

文章编号 1004-924X(2007)01-0027-06

改进的飞秒激光加工微型光波导方法

龚小竞¹, 褚家如¹, 杨建军², 张铁群², 朱晓农²

- (1. 中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230027;
2. 南开大学 现代光学所 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要:分析了垂直式加工中加工区域光强分布不对称的原因,从理论上总结出改进这种不对称的方法。在分析了仅引入单个透镜就能实现这一改进的可行性后,实验验证了这种改进方法。未改进之前加工出的光波导其端口两个方向直径之比为10:1,甚至更高;而改进后的比例则非常接近1:1。通过对光强不对称的改进,该方法有光路简单,无能量损失的优势。

关键词:飞秒激光;垂直式加工;光波导

中图分类号:TN249;TN252 **文献标识码:**A

An improved way for fabricating micro-waveguide by femtosecond laser

GONG Xiao-jing¹, CHU Jia-ru¹, YANG Jian-jun², ZHANG Tie-qun², ZHU Xiao-nong²

(1. Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation,
University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology,
Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: An improved way for fabricating micro-waveguide was presented by analysing the asymmetry of laser intensity distribution in perpendicular fabrication. By incorporating a lens into the system, the improvement of laser intensity distribution was confirmed in experiments. Experimental results show that the ratio of the diameters of the two direction of waveguide's port is more than 10:1 before improvement; the ratio is very close to 1:1 after using the improved method. Comparing with other improvement, this method is superior in simple optical path and no additional energy loss.

Key words: femtosecond laser; perpendicular fabrication; waveguide

1 引言

飞秒激光由于其加工精度高,热影响区小,所以在一些需要超高精度的微加工方面引起了大家

的关注^[1]。1996年,Hirao等人报道了聚焦飞秒激光可诱导透明介质内折射率的增加,并且利用飞秒激光的这种特性加工出微光波导^[2]。自此以后,这种微光学器件的加工方法引起了大家的关注。现在已经利用该方法在多种光学材料中加工

收稿日期:2006-04-22;修订日期:2006-11-18.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 50605061);高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20030358018);光学信息技术科学教育部重点实验室开放课题(No. 2003-25)

出了微光波导^[3,4],微光栅^[5],光纤光栅^[6]等一系列微光学器件。

在飞秒激光加工微光波导的方法中,单点直写的加工方式具有高度的灵活性。这种单点直写的加工方式又可分为垂直式和平行式两种写法(见图 1)。如果是光束入射方向与样品运动方向垂直,称为垂直式加工,加工轨迹如图中黑实线所示;如果是光束入射与样品运动方向一致,称为平行式加工,加工轨迹如图中黑虚线所示。平行式加工出的波导,其端口的中心对称性很好,但是由于受物镜工作距离所限制,不可能做长距离的加工。而垂直式加工的优势是加工路径不受限制,理论上可以加工任意长度,但是往往会出现加工出的波导端口呈狭长状的情况。波导端口的这种狭长的不对称会增大波导的传输损耗,使传输模式变差,影响光波导的使用。综合考虑垂直式加工与平行式加工的各自利弊,理想的加工方式应该是既有垂直式加工的灵活性,又有平行式加工的良好加工结果。目前常用的方法是通过改进垂直式写法来实现这一目的。

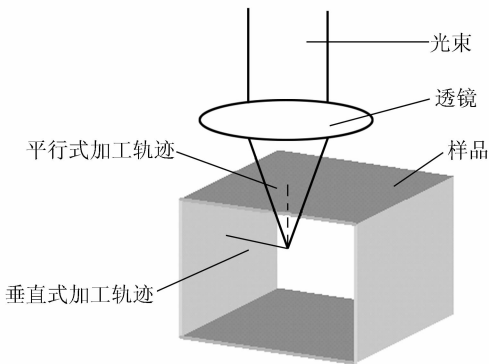


图 1 平行式与垂直式加工比较

Fig. 1 Parallel fabrication vs perpendicular fabrication

加工结果的不对称,实际上是由于在光束与样品材料作用时,其作用部分的光强分布不对称引起的。针对这种不对称的改进,现在主要分为两个研究方向:

