

В. К. БАЛЯ, И. Ю. ДЕНИСЮК

ПОЛУЧЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ МИКРОСТРУКТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОГО ГРАВЕРА

Рассмотрены возможности формирования с использованием лазерного гравера микронных структур и оптических микроэлементов, таких как решетки микропризм. Показаны источники физических ограничений при формировании оптической поверхности, определены предельно малые размеры структур, которые можно получить с использованием данного метода записи.

Ключевые слова: лазерная гравировка, микрооптика, решетки микропризм, абляция полимеров.

Введение. Лазерная фрезеровка — это технология, использующая лазерное излучение для абляции материалов, при этом материал либо расплавляется, возгорается, сублимируется, либо выдувается струей газа, при этом края структуры после обработки имеют качественную поверхность.

Лазерная фрезеровка (абляция) используется, например, для изготовления микромеханических элементов. Так, в работе [1] рассмотрены процессы существенного уменьшения вязкости полиметилметакрилата (ПММА) при нагревании и абляции, а также связанные с ними искажения формы получаемых элементов. Данная технология, кроме изготовления планарных элементов или элементов фиксированной высоты, пригодна и для получения 3-мерных структур заданной формы, например микролинз, посредством послойного дозированного снятия обрабатываемого полимера на заданную глубину путем абляции при воздействии лазерного излучения. Схема реализации данного процесса для создания матрицы микролинз приведена на рис. 1 в соответствии с работой [2]. В частности, в работе использовался эксимерный лазер с длиной волны 248 нм, обеспечивающий послойное снятие полимера. В результате задания многих последовательных проходов лазерного излучения возможно получение фактически любой желаемой формы 3D-элемента.

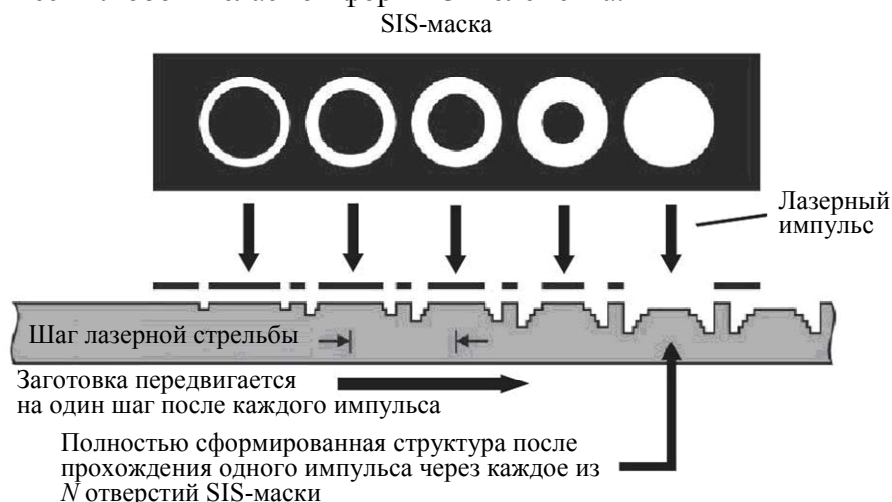


Рис. 1

Лазерный гравер в настоящее время является одним из наиболее доступных и эффективных аппаратов для получения 2- и 3-мерных микроструктур, однако возможности лазерного гравера, предназначенного для изготовления фотомасок и флексоформ для высокой печати (спецмодификация), применительно к записи микрооптических элементов практически не изучены.

Такие общепромышленные аппараты лазерной гравировки более просты, производительны и их разрешение составляет не более 2 мкм. Например, аппарат Laser Graver LG 10F15, использованный при исследованиях, описываемых в настоящей статье, обрабатывает полимер на глубину 20 мкм с разрешением 2,5 мкм при размере площади обработки 200×200 мм за 10 часов. Такая матрица достаточна для практических целей, например для изготовления штампа для эмбоссинга. Следовательно, этот аппарат позволяет изготавливать не только продукцию, предназначенную непосредственно для производства, но и лабораторные образцы структур микронных размеров для научных исследований.

Предполагается, что низкое разрешение лазерного гравера не позволяет изготавливать элементы микрооптики, поскольку создает слишком большую шероховатость поверхности. Однако с учетом особенностей конкретного лазерного гравера, а также свойств обрабатываемого материала оказалось возможным получение элементов со значительно меньшей шероховатостью поверхности.

Условия эксперимента. В ходе эксперимента использовался лазерный гравер Laser Graver LG 10F15, обеспечивающий формирование структур с разрешением до 2,5 мкм (10160 dpi). Было проведено исследование его предельных возможностей для достижения микронных разрешений, а также выполнен анализ зависимости формируемых структур от типа обрабатываемого материала и условий обработки.

