文章编号:1001-5078(2014)11-1207-06

·激光应用技术 ·

飞秒激光加工光波导的工艺与传输特性研究

王少清^{1,2},孙小燕^{1,2},夏国才^{1,2},罗 志^{1,2} (1. 中南大学机电工程学院,湖南长沙410083; 2. 中南大学高性能复杂制造国家重点实验室,湖南长沙410083)

摘 要:利用飞秒激光横向直写方式加工光波导,采用散射光测量法分析了光波导的传输 损耗。为了提高光波导的传输性能,分析了不同数值孔径的聚焦物镜、加工速度和加工能 量对光波导传输损耗的影响。实验结果表明,聚焦物镜数值孔径为 0.25,激光功率为 6 mW,加工速度在 45~60 μm/s 时,飞秒激光加工的光波导具有较好的传输性能,其传输 损耗低于-0.2 dB/cm。

关键词:飞秒激光;光波导;传输损耗;数值孔径 中图分类号:TN255 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2014.11.006

Research on process parameters and transmission properties of optical waveguide fabricated by femtosecond laser

WANG Shao-qing^{1,2}, SUN Xiao-yan^{1,2}, XIA Guo-cai^{1,2}, LUO Zhi^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;2. State Key Laboratory of High Performance Complex Manufacturing, Changsha 410083, China)

Abstract: In this paper, optical waveguides were written by transverse scan of femtosecond laser. Scattered light measurement method was used to measure waveguide transmission loss. In order to improve the transmission performance of optical waveguide, the influence of focusing lens, processing speed and energy of the different numerical aperture on the transmission loss of optical waveguides was analyzed. Experimental results show that, when the numerical aperture of the focusing lens is 0.25, the laser power is 6 mW, processing speed is about 45 ~ 60 μ m/s, the transmission loss of written optical waveguide is below -0.2 dB/cm.

Key words: femtosecond laser; optical waveguide; transmission loss; numerical aperture

1 引 言

1996年,飞秒激光首次被证实能够在透明介质 内部制备光波导^[1],随后国内外进行了广泛的研 究。光波导可以通过基质表面沉积、表面构造以及 内部构造得到^[2-4],与紫外曝光、离子扩散、离子/中 子注入、离子/中子交换等其他成熟的制作工艺相 比^[5-7],飞秒激光制作光波导在室温环境下进行,过 程简单,可以实现三维沟道波导的制作,稳定性较 好,这对于制作高集成度、高复杂度和低成本的光波 导器件具有重要应用价值。

在波导制备中,影响光波导质量的主要因素是

加工工艺参数和材料自身性能。虽然目前已有较多 关于波导制作方式及波导传输损耗测量的研 究^[8-11],但对于加工工艺参数对波导损耗的影响未 进行更深入的研究,而波导的光学损耗是衡量其质 量高低的重要指标。因此深入探讨波导结构及参数 与损耗的关系是至关重要的,它可以为设计和制造

基金项目:国家 973 项目(No. 2011CB013000)和国家自然科学基金项目(No. 91123035, No. 90923030, No. 51005250)资助。

作者简介:王少清(1986-),男,硕士生,研究方向为飞秒激光微 纳加工。E-mail;csuwsq@qq.com

收稿日期:2014-04-17:修订日期:2014-04-26

性能优良的光波导提供理论指导。

光波导的损耗主要包括耦合损耗和传输损耗。 其中传输损耗直接反映了加工制备波导方法的效率 和质量,因而有较高的研究价值和意义。本文将采 用散射光测量方法^[12-14],研究不同加工参数下波导 的损耗情况,获得波导传输损耗最优化的加工工艺 参数。

2 实 验

实验加工系统如图1所示,系统采用由美国光 谱物理(Spectra Physics)公司生产的掺钛蓝宝石固 体飞秒激光放大器,该激光器最大输出功率为 4 W,中心波长为800 nm,脉冲持续时间为120 fs, 重复频率1 kHz。采用圆形渐变滤光片对激光能 量进行调整,为了避免球差的影响^[15],聚焦深度均 为融石英上表面以下 300 µm,同时为了得到更好 的光斑形状,针对不同数值孔径的物镜,引入了 300~350 µm 的狭缝对聚焦光斑进行光束整 形^[16],使横向直写光波导的截面为对称圆形,狭缝 方向平行于波导光路方向。在加工方向两端分别 安放 CCD 和光源,用于观察激光聚焦点的光斑形 状、位置以及融石英上表面位置,达到对加工深度 的精确控制,同时也为后期波导的耦合提供定位 支持,并采集波导端面输出模场图像。实验采用 的 He-Ne 激光器光源波长为 632.8 nm, 能量 2 mW,采用直接聚焦耦合的方式,将 He-Ne 激光 通过物镜直接聚焦到波导端面,通过电脑控制三 维运动平台,以He-Ne 激光传输末端 CCD 采集到 的波导输出模场图像为参考对加工波导光路进行 精确耦合。将采集到波导散射的图像通过 Matlab 进行图像处理,获得波导的传输损耗。



