

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 621.397.331.29

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМИ СИСТЕМАМИ МИКРООБРАБОТКИ ДВИЖУЩИХСЯ НОСИТЕЛЕЙ

В. П. Бессмельцев, Н. В. Голошевский, К. К. Смирнов

*Учреждение Российской академии наук
Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: nickolayg@iae.nsk.su*

Рассматривается один из подходов к реализации управления лазерными системами на основе гальванометрических сканеров для прецизионной микрообработки непрерывно движущихся материалов. Показан вариант реализации системы с использованием датчиков относительного перемещения материала и алгоритмов коррекции реального времени, позволяющий обеспечить для сканеров подобного типа скорость обработки, близкую к максимально возможной. Приводятся экспериментальные результаты микрообработки полимерных лент.

Ключевые слова: лазерная микрообработка движущихся носителей, комплементарные сканаторы, гальванометрические сканеры, CO₂-лазер.

Введение. Широкое распространение систем двухкоординатного отклонения лазерного луча на основе угловых зеркальных гальванометрических сканеров для маркировки и микрообработки обусловлено простотой их применения, хорошо отработанной конструкцией, обеспечивающей высокое пространственное разрешение, малыми энергетическими потерями в оптическом канале и удобством сопряжения с фокусирующей оптикой [1, 2].

Высокое быстродействие гальванометрических зеркальных сканеров и широкий выбор объективов с большим полем обработки позволяют использовать их в системах составного сканирования как при позонной стартстопной записи, так и в случае непрерывного движения обрабатываемого материала или головки со сканерами относительно носителя [3].

Однако при формировании изображения или микрообработке движущихся носителей возникает необходимость в точной корректировке положения лазерного луча с учетом движения носителя, ошибки преобразования углового отклонения зеркала сканера в позицию лазерного луча в плоскости записи и геометрических искажений, вызванных дисторсией фокусирующего объектива. Для одновременного обеспечения максимально возможных точностных и скоростных характеристик лазерной обработки движущихся носителей требуется разработать соответствующие методы управления движением лазерного луча.

Целью данной работы является создание аппаратно-программных средств управления лазерными системами на основе сканеров гальванометрического типа и датчиков перемещения движущихся носителей, обеспечивающих максимально возможные точностные и скоростные характеристики лазерной обработки, с учетом параметров, определяющих технологические особенности лазерной обработки (микрорезки, микроперфорации, маркировки).

Лазерные системы сканирования. Структура системы сканирования на основе зеркальных угловых дефлекторов с движущимся объектом обработки представлена на рис. 1.

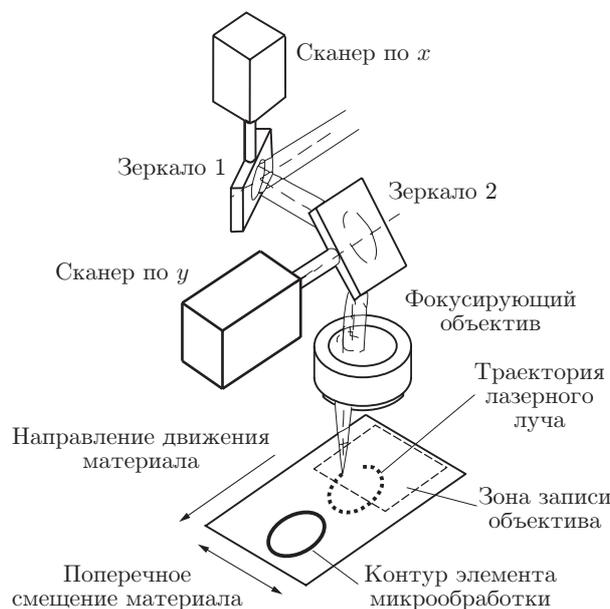


Рис. 1. Структурная схема системы сканирования

Лазерный луч, отклоненный зеркалами сканеров, попадает на объектив, фокусирующий пучок на поверхности материала.

Встроенный датчик углового положения и электронные схемы управления (драйверы сканеров) обеспечивают пропорциональность углового отклонения зеркал сканеров Θ_x , Θ_y напряжениям U_x , U_y на входах драйверов сканеров [4]:

$$\Theta_x = k_x U_x, \quad \Theta_y = k_y U_y,$$

где k_x , k_y — коэффициенты пропорциональности.

