

УДК 621.375.826:621

## **ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНЫХ ФОКУСИРУЮЩИХ СИСТЕМ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ НУЖД ПОЛИГРАФИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ**

**© В. В. Романенко, к.т.н., доцент, В. Л. Дубнюк,  
НТУУ «КПИ», Киев, Украина**

**У даній роботі на основі теоретичного обґрунтування можливостей застосування адаптивних елементів фокусування для реалізації різноманітних технологій лазерної обробки для потреб поліграфічних виробництв розроблено пристрої фокусування як простої, так і автоматизованої конструкції з використанням пружних мембран та розташованої між ними заломлюючої рідини, що дає можливість спростити регулювання фокусної відстані таких оптичних систем при їх налаштуванні та в процесі обробки.**

**In this work on the basis of theoretical ground of possibilities of application of adaptive focusing elements for realization of various technologies of laser treatment for the necessities of polygraphy productions focusing devices both outages and the automated construction are developed with the use of resilient membranes and located between them refractive liquid that enables to simplify adjusting of focal distance of such optical systems at their tuning and in the process of treatment.**

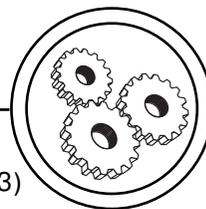
### **Постановка проблемы**

Теоретическое обоснование возможности применения адаптивных фокусирующих элементов для реализации необходимых технологий лазерной обработки (резки, сварки, термообработки, прошивки отверстий) показало, что имеется возможность управлять величиной фокусного расстояния такой оптики в требуемом диапазоне. Был предложен метод формирования фокусирующей оптики за счет использования упругих мембран, прозрачных для лазерного излучения, между которыми под требуемым давлением подается преломляющая жидкость для деформирования мембран и образования фокусирующей

щey линзы. При этом варьированием величины давления преломляющей жидкости можно изменять величину фокусного расстояния такой линзы. Кроме того, предлагаемые адаптивные фокусирующие системы позволяют варьировать их фокусное расстояние в процессе самой лазерной обработки, а, следовательно, активно влиять на протекание этого процесса для его оптимизации. И, наконец, ожидаемая стоимость таких оптических систем намного ниже, чем традиционной оптики.

### **Цель работы**

Разработка фокусирующих устройств для реализации предложенного способа фокусиров-



ки лазерного излучения с помощью адаптивной оптики и применение таких устройств в конкретных технологиях лазерной обработки для нужд полиграфической промышленности.

**Результаты проведенных исследований**

Опираясь на закономерности теории упругости [1], была установлена взаимосвязь между давлением преломляющей жидкости  $p$  и величиной прогиба гибких мембран, формирующих фокусирующий элемент. Максимальная величина прогиба  $W_M$  достигается в центре жестко закрепленной по краям мембраны диаметром  $2r_M$  и равна:

$$W_M = pr_M^4 / 64B, \quad (1)$$

где  $B = E\delta^3 / 12(1 - \nu^2)$  — цилиндрическая жесткость мембраны;  $E$  — модуль упругости материала мембраны;  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $\delta$  — толщина мембраны.

С другой стороны, величина прогиба мембраны в ее центре  $W_M$  связана с радиусом кривизны преломляющей поверхности  $R$ , образованной этой мембраной, приближенным соотношением (достаточным для инженерных расчетов):

$$W_M = r^2 / 2R. \quad (2)$$

Воспользуемся формулой тонкой линзы, устанавливающей соотношение между величиной фокусного расстояния  $f$  такой линзы и радиусами кривизны  $R_1$  и  $R_2$  образующих эту линзу преломляющих поверхностей (в нашем случае упругих мембран) [2]:

$$f = R_1 R_2 / (n - 1)(R_1 + R_2). \quad (3)$$

Используя зависимость (2), легко установить необходимые значения радиусов кривизны преломляющих поверхностей в двух наиболее распространенных случаях. Во-первых, представляет интерес двояковыпуклая линза, широко применяемая для работы с лазерами на неодиме и гранате с длиной волны излучения 1,06 мкм. Для этого случая ( $R^{DB} = R_1 = R_2$ ) имеем:

$$R^{DB} = 2(n - 1)f. \quad (4)$$

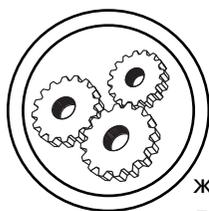
Во-вторых, для газовых лазеров на  $CO_2$  с  $\lambda = 10,6$  мкм применима выпукло-плоская линза, обращенная выпуклой стороной в сторону лазерного луча. В данном случае ( $R^{OB} = R_1; R_2 = \infty$ ) и:

$$R^{OB} = (n - 1)f. \quad (5)$$

Подставляя значения (4) и (5) в выражение (2), можно получить систему уравнений для оценки максимальной величины прогиба мембран при формировании линз в рассматриваемых случаях:

$$W_M^{DB} = \frac{r_M^2}{4(n-1)f}, \quad (6)$$

Оценим величину прогиба и, следовательно, толщину получаемой линзы при необходимости фокусировки лазерного излучения  $\lambda = 1,06$  мкм. Обычно диаметр пучка излучения, выходящего из резонатора лазера, не превышает 10...12 мм. Поэтому входная апертура линзы не превышает 20 мм, т.е.  $r_M = 10$  мм. При формировании линзы с фокусным расстоянием, изменяющимся от  $f = \infty$  до  $f = 20$  мм, при помощи преломляющей



жидкости с показателем преломления  $n = 1,5$  из зависимости (6) получаем, что  $W_M^{ДВ}$  варьируется от 0 до 5,6 мм. Т.е. тонкая двояковыпуклая линза может быть толщиной не более 11,2 мм. При формировании выпукло-плоской линзы для фокусировки излучения  $\lambda = 10,6$  мкм с фокусным расстоянием, изменяющимся от  $f = \infty$  до  $f = 50$  мм, при помощи преломляющей жидкости с показателем преломления  $n = 1,5$  необходимо учитывать, что входная апертура таких линз должна быть значительно больше (до 80 мм), т.е.  $r_M = 40$  мм. Из зависимости (6) имеем, что  $W_M^{ДВ}$  варьируется от 0 до 32 мм.

Следовательно, толщина такой линзы достигает величины в 32 мм. Использование же преломляющих жидкостей с показателями преломления большими, чем  $n = 1,5$  ведет к пропорциональному уменьшению толщины формируемых линз.

Наиболее простая конструкция адаптивных линз, изготовленных по предложенному принципу, может быть следующая. Двояковыпуклая линза (рис. 1, а) формируется с помощью

наружного 1 и ввинченного в него внутреннего 2 цилиндра с помощью герметичного резьбового соединения. На нижних концах как внутреннего, так и внешнего цилиндров жестко и герметично закреплены одинаковые упругие мембраны 3 и 4 (например, приклеены). Наружный цилиндр 1 заполняется преломляющей жидкостью 5 высотой 5,6 мм. При завинчивании внутреннего цилиндра 2 в наружный 1 преломляющая жидкость 5 деформирует упругие мембраны 3 и 4, образуя двояковыпуклую линзу. В нашем случае при завинчивании внутреннего цилиндра 2 до упора с наружным 1 края мембран касаются друг друга, и образуется линза с фокусным расстоянием  $f = 20$  мм. Очевидно, что обе мембраны должны иметь одинаковую упругость и должны быть прозрачны для лазерного излучения длиной волны 1,06 мкм.

Для образования выпукло-плоской линзы (рис. 1, б) на наружный цилиндр 1 закрепляется неупругая плоскопараллельная пластинка 6, прозрачная для излучения длиной волны

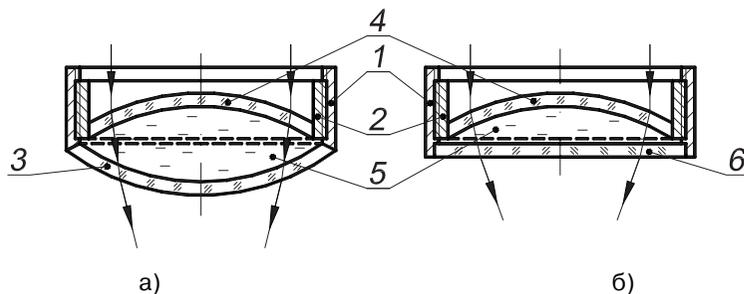
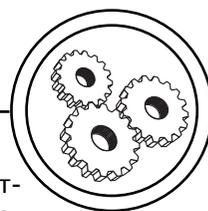


