

УДК 621.375.826:621

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ФОКУСИРОВАНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ В ПОЛИГРАФИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВАХ

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

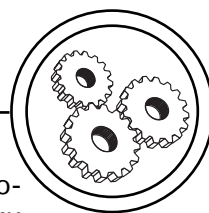
У даній роботі на основі аналізу існуючих методів фокусування лазерного випромінювання для реалізації різноманітних видів лазерної обробки для потреб поліграфічних виробництв запропонований спосіб фокусування з використанням пружних мембран та розташованої між ними заломлюючої рідини, що дає можливість розширити діапазон регулювання фокусної відстані таких оптичних систем та отримати економічну ефективність в порівнянні з застосуванням традиційної оптики.

In this work on the basis of analysis of existent methods of focusing of laser radiation for realization of various types of laser treatment for the necessities of polygraphy productions the offered method of focusing with the use of resilient membranes and located between them refractive liquid, which enables to extend the range of adjusting of focal distance of such optical systems and get economic efficiency in relation to application of traditional optics.

Постановка проблемы

Фокусирование лазерного излучения в зоне обработки фактически формирует требуемый режущий инструмент для реализации необходимой технологии лазерной обработки (резки, сварки, термообработки, прошивки отверстий), широко применяемой для нужд полиграфической промышленности. Традиционно используемые в лазерной обработке стеклянные и монокристаллические линзы или объективы, с одной стороны, ограничивают диапазон варьирования их фокусных расстояний, а, с другой стороны, (при использовании целого

набора этих элементов для расширения возможностей фокусировки) существенно повышают стоимость такой технологической оснастки. Значительно эффективнее применение адаптивной оптики, позволяющей не только заменить дискретный набор значений фокусных расстояний на непрерывный ряд, но и снизить стоимость рассматриваемой оснастки. Кроме того, появляется возможность варьирования фокусировки в процессе самой обработки, что позволяет управлять как размерными, так и качественными параметрами лазерной обработки.



Цель работы

Теоретическое обоснование разработанного способа фокусировки лазерного излучения с помощью адаптивной оптики и анализ возможностей реализации таких устройств в конкретных технологиях обработки лазером для потребностей полиграфической промышленности.

Результаты проведенных исследований

Попытки применения адаптивной оптики в лазерной технологии осуществлялись и ранее. Так, известен способ изменения фокусного расстояния, заключающийся в наклоне линзы с помощью приспособления для ее качания [1]. Качание оптики обеспечивает (по известным оптическим законам) движение пятна фокусирования лазерного излучения в направлении распространения луча, однако на незначительное расстояние. Еще один способ заключается в фокусировании луча лазера с помощью жидкой среды, вращающейся вместе с объективом [2]. При вращении жидкой преломляющей среды ее поверхность приобретает форму параболоида вращения и формирует отрицательную линзу. Однако возникает трудность удержания заданного фокусного расстояния из-за малой точности позиционирования вращающейся жидкости. Да и применение отрицательных линз (в отличие от положительных) в лазерной технологии ограничено. Хороший результат может дать применение метода фокусирования, когда преломление излучения осуществляется жид-

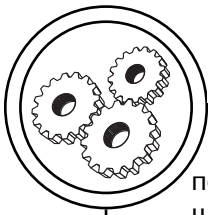
кой средой, заполняющей полость между двумя выпуклыми стеклянными основаниями [3]. В данном случае эффект изменения фокусного расстояния основывается на изменении толщины жидкой преломляющей среды в результате перемещения одного из стеклянных оснований без изменения кривизны преломляющей поверхности. Для определения фокусного расстояния такой толстой линзы может быть применена зависимость [4]:

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \frac{d(n-1)^2}{nR_1R_2}, \quad (1)$$

где f — фокусное расстояние; R_1 и R_2 — соответственно радиус кривизны верхнего и нижнего основания; n — показатель преломления лазерного излучения жидкой средой; d — толщина фокусирующего жидкого слоя.

Недостатком такого устройства является узкий диапазон варьирования фокусного расстояния.

