

УДК 621.373.8; 621.372.85; 532.54

СВОЙСТВА ГАЗОВЫХ ТЕРМОЛИНЗ, НАВОДИМЫХ В ЗОНЕ ЛАЗЕРНОГО СВЕРЛЕНИЯ С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ ОБДУВОМ

© 2004 г. В. М. Журба*, В. М. Митькин**, доктор техн. наук; В. В. Шишковский*

* ООО "Научно-производственное предприятие волоконно-оптического и лазерного оборудования", Санкт-Петербург

** ВНЦ "Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова", Санкт-Петербург

Рассмотрена возможность использования теплового эффекта в месте лазерного сверления материала для формирования в зоне обработки дополнительной оптической линзы. Показано, что числовая апертура наводимой газовой термолинзы может достигать значений 0,025–0,03.

Коды OCIS: 350.3390.

Поступила в редакцию 04.11.2003.

Механизм получения отверстий в непрозрачном материале под действием лазерного излучения заключается в последовательном (вдоль оси светового пучка) разогреве слоев материала выше температуры испарения и выносе расплава из зоны обработки с помощью струи газа [1]. Одна из возможных схем взаимодействия пучка излучения и воздушного потока с зоной обработки показана на рис. 1. Газовый поток направляется соосно с пучком лазерного излучения. После взаимодействия с зоной обработки температура газа повышается и при обратном ходе он нагревает с внешней стороны боковую стенку направляющей трубки. В квазистационарном режиме работы получается, что входной газ с комнатной температурой проходит внутри направляющей трубки с горячей стенкой. Таким образом, возникает типичная картина формирования газовых термолинз, которые интенсивно изучались применительно к волноводной технике в прошлом столетии и исчерпывающе описаны в работах [2, 3]. При нагреве ламинарного потока газа от стенки трубки тепло, радиально проникая внутрь газа, образует некоторый градиент температуры по сечению. Наиболее холодные участки распределены по направлению к оси трубки. Известно, что показатель преломления газа уменьшается с ростом температуры [2, 3]. Следовательно, на оси трубки газ имеет наибольший показатель преломления, так как он менее нагрет. Световой луч, проходящий внутри трубки, отклоняется в сторону области с более высоким показателем преломления и покидает ее под более крутым углом к оптической оси, которую он и пересекает на некотором расстоянии от торца. Участок трубки с нагретой боковой поверхностью и проходящим через

нее воздушным потоком действует на световое излучение как оптическая линза [2, 3].

Вполне понятно, что возникновение дополнительной оптической линзы в зоне обработки может посредством повышения плотности силового излучения способствовать эффекту самоканализации излучения [1] и увеличению тем самым глубины отверстия. Кроме того, для предотвращения разрушения выходного торца узла доставки силового излучения (например, торца кварцевого волокна) она дает возможность разработчикам несколько отдалить торец от зоны обработки. Все это является привлекательным фактором для создания специальных конструкций наконечников с целью повышения эффективности лазерного сверления глубоких отверстий.

Для того чтобы оценить величину наводимых оптических эффектов в зоне обработки, был поставлен

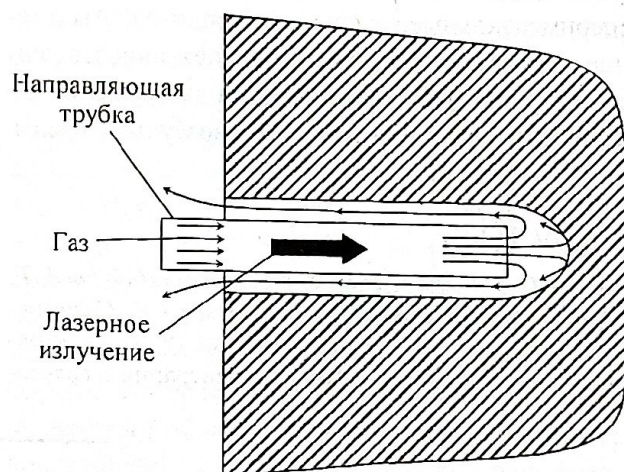


Рис. 1. Схема газовых потоков в зоне лазерного воздействия.

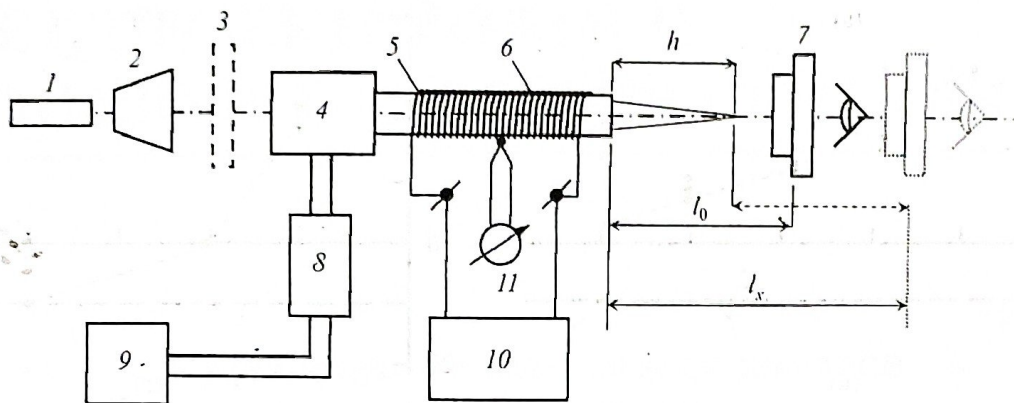


Рис. 2. Схема экспериментальной установки (пояснения в тексте).