Аппарат предназначен для обработки черной полимерной или металлизированной пленки методом абляции поверхностного слоя лучом Nd—YAG-непрерывного лазера с длиной волны 1,06 мкм. В данной работе эксперименты по формированию микроструктур проводились с использованием полиэфировой пленки с термочувствительным слоем на базе ПММА с наночастицами сажи, обеспечивающими поглощение лазерного излучения (Пленка термочувствительная ТУ 2379-027-00205156-96). Толщина испаряемого слоя 8 мкм.

Для создания изображения пленку фиксируют на барабане лазерного гравера. Инфракрасное лазерное излучение фокусируется на поверхности масочного слоя в круглое пятно диаметром около 2 мкм. В результате материал в области фокусировки пятна мгновенно нагревается, что приводит к его полному удалению. В процессе гравирования для создания изображения реализуется двухмерная развертка с модуляцией лазерного излучения в соответствии с компьютерным файлом изображения. Одна координата направлена вдоль окружности барабана, другая — вдоль его оси. Диаметр светового пучка лазерного излучения примерно равен его осевому смещению за один оборот барабана, что обеспечивает частичное перекрытие отдельных витков (называемых строками). Это позволяет сформировать окна с полностью снятым поверхностным слоем, так же как и заданное распределение точек изображения.

Для удаления участков пленки, подлежащих обработке, важно обеспечить разложение материала с испарением летучих продуктов деструкции, а не его сгорание или плавление, что обеспечивается выбором обрабатываемого полимера. Полная деструкция полимерного слоя с выходом летучих продуктов и отсутствием частичного подплавления соседних участков обрабатываемой поверхности происходит при воздействии лазерного импульса на близкий к ПММА акрилат с частичной поперечной шшивкой.

Использование ПММА обусловлено полной деструкцией облучаемого материала [1]. Этот процесс протекает следующим образом: при нагреве до 115 °С ПММА переходит в вязкотекучее состояние, переход в жидкость происходит при 200 °С (переход в жидкое состояние называем плавлением [3]), а при 360 °С начинается разложение, протекающее в два этапа — разрыв полимерной цепи по виниловой группе и испарение мономера [1]. При лазерной абляции ПММА быстро нагревается до температуры деструкции. При этом под быстрым нагревом понимается нагрев со скоростью, превышающей скорость перетекания обрабатываемого материала.

Экспериментальные результаты. При анализе микроструктур установлено, что основные наблюдаемые искажения формы их поверхности относительно заданной обусловлены двумя причинами:

— построчной записью структуры, в результате чего линии изображения, имеющие наклон относительно направления лазерного излучения, состоят из отдельных точек;

— эффектом нагрева материала, приводящим к увеличению скорости абляции нагретых участков при многократном проходе луча в пределах небольшой площади.

На рис. 2 приведены фотоизображения поверхности микроструктуры, полученной после абляции, характеризующие зависимость формы канавок от взаимного направления формируемой линии и лазерного излучения: *а* — формируемые линии перпендикулярны лазерному излучению, *б* — параллельны, *в* — расположены под углом 45° .

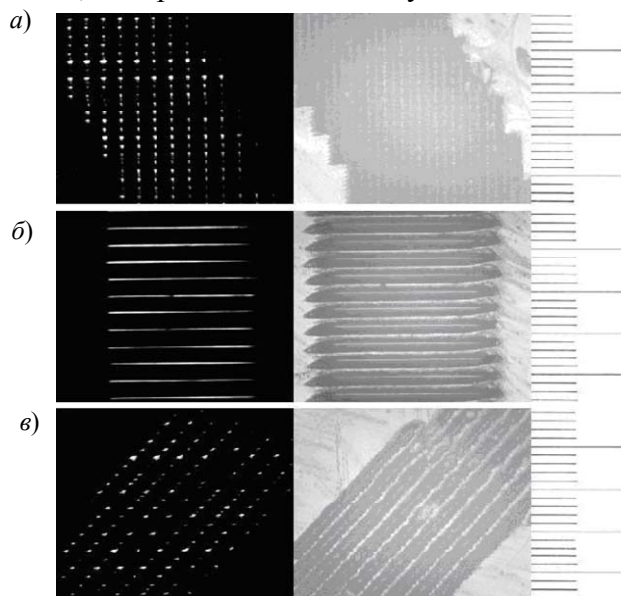


Рис. 2

Минимальная ширина формируемой линии обеспечивается при однократном проходе лазерного луча вдоль нее. При однократном проходе лазерного луча вдоль обрабатываемой линии в термопленке формируются канавки V-образной формы, на дне которых можно получить полосу шириной минимально 1,5 мкм. На рис. 3 представлены такие полосы: *а* — фотоизображение микроструктуры в проходящем свете — узкие полосы (1,5 мкм), *б* — в отраженном свете — V-образные канавки, на дне которых видны сквозные (прорезанные на всю глубину материала) полосы; на рис. 2, *в* показан микрометр. На врезке приведен рисунок сечения V-образной канавки: $l = 30$ мкм, $d = 1,5$ мкм, $h = 8$ мкм (глубина канавки равна толщине обрабатываемого слоя).