Рис. 1. Конструкция адаптивной линзы: а) двояковыпуклая; б) выпуклоплоская



10,6 мкм. К внутреннему же цилиндру 2 жестко крепится упругая мембрана 4 также прозрачная для  $\lambda = 10,6$  мкм. Наружный цилиндр 1 заполняется преломляющей жидкостью 5 высотой 32 мм, если показатель преломления жидкости  $n = 1,5$ . Для преломляющей жидкости с  $n$  близким к 2,0 высота наполнения ею наружного цилиндра близка к 16 мм. В рассматриваемой конструкции при герметичном свинчивании двух цилиндров деформируется лишь верхняя мембрана, и в крайнем положении, когда упругая мембрана 4 краями касается нижней пластинки 2, образуется линза с фокусным расстоянием  $f = 50$  мм.

Следует отдельно отметить, что выбор преломляющих жидкостей с различными показателями преломления как для лазерного излучения длиной волны 1,06 мкм, так и для излучения с  $\lambda = 10,6$  мкм не является сложной задачей. Такие данные освещены в специальной литературе [3]. Вместе с тем, состав материалов для изготовления как упругих, так и неупругих

мембран, прозрачных для соответствующих длин волн лазерного излучения (особенно для  $\lambda = 10,6$  мкм), является интеллектуальной собственностью коллектива авторов и представляет коммерческую тайну.

Разработано также автоматизированное устройство для реализации адаптивной системы фокусирования лазерного излучения. Предлагаемое устройство (рис. 2) содержит наружный цилиндр 1 и герметично установленный в нем с помощью уплотнения 2 внутренний цилиндр 3. Основания обоих цилиндров служат жестко закрепленные по краям упругие мембраны 4 и 5 (или упругая 4 и неупругая 6 мембраны) из прозрачного для фокусируемого лазерного излучения материала. Полость внутри цилиндров, образованная мембранами 4 и 5 или 4 и 6, заполнена преломляющей жидкостью 7. Внутренний цилиндр 3 снабжен механизмом его осевого перемещения 8, и пультом управления 9 этим перемещением, благодаря которым оператор имеет возможность сбли-

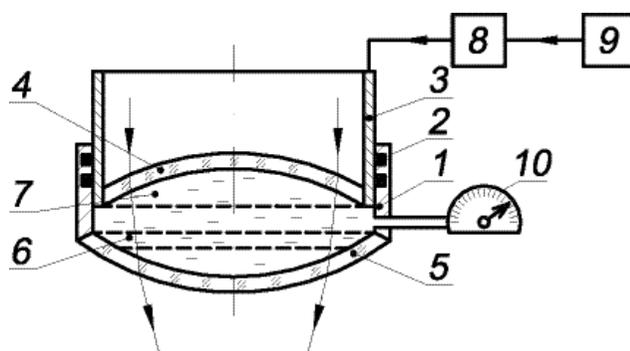
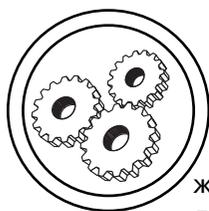


Рис. 2. Автоматизированное устройство для фокусирования лазерного излучения



жать (или удалять) основания двух цилиндров, что ведет к изменению фокусного расстояния формируемой линзы. Наружный цилиндр 1, в свою очередь, снабжен датчиком 10 давления в преломляющей среде 7, которое изменяется при перемещении цилиндров друг относительно друга.