Для расширения диапазона регулирования фокусного расстояния при фокусировке лазерного излучения нами предложен способ, включающий преломление лазерного луча жидкой средой, заключенной в полости, сформированной двумя жестко закрепленными по периферии упругими мембранами. Такие мембраны должны быть прозрачными для лазерного излучения. Преломляющая жидкость в полость подается



под давлением, обеспечивающим требуемый прогиб мембран с целью образования фокусирующего оптического элемента с заданным фокусным расстоянием. На рис. 1 представлена схема, поясняющая сущность данного метода фокусировки. Через патрубок 1 жидкая преломляющая среда 2 подается под давлением p в полость, образованную двумя упругими мембранами 3 и 4, и формирует фокусирующий элемент, преломляющий лазерное излучение 5 для его фокусировки на деталь 6. Повышение давления в преломляющей среде 2 выше атмосферного способствует тому, что упругие мембраны 3 и 4 прогибаются и приобретают сферическую форму (при условии постоянности упругости этих мембран вдоль их диаметра) в результате действия равномерно распределенной нагрузки, обеспеченной жидкостью под давлением. При этом варьирование давлением жидкой преломляющей среды изменяет радиусы кривизны сферических поверхностей мембран

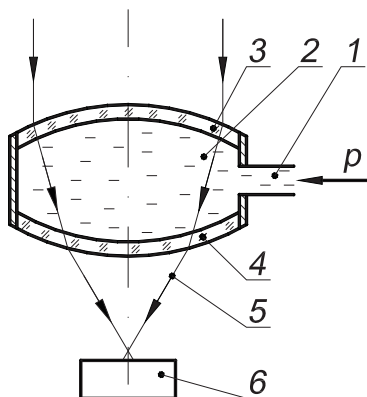


Рис. 1. Схема метода фокусировки лазерного излучения

3 и 4, и, как следствие, изменяется и фокусное расстояние линзы, образованной жидкой средой в полости между мембранами в соответствии с формулой (1).

Как следует из теории упругости, текущий угол поворота жестко закрепленной по краям мембраны при равномерно распределенном давлении p для текущего радиуса r (рис. 2) может быть найден из системы уравнений [5]:

$$\varphi = -\frac{dW}{dr}; \quad (2)$$

$$\varphi = -\frac{p}{2Br} \int (r \int r dr) dr + C_1 r + \frac{C_2}{r}, \quad (3)$$

где W — текущая величина прогиба мембраны; $B = \frac{E\delta^3}{12(1-\nu^3)}$ —

цилиндрическая жесткость мембраны; E — модуль упругости материала мембраны; ν — коэффициент Пуассона; δ — толщина мембраны; C_1 и C_2 — постоянные, характеризующие состояние мембраны в ее центре и по краям, соответственно.

При этом $C_2 = 0$ (из условия конечности длины закрепленной по краям мембраны), и из зависимости (3) в нашем случае получаем:

$$\varphi = \frac{-pr^3}{16B} + C_1 r. \quad (4)$$

В свою очередь, значение C_1 для мембраны диаметром $2r_M$ в ее центре ($(\varphi)_{r=r_M} = 0$) равно:

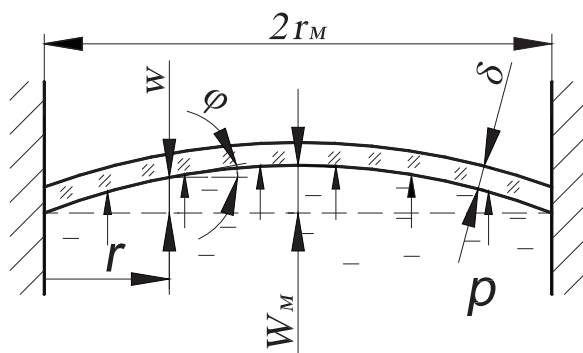
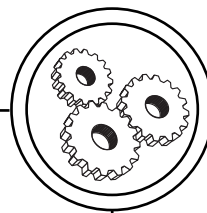


Рис. 2. Расчетная схема к определению величины прогиба упругой мембраны

$$C_1 = \frac{pr_M^2}{16B}. \quad (5)$$

Из (4) с учетом (5) для текущего значения угла поворота мембраны получаем соотношение:

$$\varphi = \frac{pr}{16B}(r_M^2 - r^2). \quad (6)$$

Для определения текущего значения величины прогиба мембраны воспользуемся зависимостями (2) и (6). Имеем:

$$dW = -\frac{pr}{16B}(r_M^2 - r^2)dr. \quad (7)$$

Отсюда:

$$W = -\frac{pr}{16B_0} \int (r_M^2 r - r^3) dr + C_3, \quad (8)$$

где C_3 — постоянная, характеризующая прогиб мембраны в ее центре.

Для условия $W_{r=r_M} = 0$ получаем:

$$-\frac{p}{16B} \left(\frac{r_M^2}{2} - \frac{r_M^4}{4} \right) + C_3 = 0. \quad (9)$$

Следовательно, из (9) возможно установить, что величина прогиба в центре мембраны равна:

$$W_M = C_3 = \frac{pr_M^4}{64B}. \quad (10)$$

Из (8), с учетом (10), получаем уравнение прогиба каждой точки мембраны:

$$W = \frac{pr_M^4}{64B} - \frac{p}{32B} \left(r_M^2 r^2 - \frac{r^4}{2} \right). \quad (11)$$

Зная величину прогиба мембраны в ее центре W_M , мы можем определить радиус кривизны преломляющей поверхности, образованной этой мембраной (рис. 3).