一种是利用狭缝光阑对光束矫正。该方法是在透镜后插入狭缝,使光束通过后在某个方向上缩短光束宽度,从而在焦点处使光强分布对称,加工出的光波导端口也对称^[7]。M. Ams 等人使用了宽度为 $500\ \mu\text{m}$ 的狭缝,光束通过后, x 、 y 两个方向上的宽度变为 $3:1$,在这种条件下加工出了

传输性能很好的微光波导,波导的传输损耗降低到 $0.39\ \text{dB}/\text{cm}$ ^[8]。这类方法的优势是光路简单,只需在普通的加工光路中加入一个合适的狭缝光阑,就能取得很好的加工结果。但是该方法会损失大部分能量。在 M. Ams 的工作中,按照 $500\ \mu\text{m}$ 的狭缝计算,狭缝遮挡住的能量在 85% 以上,这是该方法中一个无法避免的缺点。

另一类是通过一个透镜组对光束进行整形^[9]。R. Osellame 等人使用了两个柱透镜和一个物镜的组合。通过调节 x 、 y 两个方向的束腰半径,可以精确地控制焦点处光强的对称性。该方法加工出的光波导也有很好的传输性能,传输损耗在 $0.25\sim 0.4\ \text{dB}/\text{cm}$ 。这种方法对光束对称性的控制精度是比较高的,其加工结果也很理想,但是需要的光学器件多。为了达到高精度的控制结果,也需要各个透镜有高精度的相互配合,实现起来相对较难。

还有其他一些光束整形的方法,例如利用 DOE 元件对焦斑整形^[10]。上述这些方法虽然都能对焦斑进行整形,但是其加工方式都有一些不足之处。考虑到将来商业化的加工要求,不论是大量的能量损耗还是复杂的光路搭建与调节都是不利的因素。本文针对这些情况提出了一种新的方法,在不增加额外能量损耗的条件下,仅引入一个透镜就实现了对光强对称性的改进,并且取得了较好的加工结果。

2 光强分布的理论分析

2.1 不对称的原因

图 2 所示为一高斯光束在焦点附近的情况。光束沿 z 向传播。

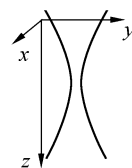
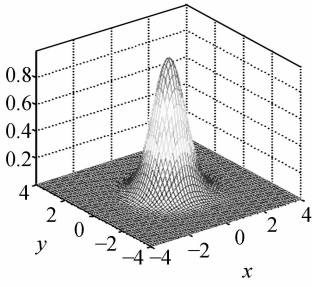


图 2 光束焦点附近光束空间分布

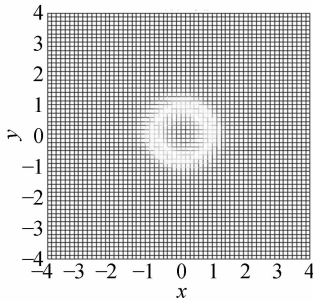
Fig. 2 Space distribution of beam near foci