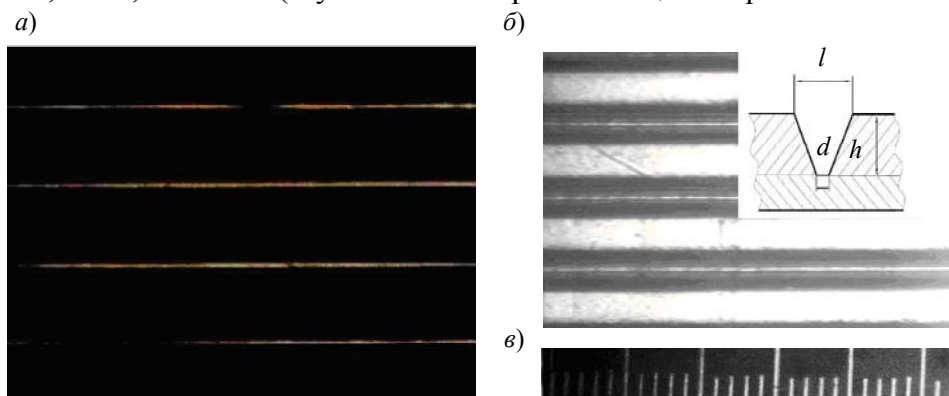


Рис. 3

Здесь необходимо отметить, что форма V-образной канавки определяется апертурой записывающего луча и положением фокуса объектива гравера относительно поверхности

обрабатываемого материала. Поэтому ровная боковая поверхность канавки формируется за счет выбора соответствующего апертурного угла фокусирующего объектива без послойного снятия материала поверхности (как это выполняется в работе [2], где использовался объектив с фиксированной апертурой $1/2$).

Полученные канавки, имеющие ровные оплавленные боковые поверхности, можно использовать как мастер-матрицу для изготовления микропризм и микрозеркал.

При продольном расположении линии относительно направления излучения лазера (см. рис. 2, б) формируется наиболее ровная боковая поверхность канавки, имеющая оптическое качество, что обеспечивает получение микропризм с точной величиной угла блеска.

При ширине структуры, превышающей 1 пкс, т.е. когда лазерный луч проходит со смещением на один шаг (в рассматриваемом случае 2,5 мкм, что соответствует 1 пкс), формируемая канавка существенно расширяется — это можно объяснить, вероятно, тем, что повторный проход лазерного луча вблизи от области абляции вызывает существенное увеличение скорости абляции и канавка скачком увеличивается до 5 мкм.

При расположении формируемой линии перпендикулярно ходу луча (см. рис. 2, а) на пленке прожигаются отдельные точки на расстоянии 2,5 мкм, при этом каждая следующая точка — после полного оборота барабана. Отмеченное выше взаимовлияние близко расположенных канавок здесь не наблюдается, но поскольку формируемая линия состоит из отдельных точек, боковая поверхность микропризмы не столь гладкая, как в первом случае, и наблюдается высокое рассеяние света при отражении.

Посредством выбора мощности излучения лазера удастся обеспечить незначительное оплавление боковых поверхностей и получить оптическую поверхность, что подтверждается наблюдаемым углом блеска микропризм.

Формируемые при абляции канавки с фиксированным углом наклона боковых поверхностей также могут быть использованы для формирования периодических решеток микрооптических элементов.

Например, на рис. 4 представлены два ортогональных фотоизображения защитного элемента (для защиты документов от копирования), записанные на одной и той же поверхности и видимые под различными углами наблюдения (последовательно — 0 , 45° , 90°).