Запишем в обобщенном виде уравнение движения луча по поверхности неподвижного материала для сканирующей системы с учетом геометрических искажений, вносимых расположением сканеров и дисторсией объектива:

$$\begin{aligned} x(t) &= F_x(U_x(t), U_y(t)); \\ y(t) &= F_y(U_x(t), U_y(t)). \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь $x(t)$, $y(t)$ — координаты луча на поверхности материала; F_x , F_y — функции преобразования угловых перемещений зеркал 1 и 2 сканеров в перемещения x и y лазерного луча в плоскости обработки соответственно.

Например, в простейшем случае, когда фокусирующий объектив расположен до сканирующей системы, выражения (1) преобразуются в [5]

$$x(t) = \left(\frac{D}{\cos \Theta_y(t)} + 1 \right) \operatorname{tg} \Theta_x(t), \quad y(t) = D \operatorname{tg} \Theta_y(t),$$

где D — расстояние от зеркала 2 до поверхности обрабатываемого материала.

В случае $F\Theta$ -объективов плоского поля, специально разработанных для применения в двухкоординатных сканирующих системах, функция преобразования должна представлять собой линейную зависимость координат лазерного луча в поле записи объектива от углового отклонения зеркал сканеров. Однако лучшие на сегодняшний день объективы

плоского поля с длиной волны 10,6 мкм (для CO₂-лазеров) гарантируют погрешность 2–3 % для однокомпонентных реализаций $F\Theta$ -объектива и 0,1–0,5 % для многокомпонентных реализаций [6]. Достижение таких параметров возможно при точности юстировки оптических элементов сканирующей системы не хуже ± 50 мкм и $2'$ [7], что достаточно сложно либо приводит к сильному удорожанию системы.

Например, для лазерной системы на основе CO₂-лазера с объективом, поле записи которого 50×50 мм (диапазон отклонения зеркал сканеров $\pm 10^\circ$), и геометрическими искажениями оптического тракта не более 1 % результирующая погрешность на краях кадра записи составит ≈ 500 мкм, что в несколько раз больше сфокусированного пятна (100–150 мкм). Для применений, связанных с лазерной записью изображений на неподвижные поверхности, такая ошибка приводит лишь к небольшому искажению рисунка. Однако при прецизионной микрообработке и послойном синтезе ошибки должны быть менее размера пятна, что практически невозможно при использовании оптических методов компенсации.

Еще более жесткие требования к точности контроля положения луча на поверхности предъявляются к системе управления при обработке движущегося материала: надрезах, сквозном резе или перфорировании ленточного материала в соответствии с заданным контуром. В этом случае траектория движения лазерного луча относительно материала всегда составляет замкнутую фигуру, а вследствие перемещения материала начало и конец траектории движения лазерного луча по объективу могут находиться в различных зонах, при этом начальные и конечные углы отклонения сканеров также различны, что может приводить к незамкнутому контуру обработки при отсутствии коррекции.

При движении обрабатываемого материала выражения (1) принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} x(t) &= F_x(U_x(t), U_y(t)) + x_m(t); \\ y(t) &= F_y(U_x(t), U_y(t)) + y_m(t), \end{aligned} \tag{2}$$

где $x_m(t), y_m(t)$ — перемещение материала по соответствующим осям.

Для того чтобы обеспечить точное перемещение лазерного луча по движущемуся материалу, соответствующее заданной траектории, необходимо определить U_x, U_y из уравнения (2) по известным F_x, F_y . Однако в реальных системах нахождение аналитического выражения операторов $F_x^{-1}(\cdot), F_y^{-1}(\cdot)$ затруднено [5, 8] или практически невозможно.

Программно-аппаратные средства управления. В системах на базе зеркальных гальванометрических сканеров для обеспечения движения лазерного луча согласно заданному уравнению требуется сформировать поток данных, состоящий из набора векторов, описывающих траекторию движения, и параметров, определяющих скорость движения по контуру, разрешение, задержки в начале и конце векторов, мощность источника лазерного излучения.

Для коррекции геометрических искажений оптического тракта системы также должна передаваться таблица значений аппроксимации функций $F_x^{-1}(\cdot)$ и $F_y^{-1}(\cdot)$. Кроме того, в случае движущегося материала должны присутствовать данные о параметрах его перемещения.