Из прямоугольного треугольника, образованного сторонами r_M , $(R_1 - W_M)$ и R_1 , производя несложные преобразования, имеем:

$$R = \frac{r_M^2}{2W_M} + \frac{W_M}{2}. \quad (12)$$

Используя зависимость (10), окончательно получаем:

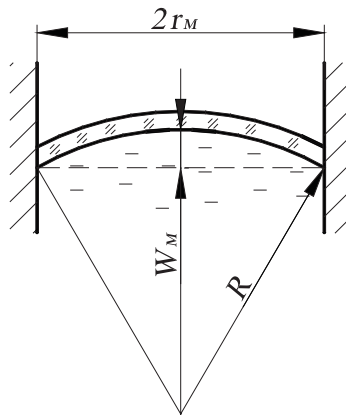
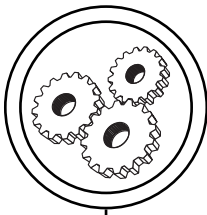


Рис. 3. К определению радиуса кривизны преломляющей поверхности

$$R = \frac{32B}{r_M^2} + \frac{pr_M^4}{128B}. \quad (13)$$

В результате взаимного прогиба двух мембран (верхней и нижней) (см. рис. 1) образуется фокусирующая линза с радиусами кривизны R_1 , R_2 и с фокусным расстоянием, которое может быть определено по зависимости (1). При определении радиуса нижней мембраны необходимо учитывать также давление столба жидкости, заключенного между мембранами. Тогда

$$R_2 = \frac{32B}{(p + \rho gh)} r_M^2 + \frac{(p + \rho gh)}{128B} r_M^2, \quad (14)$$

где ρ и h — соответственно плотность и высота столба жидкой преломляющей среды.

В случае различной упругости материала верхней и нижней мембран радиусы кривизны об-

разованной линзы могут быть вычислены из системы уравнений:

$$R_1 = \frac{32B_1}{r_M^2} + \frac{pr_M^4}{128B_1}, \quad (15)$$

$$R_2 = \frac{32B_2}{(p + \rho gh)} r_M^2 + \frac{(p + \rho gh)}{128B_2} r_M^2, \quad (16)$$

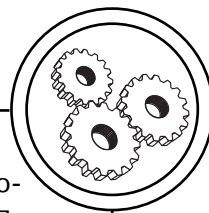
где B_1 и B_2 — цилиндрическая жесткость верхней и нижней мембраны, соответственно.

Особый интерес представляет случай применения данного способа для получения тонкой линзы с острым краем, когда можно не учитывать реальную толщину линзы. В данном случае для определения фокусного расстояния тонкой линзы можно воспользоваться упрощенным выражением [4]:

$$f = \frac{R_1 R_2}{(n-1)(R_1 + R_2)}. \quad (17)$$

При формировании тонкой линзы можно также пренебречь величиной давления столба жидкости на нижнюю мембрану, что вполне оправданно для инженерных расчетов. Таким образом, подавая жидкую преломляющую среду под различным давлением p , имеется возможность изменять условия фокусирования лазерного излучения в соответствии с зависимостью:

$$f = \frac{64B + \frac{p^2 r_M^4}{64B}}{4(n-1)pr_M^2}. \quad (18)$$



Давление преломляющей среды, необходимое для формирования линзы с одинаковой упругостью материала верхней и нижней мембраны и с заданным значением фокусного расстояния f , можно определить из (18). Получаем:

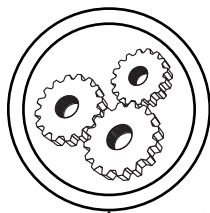
$$p = \frac{64B}{r_m^4} \left[\frac{2f(n-1) - \sqrt{4f^2(n-1)^2 - r_m^2}}{2} \right]. \quad (18)$$

Данный метод фокусирования (кроме отмеченных преимуществ) может позволить решить еще одну важную задачу, возникающую при необходимости реализации максимально острой фокусировки (получения минимального пятна фокусирования), что необходимо при резке материалов, получении отверстий. Так, изменяя толщину мембраны вдоль диаметра по требуемой закономерности (уменьшая ее толщину от периферии к центру), появляется возможность получить форму деформируемой под воздействием давления преломляющей жидкости поверхности мембраны в виде параболической (а не сферической) поверхности. Образованная таким образом линза с параболическими преломляющими поверхностями позволяет устранить сферическую aberrацию фокусирующего элемента, что и позволяет устранить размытость пятна фокусирования из-за данной aberrации. Для установления закона изменения толщины такой мембраны необходима разработка дополнительной компьютерной программы, что выходит за рамки данной статьи.