эксперимент, имитирующий тепловые условия при лазерном сверлении с принудительным обдувом (рис. 2). Квазипараллельный пучок излучения от лазерного источника (1) расширяется телескопом (2), затем через ослабляющие фильтры (3) и переходник (4) подается соосно на вход кварцевой трубки (5) с намотанной на концевом участке длиной L нагревательной спиралью (6). На выходной торец трубки сфокусирована визуальная измерительная система (7), размещенная на расстоянии l_0 от торца. К переходнику (4) через ротаметр (8) подключен компрессор (9) для прокачки воздуха. Спираль подключена к силовому блоку питания (10). Температура спирали контролируется системой (11), состоящей из термопары и милливольтметра. Работа установки происходит следующим образом. От компрессора воздух через ротаметр подается в переходник (4) и далее проходит через трубку (5) с заданной интенсивностью (интенсивность протока регулируется компрессором, а контроль производится ротаметром). Включается блок силового питания (10) и устанавливается нагрев спирали до заданной температуры с помощью измерительной системы. При достижении квазистационарного режима нагрева участок трубки с длиной нагреваемой части L фокусирует сигнальное излучение в пятно на определенном расстоянии от нагреваемой части. Визуальная оптическая система (7) перемещается вдоль продольной оси до совмещения плоскости фокусировки с плоскостью фокального пятна газовой линзы. В этом положении производится отсчет расстояния l_x между системой (7) и торцом трубки. Величина продольного перемещения системы (7) определяет расстояние h между выходным торцом трубки и фокальным пятном газовой линзы $h = (l_x - l_0)$, которое и использовалось при дальнейшем анализе. Проводилось измерение расстояний h для разных температур нагрева T_n поверхности трубки и разных длин нагреваемой части трубки при фиксированной скорости потока, обеспечивающей ламинарное течение газа и экстремальные оптические характеристики. Результаты измерений приведены на рис. 3. Из

графиков видно, что с ростом температуры нагрева стенки трубки увеличивается оптическая сила наводимой воздушной термолинзы, что проявляется в приближении фокального пятна к передней границе нагреваемой части трубки. К этому эффекту приводит и увеличение длины L нагреваемой части. Из анализа данных следует, что начиная с длины $L = 40$ мм при нагреве в пределах $400-500$ °С расстояние между передней границей нагреваемой части трубки и фокальным пятном составляет примерно 40 мм. Если это так, то для длины $L = 80$ мм мы должны получить на выходе квазипараллельный пучок, а фокальное пятно будет находиться посередине нагреваемого участка. Действительно, в дополнительном эксперименте для температуры 500 °С и длины нагреваемого участка 80 мм из трубки выходил пучок с наименьшими в эксперименте отклонениями фазового фронта от плоского (на расстоянии 450 мм от торца диаметр пятна составил примерно 3 мм при внутреннем диаметре трубки $1,3$ мм). Зафиксированная расходимость излучения является результатом проявления аберраций газовой линзы. Небольшие отклонения в любую сторону от оптимального режима приводили к еще большему увеличению расходимости. Следовательно, эксперименты позволили определить усредненный для всех лучей период синусоидальных траекторий их прохождения в воздушной линзоподобной среде (Λ), который примерно равен 16 см.

Известно, что изменение показателя преломления в линзоподобной среде описывается следующей зависимостью [4]:

$$n(r) = n_0[1 - (1/2)\alpha_0 r^2]. \quad (1)$$

Здесь $\alpha_0 = 2\delta n/n_0 a^2$; n_0 – показатель преломления на оси, δn – перепад показателя преломления между осью и боковой поверхностью, a – внутренний радиус трубки.