Для формирования такого потока данных разработаны специализированные программно-аппаратные средства, состоящие из драйвера и модуля лазерной обработки, обеспечивающих интерфейс пользователя для формирования задания (визуализации, подготовки данных для вывода, ввода параметров записи) (рис. 2).

Исходная информация о форме объектов микрообработки может быть представлена совокупностью кривых и подготовлена в любом редакторе векторной графики для ПК

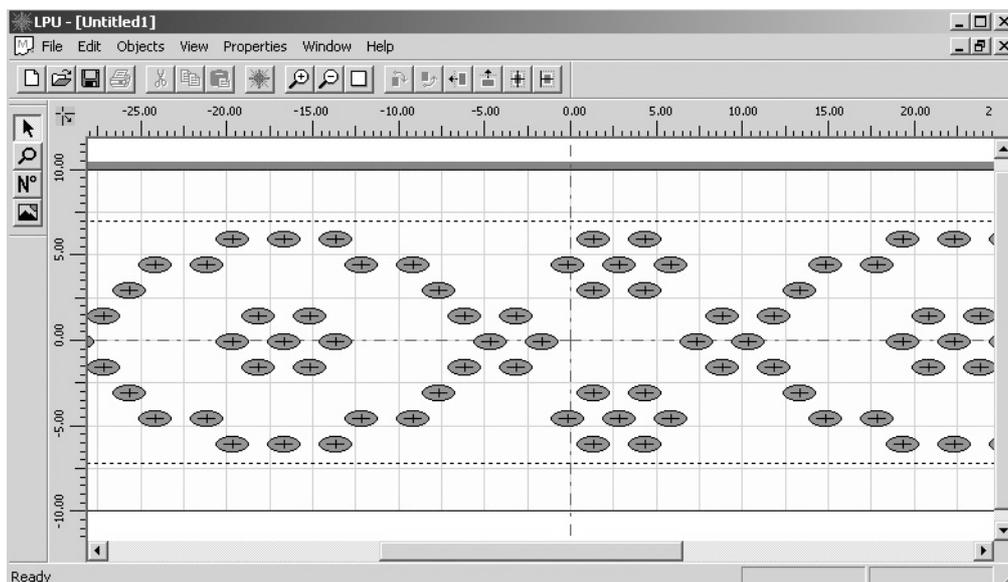


Рис. 2. Вид окна приложения

(например, CorelDraw). Векторизованные данные об элементах траектории движения лазерного луча формируются в приложении или импортируются из файлов промежуточных форматов, например HPGL. Импортированные данные образуют общее задание для микрообработки по всей длине материала.

Рассмотрим запись изображений на непрерывной ленте, движущейся по оси X . Из общего задания для обеспечения непрерывной записи формируется последовательность кадров (рис. 3).

Размер каждого кадра равен $L/2$ в направлении движения материала и L — по оси Y (здесь L — размер поля записи объектива). Нулевая координата каждого кадра x_{mi} (i — порядковый номер кадра) соответствует определенной позиции на перемещаемом материале, с которой все рисуемые объекты кадра становятся достижимыми в зоне записи сканирующей головки. Данные о перемещении лазерного луча в заданную позицию x, y преобразуются программой в два потока координат: позиции кадра x_{mi} на материале и вектора перехода луча внутри зоны записи объектива $V_j(x_j, y_j)$ (j — номер вектора в