平行式加工时,光束加工方向也是 z 向。 x 、 y 两方向上光强分布的对称性决定了加工结果的



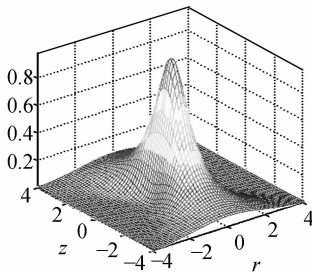
(a) 平行式加工光强的三维分布

(a) Parallel fabricating laser intensity distribution in space



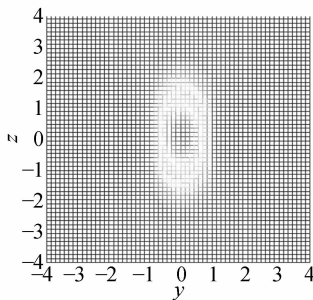
(b) 平行式加工光强的 x-y 平面分布

(b) Parallel fabricating laser intensity distribution in x-y plane



(c) 垂直式加工光强的三维分布

(c) Perpendicular fabricating laser intensity distribution in space



(d) 垂直式加工光强的 y-z 平面分布

(d) Perpendicular fabricating laser intensity distribution in y-z plane

图 3 平行式加工和垂直式加工的光强分布

Fig. 3 Laser intensity distribution in parallel and perpendicular fabrications

对称性。实际上只要保证光束垂直入射透镜,并且引入透镜的光束的束腰为圆形,则 x, y 两个方向上的光强分布相同,即为圆形,如图 3(a), (b) 所示。

而垂直式加工时,加工方向是 x 向,此时由 y, z 两方向上光强分布的对称性决定加工结果。因为通常情况下光强在焦斑半径方向(y 方向)上和瑞利长度方向(z 方向)上的分布是不相等的,所以此加工截面通常为椭圆形,如图 3(c), (d) 所示。

2.2 对称所需的条件

若想使垂直式加工的结果为圆形,则要使 $y-z$ 平面上的光强分布截面为圆形。下面用峰值半高宽法来分析。

高斯光束光强空间分布为:

$$I(r, z) = I_0 \left(\frac{\omega_0}{\omega(z)} \right)^2 \exp \left(-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega^2(z)} \right), \quad (1)$$

在 $z=0$ 时, $\omega(z) = \omega(0) = \omega_0$, 所以 y 方向上的光强分布为:

$$I(y, z)_{z=0} = I_0 \left(\frac{\omega_0}{\omega(0)} \right)^2 \exp \left(-\frac{2y^2}{\omega^2(0)} \right) = I_0 \exp \left(-\frac{2y^2}{\omega_0^2} \right), \quad (2)$$

在 $y=0$ 时, z 方向上的光强分布为:

$$I(y, z)_{y=0} = I_0 \left(\frac{\omega_0}{\omega(z)} \right)^2 \exp(0) = I_0 \left(\frac{\omega_0}{\omega(z)} \right)^2,$$

其中 $\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{Z_0} \right)^2}$,

即

$$I(y, z)_{y=0} = I_0 \left[\frac{\omega_0}{\omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{Z_0} \right)^2}} \right]^2 = I_0 \frac{1}{1 + \left(\frac{z}{Z_0} \right)^2}, \quad (3)$$

上两式中, ω_0 为焦斑半径, Z_0 为瑞利长度。由式 (2) 可得, y 方向上的光强半高 $\frac{I_0}{2} = I(y, z)_{z=0} = I_0 \exp \left(-\frac{2y^2}{\omega_0^2} \right)$, 可得 y 方向半高的宽度为 $W_{y(\frac{I_0}{2})} = \sqrt{\frac{\ln 2}{2}} \omega_0 |_{z=0}$; 由式 (3) 可得, z 方向上的光强半高 $\frac{I_0}{2} = I(y, z)_{y=0} = I_0 \frac{1}{1 + \left(\frac{z}{Z_0} \right)^2}$, 可

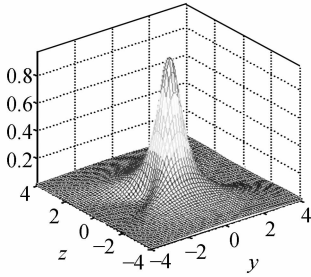
得 z 方向半高的宽度为 $W_{z(\frac{I_0}{2})} = Z_0 |_{y=0}$ 。若要是这两个方向光强分布相等,则是 $W_{z(\frac{I_0}{2})} = W_{y(\frac{I_0}{2})}$, 可得一个关于瑞利长度和焦斑半径的比值

$$K = \frac{Z_0}{\omega_0} = \sqrt{\frac{\ln 2}{2}} = 0.5887, \quad (4)$$

不妨设 $\omega_0 = 1$, 则 $Z_0 = 0.5887$, 将此代入(1)式, 可得

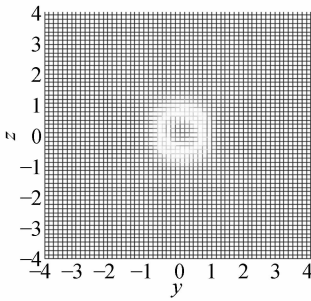
$$I(r, z) = \frac{I_0}{1 + \left(\frac{z}{0.5887}\right)^2} \exp\left[-\frac{2r^2}{1 + \left(\frac{z}{0.5887}\right)^2}\right],$$