Устройство работает следующим образом. При сближении оснований внутреннего 3 и наружного 1 цилиндров давление в среде преломляющей жидкости 7 возрастает, следовательно, увеличивается величина прогиба упругих мембран 4 и 5, и, как результат, меняется фокусное расстояние образованной линзы. Используя выражения (1) и (2) с учетом (4) и (5), можно установить зависимость величины фокусного расстояния при формировании соответственно двояковыпуклой и выпукло-плоской линзы  $f^{ДВ}$  и  $f^{ОВ}$  от давления  $p$  в преломляющей жидкости для заданных характеристик упругости материала мембран и показателя преломления применяемой жидкости. Имеем:

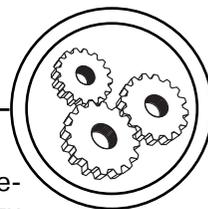
$$\begin{aligned} f^{ДВ} &= \frac{16B}{(n-1)p}, \\ f^{ОВ} &= \frac{32B}{(n-1)p}. \end{aligned} \quad (7)$$

Как видно из зависимостей (7), рассчитанная величина фокусного расстояния обратно пропорциональна величине требуемого давления в преломляющей среде. Следовательно, на шкале датчика давления 10

наружного цилиндра 1 может быть установлена дополнительная шкала, проградуированная в миллиметрах фокусного расстояния формируемой линзы отдельно для двояковыпуклой и выпукло-плоской линзы. При этом оператор в процессе настройки величины фокусного расстояния с помощью пульта управления 9 перемещает внутренний цилиндр 3, наблюдая за показаниями дополнительной шкалы датчика давления 10, и при достижении требуемой величины фокусного расстояния отключает движение этого цилиндра.

При реализации некоторых технологий лазерной обработки (например, сварки, резки и др.) есть необходимость колебать с определенной частотой фокусное расстояние линзы непосредственно в процессе обработки. Предложенное выше устройство позволяет легко реализовать такую необходимость. Простейшим способом реализации такого колебания может послужить вращающийся кулачек, периодически толкающий внутренний цилиндр.

Таким образом, предлагаемые устройства позволяют значительно расширить возможности лазерной технологии за счет увеличения диапазона реализуемых фокусных расстояний (в нашем случае непрерывный ряд величины фокусных расстояний лежал в диапазоне от 15 мм до  $\infty$ ), снизить время переналадки режимов лазерной обработки, а значит, повысить ее производительность, управлять величиной фокусного расстояния в процессе обработки. Вместе



с тем, замена на предлагаемую адаптивную оптику широко используемых стеклянных, монокристаллических и других специальных линз, применяемых в больших количествах для варьирования фокусными расстояниями, позволяет значительно снизить стоимость оптических элементов лазеров и повысить эффективность лазерной обработки.

## Выводы

1. На основе теоретического обоснования возможности применения адаптивных фокусирующих элементов для реализации необходимых технологий лазерной обработки разработаны фокусирующие устройства с использованием метода формирования фокусирующей оптики за счет использования упругих мембран, прозрачных для лазерного излучения, между которыми под требуемым давлением подается преломляющая жидкость для деформирования мембран и образования фокусирующей линзы.

2. Опираясь на закономерности теории упругости, установ-

лена взаимосвязь между давлением преломляющей жидкости и величиной прогиба гибких мембран, формирующих фокусирующий элемент. Оценена толщина получаемой линзы на более простой ее конструкции в виде наружного и ввинченного в него с помощью герметичного резьбового соединения внутреннего цилиндра для двояковыпуклой и выпукло-плоской линзы.

3. Описан принцип работы автоматизированного устройства для реализации адаптивной системы фокусирования лазерного излучения по предложенному методу. Установлена зависимость величины фокусного расстояния при формировании двояковыпуклой и выпукло-плоской линзы от давления в преломляющей жидкости для заданных характеристик упругости материала мембран и показателя преломления применяемой жидкости. Устройство позволяет легко управлять величиной фокусного расстояния линзы, как в режиме настройки, так и непосредственно в процессе обработки.

1. Федосов И. В. Геометрическая оптика / И. В. Федосов. — М. : Сателлит, 2008. 2. Тимошенко С. П. Теория упругости / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер. — М. : Наука, 1975. 3. Справочник по лазерам / Под ред. акад. А. М. Прохорова. — М. : Сов. радио, 1978.

Рецензент — Л. Ф. Головкин, д.т.н.,  
профессор, НТУУ «КПІ»

Надійшла до редакції 13.09.10