Другой путь улучшения условий фокусирования такой адаптивной оптики заключается в разработке комбинированных объективов. К примеру, в качестве нижнего фокусирующего элемента объектива может использоваться стеклянная линза, а верхняя фокусирующая линза может быть сформирована по предложенному способу, но без нижней мембраны, роль которой выполняет стеклянная линза. Очевидно, что при этом будет наблюдаться идеальный оптический контакт между обеими линзами объектива, а варьирование фокусного расстояния последнего обеспечивается деформированием верхней упругой мембраны.

Предлагаемый способ был использован для фокусирования лазерного излучения различных длин волн ($\lambda = 0,34$ мкм, $\lambda = 0,63$ мкм, $\lambda = 1,06$ мкм) соответственно для аргоновых, гелий-неоновых лазеров, лазеров на стекле с неодимом, гранате.

Так, при фокусировке лазерного излучения длиной волны 0,34 мкм в качестве эксперимента исследовались жидкие преломляющие среды: толуол, хлороформ, бензол ($n \approx 3$). Упругие мембраны были изготовлены из полимерных материалов на основе акрилаида. Замерялось изменение величины фокусного расстояния таких линз при подаче жидкой среды под различным давлением. Установлено, что при варьировании давления жидкой среды от 0,02 МПа до 0,15 МПа фокусное расстояние образующегося при этом фокусирующего элемента изменялось от $f = 300$ мм до $f = 20$ мм.



В другом случае для фокусировки лазерного излучения длинной волны 0,63 мкм и 1,06 мкм в качестве жидкой преломляющей среды был использован глицерин, коэффициент преломления которого $n \approx 1,5$. Глицерин подавался под давлением в полость, образованную двумя жестко закрепленными по краям мембранами, изготовленными из триацетатной пленки (прозрачной для исследуемого диапазона длин волн) толщиной 0,2...0,4 мм. Экспериментальные замеры показали, что при изменении давления подаваемого глицерина в диапазоне от 0,03 до 0,2 МПа фокусное расстояние образуемой при этом фокусирующей линзы изменялось от $f = 300$ мм до $f = 25$ мм. Такой диапазон изменения величин фокусного расстояния в случае использования лазеров на неодиме и гранате, широко применяемых в технологических процессах, дает возможность реализовать технологии от термообработки до прецизионной резки и обработки отверстий. Очевидно, что при реализации рассматриваемого метода фокусировки значительно снижается время, требуемое на переналадку режимов лазерной обработки. Кроме того, экономические оценки показали, что замена по предлагаемому способу широко применяемых стеклянных линз и объективов, которые для варьирования их фокусных расстояний используются в наборе, позво-

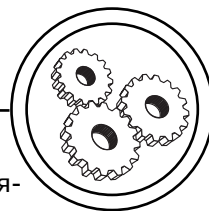
ляет снизить стоимость оптических элементов лазеров в 3...5 раз.

Выводы

1. На основе анализа известных способов применения адаптивной оптики для фокусирования излучения лазеров при реализации различных видов лазерной обработки предложен оригинальный способ фокусировки, заключающийся в формировании фокусирующего элемента с помощью двух упругих мембран, закрепленных по периферии и прозрачных для лазерного излучения. В полость между мембранами под требуемым давлением подается преломляющая жидкость, деформирующая мембраны для образования фокусирующей линзы. Варьирования величины давления жидкости ведет к изменению значения фокусного расстояния линзы в требуемом диапазоне.

2. Опираясь на закономерности теории упругости, выведены теоретические зависимости для расчета прогиба упругих мембран адаптивных фокусирующих элементов и, как результат, величины требуемого давления в преломляющей среде для формирования оптики с заданным фокусным расстоянием.

3. Проанализированы возможности улучшения условий фокусирования благодаря разработанному методу за счет применения мембран перемен-



ной толщины, а также при использовании комбинированных объективов.

4. Приведено описание экспериментальных образцов фокусирующих элементов для фокусировки лазерного излучения

различных длин волн, применяемого в различных областях лазерной техники и технологии, и дана экономическая оценка преимущества их использования по отношению к традиционной оптике.

1. Патент ФРГ № 2012718 В23к 26/00, 1973 г. 2. А.с. СССР № 574895 В23к 26/00, 1977 г. 3. А.с. СССР № 13769 G02b 03/12, 1971 г. 4. Федосов И. В. Геометрическая оптика / Федосов И. В. — М. : Сателлит, 2008. 5. Тимошенко С. П. Теория упругости / Тимошенко С. П., Гудьер Дж. — М. : Наука, 1975.

Рецензент — В. П. Котляров, д.т.н.,
професор, НТУУ «КПІ»

Надійшла до редакції 13.09.10