则其对应的光强空间分布如图 4 所示。



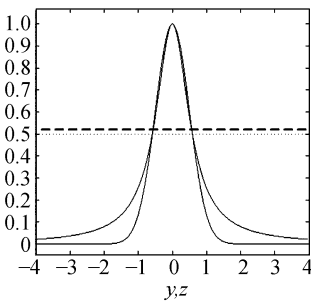
(a) 光强 3D 分布图

(a) Laser intensity 3D distribution



(b) 光强 2D 分布图

(b) Laser intensity 2D distribution



(c) y, z 方向光强分布包络线

(c) Intensity distribution envelope line in y, z directions

图 4 光强空间分布

Fig. 4 Laser intensity spatial distribution

从图中可以看出其光强分布的对称性确实大为改观。且在 $\frac{I_0}{2}$ 以上, 光强在两个方向上的分布

基本为 1 : 1。

所以我们得出结论, 只要使焦点处的光束满足瑞利长度 Z_0 和焦斑半径 ω_0 的比值 K 为 0.5887, 即可实现焦点处光强分布的对称。

3 增加透镜改进光强分布的可行性分析

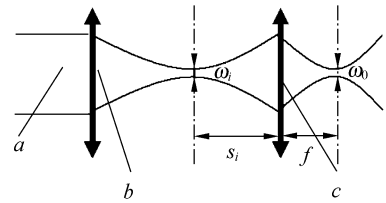
对显微镜, 在光束平行入射且充满透镜的条件下, 其聚焦焦斑半径应为 $\omega_0 = \frac{\lambda}{n \cdot \pi \cdot NA}$

(n 为加工材料的折射率), $Z_0 = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda_2} = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda/n}$, 则

$$K = \frac{Z_0}{\omega_0} = \frac{\pi \omega_0}{\lambda/n} = \frac{1}{NA}. \text{ 若要使 } K = 0.5887, \text{ 则}$$

$NA = 1.6986$, 对于一般的显微镜很难达到这么高的 NA 值。实际上, 即使使用 60 倍的透镜, 其 $NA = 0.85$, 对应的 $K = 1.1765$, 依然远大于 0.587 的条件。

对此, 采用了在加工透镜前增加一个预聚焦透镜的办法, 如图 5 所示。



(a) 光束; (b) 预聚焦透镜; (c) 加工透镜

(a) laser beam; (b) pre-focus lens; (c) fabricating lens

图 5 加入预聚焦透镜的加工示意图。 ω_i 为预聚焦后的焦斑半径, s_i 为预焦点与加工透镜间的距离, ω_0 为加工透镜聚焦后的焦斑半径, f 为加工透镜的焦距。

Fig. 5 Sketch map of fabricating setup with plus pre-focus lens. ω_i is the foci radius after pre-focus, s_i is the distance between pre-focus foci and fabricating lens, f is the focus length of fabricating lens

经过预聚焦透镜的第一次聚焦以后, 光束再次被加工透镜聚焦时, 得到 $\omega_0 \cong \frac{\omega_i \cdot f}{n s_i - f}$, 带入式(4), 得到

$$K = \frac{Z_0}{\omega_0} = \frac{\pi \omega_0}{\lambda_2} = \frac{\pi \left(\omega_i \frac{f}{n s_i - f}\right)}{\lambda}, \quad (5)$$

在确定了加工透镜和预聚焦透镜以后,此式

中的 f 和 ω_i ($\omega_i = \frac{\lambda}{n \cdot \pi \cdot NA_{pre}}$) 也随之确定,则

K 只与 s_i 有关。

根据此式作出 K 关于 s_i 的曲线,如图 6 所示。

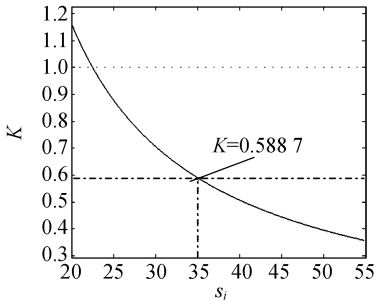


图 6 K 与 s_i 的关系曲线

Fig. 6 Relationship between K and s_i

由图看出,在 s_i 达到某一个值以后, $K < 1$; 而进一步增加 s_i , 可以使 K 达到 0.5887。所以采用这种引入单个预聚焦透镜的办法,理论上是可以使光强分布对称的。