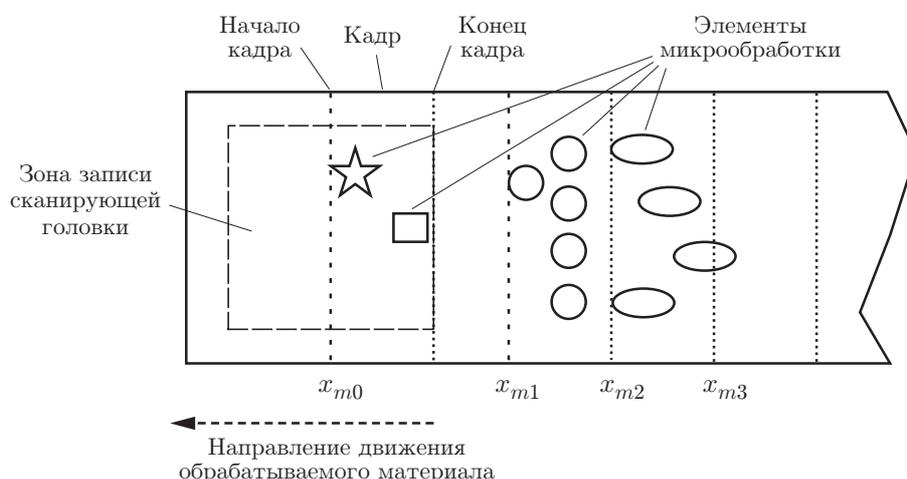


Рис. 3. Фрагмент микроперфорации ленточного материала

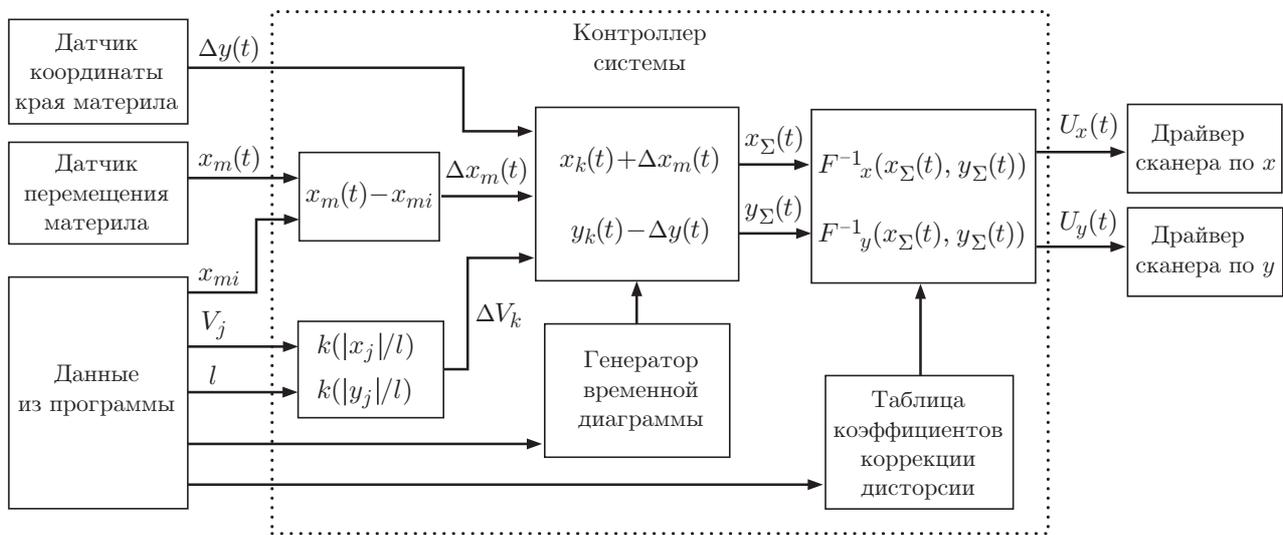


Рис. 4. Последовательности преобразования данных в управляющем контроллере

последовательности). При этом должно выполняться $\mathbf{x}_{i,j} = x_{mi} + x_j$, $\mathbf{y}_{i,j} = y_j$.

Полученный таким образом поток данных передается в контроллер системы, который преобразует их в последовательности, показанные на рис. 4.

Векторы $V_j(x_j, y_j)$ для обеспечения равномерности скорости движения луча разбиваются на микровекторы $\Delta v_k(x_k, y_k)$ длиной l . Поскольку в реальных гальванометрических сканерах разрешение ограничено 16 разрядами, а максимальная частота f подачи микровекторов не превышает 10^5 Гц, то длина l выбирается исходя из требуемых скорости ($V = fl$) и разрешения в поле записи объектива, максимальное значение которого равно $L/2^{16}$. Далее создается временная диаграмма, обеспечивающая подачу данных (x_k, y_k) на драйверы сканеров в заданное время с задержками, формируемыми в начале и в конце векторов V_j , и синхронизацию данных с модуляцией лазерного излучения. В результате образуются зависимые от времени координаты микровекторов в поле записи объектива $x_k(t), y_k(t)$.