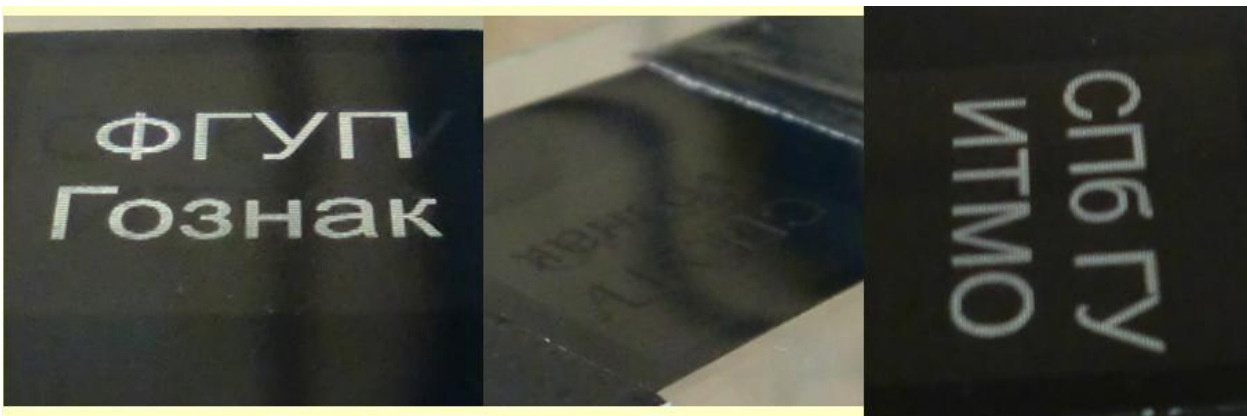


Рис. 4

Опишем принцип действия защитного элемента, представляющего собой решетки микропризм, повернутые под различными углами. Микропризмы, сформированные на поверхности материала методом абляции, объединены в группы. В каждой группе микропризмы имеют один и тот же угол блеска и одинаковое направление, соответствующее повороту на 0 , 45° , 90° . Следовательно, поворачивая защитный элемент, наблюдатель увидит „вспыхивающие“ надписи при совпадении угла наблюдения с углом блеска микропризм.

На рис. 5 приведено микрофотоизображение рельефа поверхности защитного элемента, состоящего из участков разнонаправленных решеток микропризм (они имеют треугольную форму в сечении). Распределение элементов решетки по поверхности создает видимое с некоторого расстояния изображение, а от относительного размера элементов зависит яркость поверхности, что позволяет записывать, в том числе, и полутоновые изображения. На основе комбинации элементов решетки выполняется надпись, видимая под определенным углом. Поскольку ортогональные решетки размещаются в разных областях поверхности, они не накладываются, что позволяет записывать различные изображения. Фотографии изображений, сделанные под двумя ортогональными углами, показывают отсутствие взаимовлияния наложенных решеток (см. рис. 4).

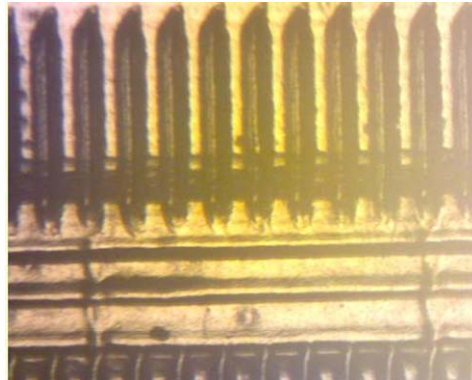


Рис. 5

Выводы. Проведенные эксперименты показывают возможность формирования элементов микрооптики с использованием лазерного гравера. Конечно, как и любой метод, лазерный гравер имеет ряд ограничений и особенностей, связанных как со свойствами обрабатываемых материалов, так и с методом записи. Минимальная полученная в ходе экспериментов ширина полосы, формируемой на дне канавки, — 1,5 мкм. Этот размер, так же как и шаг растра — 2,5 мкм (что лучше шага растра в 4 мкм при традиционной фотолитографии), пригоден для выполнения большинства практических задач, включая формирование различных микропризмных и микролинзовых пленочных элементов.

Работа выполнена при поддержке Рособразования, грант РПН 2.1.1.3937.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dajun Yuan, Suman Das.* Experimental and theoretical analysis of direct-write laser micromachining of polymethyl methacrylate by CO₂ laser ablation // *Appl. Physics.* 2007. Vol. 101. P. 024901-1- 024901-6.
2. *Pedder J. E. A., Holmes A. S., Boot H. J.* Pulsed laser ablation of polymers for display applications [Электронный ресурс]: https://workspace.imperial.ac.uk/opticalandsemidev/public/andrew/C38_pulsed.pdf.
3. Энциклопедия полимеров. Т. 2. Л-Полинозные волокна. М.: Сов. энциклопедия, 1974.

Сведения об авторах

- Вера Константиновна Баля** — Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптики квантоворазмерных систем; мл. науч. сотрудник; E-mail: Vera_Balya@mail.ru
- Игорь Юрьевич Денисюк** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптики квантоворазмерных систем; E-mail: denisiuk@mail.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой
оптики квантоворазмерных систем

Поступила в редакцию
05.09.11 г.