Fig. 1 Schematic diagram of optical waveguide processing and the coupling system

3 实验结果与分析

飞秒激光横向直写融石英加工波导光路的过程 中,聚焦物镜的数值孔径、激光的平均功率和扫描速 度都会对波导的加工质量带来不同程度的影响。实验主要通过改变波导加工过程中聚焦物镜的数值孔径、扫描速度和激光功率等方面的参数加工出光波导,并进行耦合和损耗计算。

3.1 不同数值孔径的聚焦物镜对波导传输损耗的 影响

数值孔径是物镜的重要参数,其大小直接决定 着物镜的聚焦特性。实验使用数值孔径为 0.25、 0.4 和 0.6 的物镜,当激光的平均功率为 6 mW,扫 描速度取 50 μm/s 时,加工出来的光波导耦合情况 如图 2 所示。



图 2 不同数值孔径物镜加工光波导的耦合情况 Fig. 2 The coupling situation of optical waveguide fabricated by objective lens in different numerical aperture

从图 2 中可以看出,随着数值孔径的增大,光波 导耦合的输出模场效果逐步下降,波导的衍射现象 越加明显^[17]。同时,由图 3 可知,光波导的传输散 射也越来越明显,此时测得光波导的宽度分别为 34 μm、22 μm 和 14 μm。



图 3 不同数值孔径物镜加工光波导的散射情况 Fig. 3 The scattering situation of optical waveguide fabricated by objective lens in different numerical aperture

一般认为,材料的加工阈值和烧蚀阈值是由飞 秒激光的峰值强度所决定的^[18],当激光峰值强度高 于加工阈值时,激光就会与融石英发生作用,引起材 料的改性。当峰值强度继续增大,高于材料的烧蚀 阈值时,材料将出现烧蚀损坏现象。目前大多数激 光器发出的光束形状都服从高斯强度分布,其峰值 强度一般只考虑强度分布在强度截面 1/e² 范围内 的光束,即只对波束腰范围内的光束进行分析,其峰 值强度可以表示为:

$$I_{peak} = \frac{4 \sqrt{\pi \ln 2}}{\lambda^2} \cdot \frac{P}{\tau \cdot f_q} \cdot \frac{\mathrm{NA}^2}{1 - \mathrm{NA}^2} \tag{1}$$

其中, P 是激光功率; τ 是飞秒激光的脉宽的半峰全 宽(FWHM); f_a 是激光的重复频率; NA 是聚焦物镜

的数值孔径,由式(1)可知,随着数值孔径的增大, 激光的峰值光强也迅速增强。如图4所示,波导的 传输损耗和峰值光强之间的保持基本一致的增减 关系。



图 4 不同数值孔径下激光的峰值强度和波导传输损耗 Fig. 4 The peak intensity of laser and transmission loss of waveguide fabricated in different numerical aperture

实验中激光加工速度的改变,可视为激光单脉 冲作用的重复频率,即单位时间上激光加工的脉冲 数。激光的峰值能流密度可以表示为其峰值光强与 加工脉冲数和激光脉冲宽度的乘积,即:

$$E_{peak} = \frac{8P \sqrt{\ln 2}}{v\lambda \sqrt{\pi}} \cdot \frac{NA}{\sqrt{1 - NA^2}}$$
(2)

其中, p 是激光平均功率; ν 是激光的加工速度; λ 是激光波长; NA 是物镜的数值孔径。根据公式 (2),当物镜数值孔径 0.25,激光平均功率 7 mW,激 光加工速度 40 μ m/s 时,激光峰值能流密度为 2.08 × 10⁴ J/cm²; 数值孔径 0.4,激光平均功率 6 mW,加工速度 60 μ m/s 时,激光峰值能流密度为 2.04 × 10⁴ J/cm²; 数值孔径 0.6,激光平均功率 5 mW,加工速度 90 μ m/s 时,激光峰值能流密度为 2.02 × 10⁴ J/cm²。此时三组不同加工参数中飞秒激 光作用于融石英上的峰值能流密度十分接近,得到 的实验结果如图 5 所示。



图 5 相同峰值能量密度不同数值孔径加工的光波导的耦合情况 Fig. 5 The coupling situation of waveguide fabricated at same peak energy density and different numerical aperture 由图 5 可见,虽然作用在融石英上的峰值能 流密度相同,但是波导输出模场和散射情况却大 不相同。随着数值孔径的增大,波导端面形状逐渐由对称圆变成其他不规则形状,波导表面的散射也更加明显,如图 6 所示,此时测得其传输损耗分别为 - 0.5015 dB/cm、- 1.0256 dB/cm和 - 1.3446 dB/cm。