В процессе микрообработки при перемещении лазерного луча от начальной позиции кадра происходит коррекция текущей координаты на величину смещения материала в данный момент времени:

$$x_\Sigma(t) = x_k(t) + \Delta x_m(t), \quad y_\Sigma(t) = y_k(t) - \Delta y(t),$$

где $\Delta x_m(t) = x_m(t) - x_{mi}$, а $\Delta y(t)$ — поперечное смещение материала.

На последнем этапе обработки данных производится коррекция геометрических искажений сканирующей системы с применением преобразования $F^{-1}(x(t), y(t))$, вычисление значений управляющих воздействий

$$U_x(t) = F_x^{-1}(x_\Sigma(t), y_\Sigma(t)), \quad U_y(t) = F_y^{-1}(x_\Sigma(t), y_\Sigma(t)),$$

соответствующих результирующему положению лазерного луча в зоне записи объектива, и преобразование их в аналоговый вид с помощью таблицы корректирующих значений.

Таблица коррекции предварительно получается при автоматическом анализе оцифрованного изображения, полученного при записи в поле объектива сетки с квадратными ячейками размером D . В каждой узловой точке сетки определяются фактические координаты по обеим осям, после чего вычисляются корректирующие коэффициенты, представляющие собой разность фактического и заданного значений координат. Таким образом,

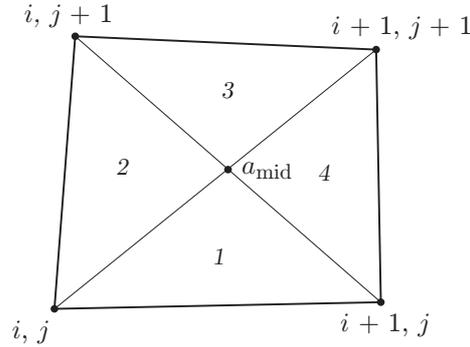


Рис. 5. Иллюстрация метода определения узлов калибровочной сетки

для всех вершин каждого из таких квадратов (рис. 5) известны точные корректирующие значения $\Delta x_{i,j}$ и $\Delta y_{i,j}$ (где i, j — порядковые номера узла калибровочной сетки по вертикали и горизонтали соответственно).

Коррекция всех остальных точек, лежащих внутри квадрата, осуществляется по следующему интерполяционному алгоритму.

1. Вычисляются корректирующие значения $\overline{\Delta x}_{i,j}$ и $\overline{\Delta y}_{i,j}$ для средней точки квадрата a_{mid} как среднее арифметическое значений в вершинах квадратов.

2. Квадрат разбивается на четыре сектора, для каждого из которых производится расчет скорректированных управляющих воздействий $U_x(t), U_y(t)$. Приведем формулы для $U_x(t)$ в каждом из секторов соответственно:

$$U_x(t) = (D - (x_{\Sigma}(t) + y_{\Sigma}(t)))\Delta x_{i,j} + (x_{\Sigma}(t) - y_{\Sigma}(t))\Delta x_{i+1,j} + 2y_{\Sigma}(t)\overline{\Delta x}_{i,j} + x_{\Sigma}(t),$$

$$U_x(t) = (D - (x_{\Sigma}(t) + y_{\Sigma}(t)))\Delta x_{i,j} + (y_{\Sigma}(t) - x_{\Sigma}(t))\Delta x_{i,j+1} + 2x_{\Sigma}(t)\overline{\Delta x}_{i,j} + x_{\Sigma}(t),$$

$$U_x(t) = ((x_{\Sigma}(t) + y_{\Sigma}(t)) - D)\Delta x_{i+1,j+1} + (y_{\Sigma}(t) - x_{\Sigma}(t))\Delta x_{i,j+1} + 2(D - y_{\Sigma}(t))\overline{\Delta x}_{i,j} + x_{\Sigma}(t),$$

$$U_x(t) = ((x_{\Sigma}(t) + y_{\Sigma}(t)) - D)\Delta x_{i+1,j+1} + (x_{\Sigma}(t) - y_{\Sigma}(t))\Delta x_{i+1,j} + 2(D - x_{\Sigma}(t))\overline{\Delta x}_{i,j} + x_{\Sigma}(t).$$

Формулы для $U_y(t)$ получаются подстановкой Δy вместо Δx .

