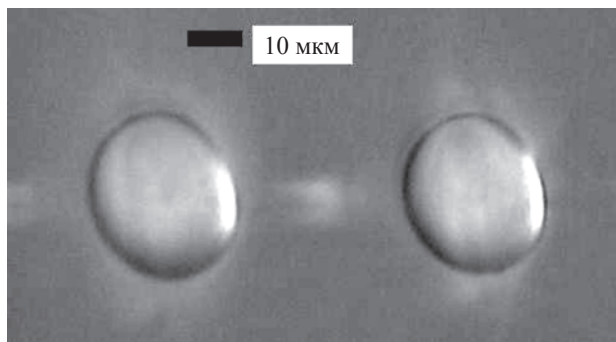


Рис. 5. Микрофотография выпуклых структур (микролинз), полученных на образце № 1.

располагались примерно на расстоянии размера лазерного пучка друг от друга. На рис. 5 показана микрофотография выпуклых микроструктур диаметром 20 мкм и высотой $\sim 1 \text{ мкм}$.

В экспериментах также было проведено формирование протяженных выпуклых структур на образце № 2 с фокусировкой лазерного излучения линзой $f_1 = 50 \text{ см}$ с энергией в импульсе 2,6 мДж при движении образца со скоростью 0,4 мм/с. При этом на поверхность среды в области фокусировки излучения воздействовало в среднем около пяти лазерных импульсов. Получена протяженная микроструктура в виде выпуклого валика с поперечным размером 220 мкм, высотой $\sim 1 \text{ мкм}$ и длиной несколько миллиметров. С двух сторон рядом с валиком возникали протяженные провалы. Их появление связано с перетеканием расплавленного материала при формировании выпуклого валика, что подтверждается нашими вычислениями сохранения массы материала без существенного увеличения его объема.

Заключение

Экспериментально исследовано лазерное микроstructuring поверхности нескольких окрашенных полимерных образцов на основе полиметилметакрилата. Показано, что за процесс микроstructuring одновременно отвечают два эффекта: лазерного свеллинга и перераспределения расплава силами поверхностного натяжения (“bumping”). Получены выпуклые микроструктуры высотой $h = 0,05\text{--}2 \text{ мкм}$ и диаметром $d = 20\text{--}200 \text{ мкм}$. Определена пороговая плотность энергии возникновения выпуклой структуры на поверхности среды $F_{th} \approx 3\text{--}4 \text{ Дж/см}^2$. Установлено, что порог возникновения выпуклой структуры соответствует порогу эффекта лазерного свеллинга. Из анализа экспериментальных данных определено, что оптимальная плотность энергии в центре пучка, необходимая для

получения качественных выпуклых структур, составляет от $(1-1,2)F_{th}$.

Таким образом, показано, что методика формирования выпуклых структур путем последовательного воздействия на поверхность среды лазерными импульсами может использоваться для создания растров микролинз и выпуклых структур в виде валиков на окрашенных полимерных материалах. Это может найти применение в микрооптике, интегральной оптике, лазерной литографии, сенсорах, обработке информации.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК-4214.2004.2 и фонда РФФИ (проект № 05-02-08151-офи_а). Авторы выражают благодарность А.В. Кирсанову за помощь в проведении измерений на атомно-силовом микроскопе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сабинин В.Е., Солк С.В. Проблемы проектирования и изготовления оптики из полимерных материалов // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 1. С. 61–64.
2. Озеров И.Н., Петров В.М., Шишкина В.А., Шор В.М. Формирование рельефа матриц для получения растров со сферическими элементами // ОМП. 1981. № 1. С. 52–53.
3. Popovic Z.D., Sprague R.A., Connell G.A.N. Technique for monolithic fabrication of microlens arrays // Appl. Opt. 1988. V. 27. № 7. P. 1281–1284.
4. Nussbaum Ph., Völkel R., Herzig H.P., Eisner M., Haselbeck S. Design, fabrication and testing of micro-lens arrays for sensors and microsystems // Appl. Opt. 1997. V. 6. P. 617–636.
5. Бочарова Т.В., Каранетян Г.О. Микролинзовые растры и технология их изготовления // Оптический журнал. 2005. Т. 72. № 9. С. 91–95.
6. Naessens K., Ottevaere H., Baets R., van Daele P., Thienpont H. Direct writing of microlenses in polycarbonate with excimer laser ablation // Appl. Opt. 2003. V. 42. № 31. P. 6349–6359.
7. Kim D.S., Yang S.S., Lee S.-K., Kwon T.H., Lee S.S. Physical modeling and analysis of micro-lens formation fabricated by a modified LIGA process // J. Micromech. Microeng. 2003. V. 13. P. 523–531.
8. Малышев А.Ю., Битюрин Н.М. Модель лазерного свеллинга полимеров при воздействии наносекундных импульсов // Квант. электрон. 2005. Т. 35. С. 825–830.
9. Himmelbauer M., Arenholz E., Bäuerle D., Schilcher K. UV-laser-induced surface topology changes in polyimide // Appl. Phys. A. 1996. V. 63. P. 337–339.
10. Beinhorn F., Ihlemann J., Luther K., Troe J. Micro-lens arrays generated by UV laser irradiation of doped PMMA // Appl. Phys. A. 1999. V. 68. P. 709–713.
11. Malyshev A., Bityurin N. Laser swelling of soft biological tissue by IR pulses // Appl. Phys. A. 2004. V. 79. P. 1175–1179.
12. Masubuchi T., Furutani H., Fukumura H., Masuhara H. Laser-induced nanometer-nanosecond expansion and contraction dynamics of poly (methyl-methacrylate) film studied by time-resolved interferometry // J. Phys. Chem. B. 2001. V. 105. P. 2518–2524.