Световой луч в такой среде распространяется по синусоиде с периодом

$$\Lambda = 2\pi/\sqrt{\alpha_0}. \quad (2)$$

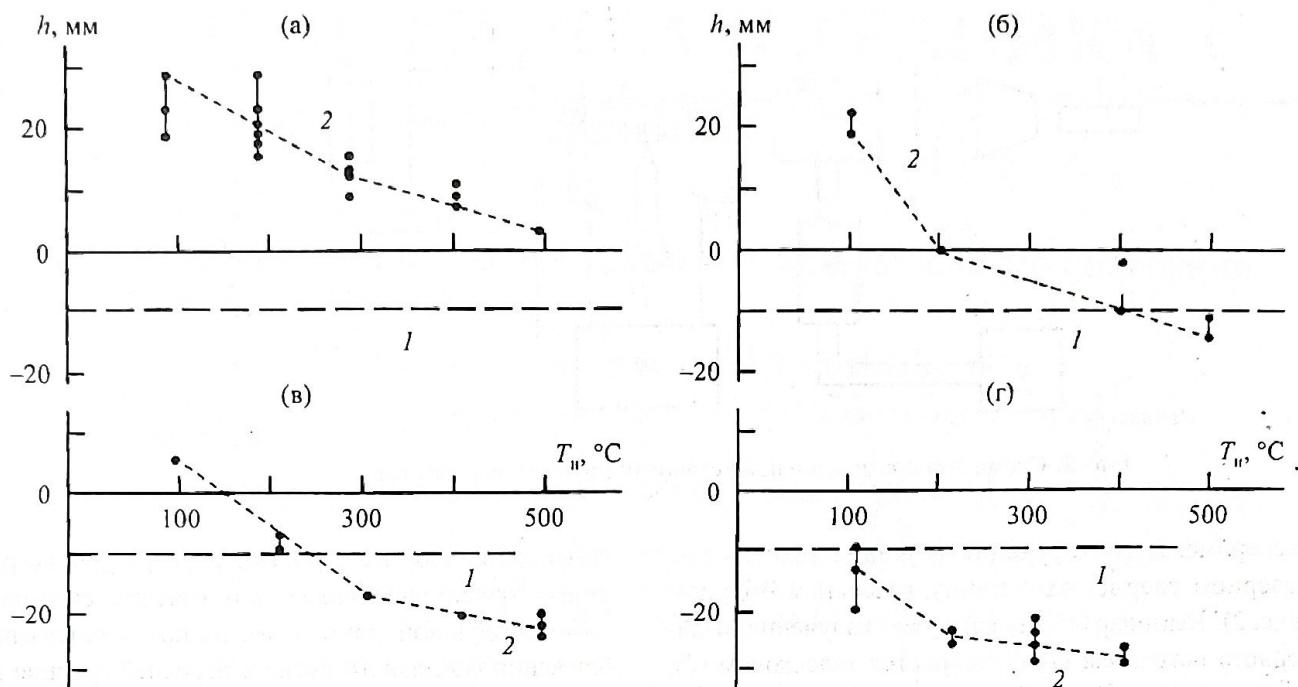


Рис. 3. Зависимости расстояния h между фокальным пятном газовой линзы и выходным торцом трубки от температуры T_w нагрева поверхности (1) для $L = 20$ (а), 40 (б), 60 (в), 75 мм (г). 2 – положение выходной границы нагреваемого участка трубки относительно ее торца.

На основе известного периода из последнего выражения можно определить величину термически наведенного в воздухе перепада показателя преломления

$$\delta n = \left\{ 2\pi a / \left[\Lambda \sqrt{2/n_0} \right] \right\}^2. \quad (3)$$

Подставляя в уравнение (3) значения параметров $a = 0,065$ см, $\Lambda = 16$ см, $n_0 \approx 1$, получаем величину перепада показателя преломления $\delta n = 3,2 \times 10^{-4}$. При таком изменении показателя преломления числовая апертура воздушной линзы составляет величину

$$A = \sqrt{2n_0 \delta n} \approx 0,025.$$

По известному температурному коэффициенту показателя преломления воздуха $dn/dT = 9,27 \times 10^{-7}$ можно оценить эффективный перепад температуры между осью и поверхностным слоем (пренебрегаем температурной зависимостью dn/dT , а значения параметров здесь и далее взяты из работы [3])

$$\delta T = \delta n / (dn/dT) \approx 345 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Оценки показывают, что замена воздуха на газ CO_2 ($n_0 = 1,000417$, $dn/dT = 14,24 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$) при таком пе-

репаде температуры увеличит перепад показателя преломления до $4,9 \times 10^{-4}$ и в результате повысит числовую апертуру наводимой термолинзы до $A = 0,03$.

Мы привели данные для трубки с открытым концом. Отметим, что установка вблизи торца трубки прозрачной для излучения подсветки кварцевой пластины приводит к необходимости увеличения давления в системе для достижения оптимальной скорости потока воздуха. При этом вызываемые пластиной поперечные вихревые потоки воздуха на выходе трубки практически не ухудшают оптику линзы из-за малой длины возмущенной зоны (2–4 мм).

ЛИТЕРАТУРА

1. Мачулка Г.А. Лазерная обработка стекла. М.: Сов. радио, 1979. 136 с.
2. Мартыненко О.Г. и др. Введение в теорию конвективных газовых линз. Минск.: Наука и техника, 1972. 310 с.
3. Маркузе Д. Оптические волноводы. М.: Мир, 1974. 576 с.
4. Кучикян Л.М. Физическая оптика волоконных световодов. М.: Энергия, 1979. 192 с.