Особенностью данного алгоритма является удобство его программной реализации.

Общая структура аппаратных средств созданной системы микрообработки движущихся материалов показана на рис. 6. Система сканирования состоит из пары гальванометрических сканеров и объектива плоского поля. Для перемещения материала устанавливается узел протяжки ленты. Данные от датчика перемещения материала и датчика смещения края материала подаются на цифровые входы контроллера, сопряженного по РСІ-шине с управляющим РС-совместимым компьютером. Выходы контроллера соединены с входом, управляющим модуляцией лазерного излучателя, и через промежуточный интерфейс связи с драйверами сканеров.

Так как данный тип сканирующей системы можно отнести к комплементарным (составным), то в качестве ее ядра решено использовать разработанный специализированный контроллер управления комплементарными сканаторами на основе микроконтроллера TMS320F2812 фирмы "Texas Instruments" (США) [3, 9]. Основные функции, выполняемые контроллером в системе:

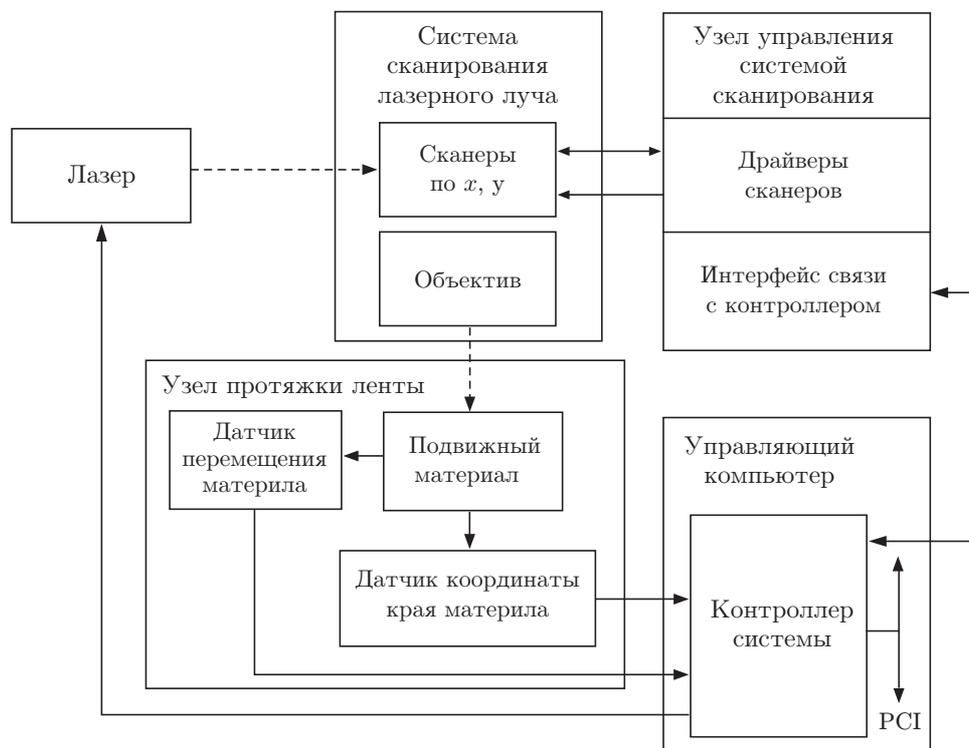


Рис. 6. Схема системы микрообработки

- 1) прием векторных данных и их предобработка в соответствии с заданными параметрами записи;
- 2) дискретизация сигналов с датчиков движения и поперечного смещения материала;
- 3) вычисление динамической погрешности позиционирования и соответствующий пересчет координат элементов траектории;
- 4) геометрическая коррекция пересчитанных координат;
- 5) преобразование результатов вычислений в аналоговые сигналы управления позицией зеркальных дефлекторов.

Экспериментальные результаты. Структура системы управления устройством микрообработки ленточных носителей, созданная на основе рассмотренного выше подхода, соответствовала представленной на рис. 6. В качестве источника излучения использовался CO_2 -лазер ULM-50 (50 Вт в одной моде). В сканирующую систему входили сканеры СТ 6420 и объектив с полем записи 20×20 мм и сфокусированным пятном размером 150 мкм. Геометрические искажения сканирующей системы составляли $\approx 3\%$. Лентопротяжный механизм перемещения материала позволял получать скорость в диапазоне 0,01–0,5 м/с, дискретность датчика перемещения материала составляла 23 мкм.