4 实验部分

加工使用的飞秒激光器是美国光谱物理 (Spectra Physics) 公司生产的掺钛蓝宝石固体飞秒激光放大器 Spitfire。该激光器最大平均输出功率为 2 W, 中心波长 800 nm, 最小脉宽为 55 fs, 重复频率 1 kHz。三维精密调整台是 New Port 公司的 ESP300 系列, 其最小分辨率为 0.1 μm 。实验中注入的能量通过对激光器的泵浦光源的功率调节和一个插入光路的线性衰减片来控制, 其实际大小通过在物镜之前放入的功率计来测量。在单脉冲 1 μJ , 60 fs 的条件下, 焦点处的功率密度可达到约 $70 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 。加工材料选取的是光学玻璃 K9, K9 是光学系统中的重要光学材料, 研究飞秒激光在 K9 上的加工特性有一定的实际参考意义。实际样品为 25 mm \times 15 mm \times 7.5 mm 的块状材料, 四面抛光。

在实际加工中, 试验了三种透镜组合, 采用的参数如表 1 所示。

表 1 实验参数

Tab. 1 Experiment parameters

| 组合参数 | 预聚焦透镜 | | 加工透镜 | | | 激光波长 | $K=0.5887$ |
|-------|-------|------|------|------|--------|-------------------|---------------|
| | 放大倍率 | 数值孔径 | 放大倍率 | 数值孔径 | 焦距(mm) | | |
| No. 1 | 4X | 0.1 | 40X | 0.65 | 4.5 | 0.8 μm | $s_i=81.0065$ |
| No. 2 | 10X | 0.25 | 40X | 0.65 | 4.5 | | $s_i=35.1026$ |
| No. 3 | 10X | 0.25 | 60X | 0.85 | 2.9 | | $s_i=22.6217$ |

受夹具长度限制, 实验中的 s_i 长度范围只能在 35~80 mm。在这种条件下, 实际采用的 s_i 为: 4X + 40X 透镜, $s_i = 80 \text{ mm}$; 10X + 40X, $s_i = 35 \text{ mm}$; 10X + 60X, $s_i = 35 \text{ mm}$ 。此时 K 分别等于 0.5965, 0.5906, 0.3617。在此三种条件下, 模拟的加工区域光强分布与加工出的波导端口如图 7 所示。

通过实验结果可以看出: 在 $K = 0.59$ (图中左边两组) 附近, 首先光强的对称性有了很大改进, 同时波导端口的对称性也随之变得很好, 两个方向长度基本接近 1:1, 和平行式加工的结果近似。所以这种引入单个透镜的方法确实可以改进垂直式加工的结果。同时可以观察到, 在 K 继续减小 (图中右边一组, $K = 0.3617$) 的情况下, 不

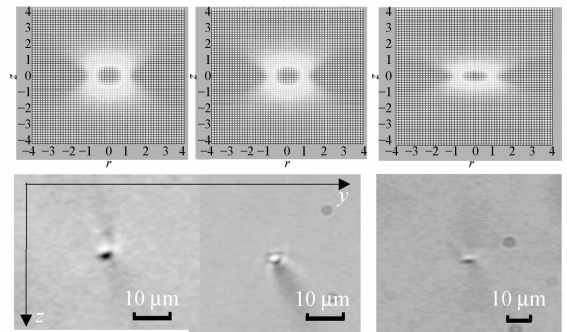


图 7 上排是模拟光强分布, 下排是实际加工结果, 左边两组为 $K=0.5965$ 和 0.5906 , 其加工结果对称性比较好, 右边一组为 $K=0.3617$, 其加工结果为另一个方向的不对称性。