Рассмотрим изображения, полученные при различных параметрах управления системой. На рис. 7, *a, b* приведены изображения участка тонкой металлизированной пленки толщиной 50 мкм, перемещавшейся при обработке со скоростью 5 см/с, с перфорацией в виде круглых отверстий диаметром 0,75 мм и отдельного элемента перфорации. При скорости перемещения лазерного луча $v = 0,2$ м/с происходит значительное оплавление края (*b*), кроме того, нестационарность процесса плавления при малой скорости сильно искажает форму отверстия (*a*). Из рисунка видно, что обработка полимерных материалов на низких скоростях не позволяет получить качественную и точную кромку реза. На рис. 7, *c, d* изображен участок пленки толщиной 25 мкм с перфорацией в виде отверстий диаметром 1 мм и отдельный элемент перфорации (скорость перемещения ленты 0,1 м/с,

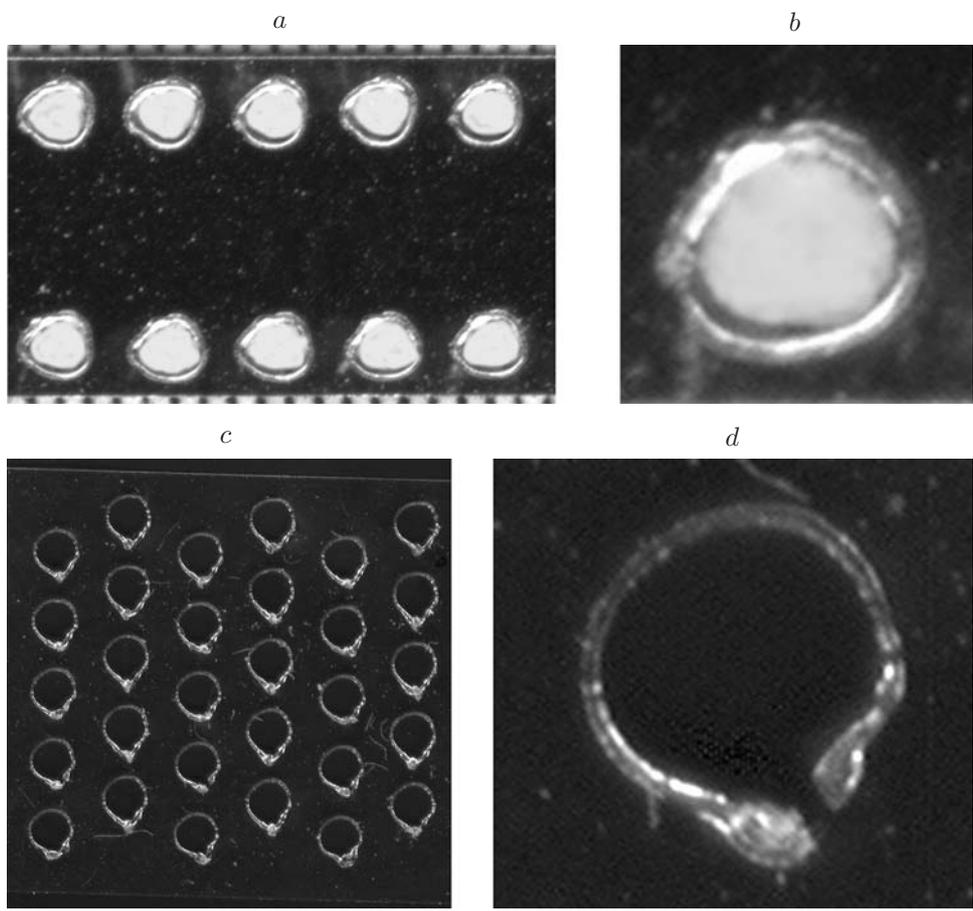


Рис. 7. Иллюстрация различных искажений при микроперфорации

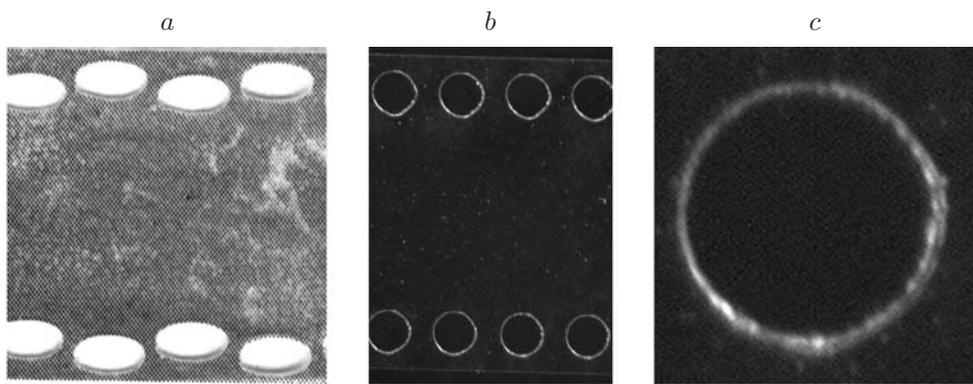


Рис. 8. Образцы микроперфорации, полученные при соблюдении требуемого технологического режима

скорость перемещения лазерного луча $v = 0,5$ м/с); обработка производилась без применения коррекции. Частичное либо полное отсутствие замыкания траектории луча связано с отсутствием коррекции дисторсионных искажений сканирующей системы.

Образцы перфорированной пленки, полученные при настройках системы с использованием коррекции искажений, показаны на рис. 8: с эллиптической перфорацией (линейные размеры 2×1 мм) (а), с перфорацией в виде окружностей диаметром 1,5 мм (б) и увеличенное отверстие диаметром 1 мм (с). Все образцы получены при скоростях перемещений лазерного луча $v \approx 1,5$ м/с и материала $v = 0,1 - 0,2$ м/с.

Заключение. Прецизионная обработка тонких полимерных материалов возможна при высоких скоростях движения лазерного луча (порядка единиц метров в секунду), что накладывает жесткие требования на систему управления позиционированием лазерного луча, особенно при обработке движущегося материала.

Близким к оптимальному, по-видимому, является применение алгоритмов управления и коррекции как динамической, так и статической, основанных на методах составного сканирования и использовании встроенных аппаратно-программных средств реального времени на основе специализированных микроконтроллеров.

Применение датчиков перемещения материала и алгоритмов коррекции в реальном времени позволяет обеспечить близкую к максимально возможной для данных сканеров скорость обработки (метры в секунду) при точности в десятки микрон на ленточных носителях шириной 100 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Schaeffer R.** Galvo based laser scanning systems // CircuitTree. 2003. **16**, N 9. P. 32.
URL: http://www.circuitree.com/Articles/Column/ff1b0325200f7010VgnVCM100000f932a8c0_
(дата обращения: 22.08.2009).
2. **Beiser L.** Unified Optical Scanning Technology. N. Y.: Wiley-Interscience, 2003. 185 p.
3. **Бессмельцев В. П., Голошевский Н. В.** Система управления составными двухкоординатными сканерами // Автометрия. 2007. **43**, № 1. С. 116–126.
4. **Bukys A.** Considerations in the design of servo amplifiers for high-performance scanning systems // Proc. SPIE. 1991. **1454**. P. 185–195.
5. **Tang Y., Loh H. T., Fuh J.-Y.-H. et al.** Accuracy analysis and improvement for direct laser sintering // Innovation in Manufacturing Systems and Technology (IMST), 2003.
URL: <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/3898> (дата обращения: 7.09.2009).
6. **Basics of 2-axis laser scanners** // <http://www.sintecoptronics.com/ref/OpticsForScanSystem.pdf>
(дата обращения: 14.08.2009).
7. **Xie J., Huang S., Duan Z.** Positional correction algorithm of a laser galvanometric scanning system used in rapid prototyping manufacturing // Intern. Journ. Advanced Manufacturing Technol. 2005. **26**. P. 1348–1352.
8. **Сканирующий** объектив SCAN-184/155_1 // http://opticom.spb.ru/scan_ru.html (дата обращения: 17.09.2009).
9. **Goloshevsky N., Aleshin A., Baev S. et al.** Precision laser system based on complementary scanning principle for dielectric materials microprocessing // Proc. SPIE. 2008. **6985**.

Поступила в редакцию 6 октября 2009 г.