Fig. 7 Pictures in top row show the simulating results of laser intensity distribution, the pictures in bottom row show the fabricating results. The two groups on left show the results with $K=0.5965$ and 0.5906 . The K is 0.3617 of right one, which shows the asymmetry grows on the other direction

对称性有向另一个方向发展的趋势,即由原来的 z 方向长度远大于 y 方向长度,转变为 y 方向大于 z 方向。这说明要实现光强的对称, K 值必须在一个合适的范围之内,大于或小于这个值都会带来不对称,只是不对称的方向会发生变化。

5 结 论

本文首先从理论上分析了飞秒激光垂直式加工时其加工区域光强分布情况,进而提出以焦点瑞利长度和焦斑半径的比值为参数来判断光强分布对称性。并以此为基础,分析了利用增加单个

透镜对光束的预聚焦来改变这一比值的可行性。我们在实验中实现了用该方法对该比值的改变,实验结果与前面提出的理论符合得很好,并且达到了改进加工出的光波导端口对称性的目的,波导端口两个方向直径之比接近 1:1,取得了较好的加工结果。

此种经过改进的加工方式通过对光束的整形,实现了光强分布的对称性,从而使加工出的光波导端口具有良好的对称性,改善了垂直式加工的结果。该方式相对以往的改进方案具有实现简单,无额外能量损耗的特点,对飞秒激光加工光波导等微光学器件具有一定的实际意义。

参考文献:

- [1] 蒋中伟,袁大军,祝安定,等. 双光子三维微细加工技术及实验系统的开发[J]. 光学 精密工程,2003,11(3): 234-238.
JIANG Z W, YUAN D J, ZHU D A, *et al.*. 2-photon 3-D microfabrication technology and its experimental system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(3):234-238. (in Chinese)
- [2] DAVIS K M, MIURA K, SUGIMOTO N, *et al.*. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser [J]. *Opt. Lett.*, 1996, 21: 1729-1731.
- [3] NOLTE S, WILL M, BURGHOFF J, *et al.*. Femtosecond waveguide writing: a new avenue to three dimensional integrated optics [J]. *Appl. Phys. A*, 2003, 77: 109-111.
- [4] RICHARDSON M, ZOUBIR A, RIVERO C, *et al.*. Femtosecond laser micro-structuring and refractive index modification applied to laser and photonic devices [J]. *SPIE*, 2004, 5347: 18-26.
- [5] LI Y, WATANABE W, YAMADA K, *et al.*. Holographic fabrication of multiple layers of grating inside soda-lime glass with femtosecond laser pulses [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 80: 1508-1510.
- [6] KONDO Y, NOUCHI K, MITSUYU T. Fabrication of long-period fiber gratings by focused irradiation of infrared femtosecond laser pulses [J]. *Opt. Lett.*, 1999, 24: 646-648.
- [7] CHENG Y, SUGIOKA K, MIDORIKAWA K, *et al.*. Control of the cross-sectional shape of a hollow microchannel embedded in photostructurable glass by use of a femtosecond laser [J]. *Opt. Lett.*, 2003, 28: 55-57.
- [8] AMS M, MARSHALL G D, SPENCE D J, *et al.*. Slit beam shaping method for femtosecond laser direct-write fabrication of symmetric waveguides in bulk glasses [J]. *Opt. Express*, 2005,13: 5676-5681.
- [9] OSELLAME R, TACCHEO S, MARANGONI M, *et al.*. Femtosecond writing of active optical waveguides with astigmatically shaped beams [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, 20: 1559-1567.
- [10] 李凤友,李红军,卢振武,等. 激光直写系统焦斑整形的研究 [J]. 光学 精密工程,2001,9(1): 14-18.
LI F J, LI H J, LU Z W, *et al.*. Focused spot shaping in laser writing system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(1):14-18. (in Chinese)

作者简介:龚小亮(1978—)男,安徽合肥人,博士研究生,现就读于中国科学技术大学精密机械与精密仪器系,主要研究方向为飞秒激光在微光学器件加工上的应用研究。E-mail: nickle@ustc.edu