图 6 相同峰值能量密度不同数值孔径加工的光波导的散射情况 Fig. 6 The scattering situation of waveguide fabricated at same peak energy density and different Numerical aperture 当物镜的数值孔径为 0.4 时,实验采用功率为

5 mW、6 mW 和 7 mW 的激光分别对融石英进行加工。激光功率为 7 mW 时,加工的光波导散射与 5 mW 和 6 mW 时相比明显增强,如图 7 所示。



by objective lens with 0.4 numerical aperture

由图 7 可知,当物镜数值孔径 0.4,激光功率为 7 mW 时,波导的散射光明显增强,传输损耗迅速增 大。此时飞秒激光的峰值能量密度为 4.78 × 10⁴ J/cm²,可见此能流密度接近融石英的烧蚀 阈值。

实验加工系统采取了狭缝对聚焦光斑进行整 形,激光通过狭缝时大部分的能量都被挡在狭缝上, 增大激光的输出功率将造成大量的能量损耗。在加 工光波导的过程中,激光平均功率的调节范围为 5~10 mW,当物镜的数值孔径为0.15 时,在能量范 围内均不能制作出可进行光传输的波导。根据公式 (1),加大激光的输出功率可以提高其峰值强度以 达到加工的目的。经计算,数值孔径为0.25 的物 镜,当激光功率为6 mW 时,其峰值强度为3.0743 × 10¹⁵ W/cm²,对于数值孔径为0.15 的物镜,要达到 相同的峰值强度,激光的输出功率最小要达到 17 mW。因此数值孔径为0.25 的聚焦物镜比较符 合实验系统要求,加工的光波导截面为对称圆形,输 出模场清晰,传输损耗较低。

3.2 不同的扫描速度对波导传输损耗的影响

为了便于观察和检测,实验采用数值孔径 0.25 的聚焦物镜,当激光平均功率为8 mW 时,加工速度 为 30 μm/s 到 80 μm/s,步进 10 μm/s,采集到的耦 合图片如图 8 所示。



图 8 不同加工速度下波导的耦合情况

Fig. 8 The coupling situation of waveguide fabricated at different speed

从图可看出,波导输出模场已经基本一致,光传 输质量较好,其中 30 μm/s 和 40 μm/s 加工的波导 截面形状较之其他几组显得不够圆,并有微弱的衍 射现象。随着加工速度的增加,散射光强逐渐减弱, 如图 9 所示。



图9 不同加工速度下波导的散射情况

Fig.9 Scattering situation of waveguide written at different speed 利用 matlab 对图 9 的六组图片进行处理,同时 根据公式(2),可得到不同速度下波导的传输损耗 与激光峰值能流密度的关系如图 10 所示。





其中,点实线是光波导的传输损耗,虚线是不同 速度下激光的峰值能流密度。从图中点实线可以看 出,随着扫描速度的增加,激光的峰值能流密度逐渐 减少,并与波导的传输损耗减小方向基本一致,当扫 描速度大于50 μm/s时,波导的传输损耗较小,达到 -0.4786 dB/cm,此时激光的峰值能流密度为 1.94×10⁴ J/cm²。

由此可见随着扫描速度的变化,波导的传输损 耗发生变化。在加工物镜数值孔径比较小的情况 下,激光的加工速度在大于50 μm/s时,能加工出损 耗较小的波导,考虑到光波导加工的效率和更小能 量加工的效果,实验系统选取45~60 μm/s为最佳 加工速度。

3.3 不同的加工能量对波导传输损耗的影响

随着加工能量的增加,波导传输损耗也逐步增加。为了进一步探讨其增加规律,实验采用数值孔径0.25 的聚焦物镜,当激光加工的速度为50 μm/s时,通过改变激光的输出功率,可以得到如图11 所示的耦合情况。



图 11 不同加工能量下波导的耦合情况

Fig. 11 The coupling situation of waveguide fabricated in different energy

由图 11 可知,激光功率为4 mW 时,融石英端 面未能观测到波导的输出模场。激光平均功率为 5 mW 时,波导端面输出模场效果较差,波导表面的 散射不明显,无法采集到散射图像(如图 12 所示)。 激光功率为6 mW 和7 mW 时波导端面形貌较圆, 随着能量的增加,激光的峰值强度逐渐变大,波导端 面形貌逐步变差,传输损耗也逐渐增加。由此可推 测出平均功率为5 mW,扫描速度为 50 μm/s 时激 光的峰值能流密度接近于融石英的加工阈值,为 1.21 × 10⁴ J/cm²。



图 12 不同加工能量下波导的散射情况

Fig. 12 Scattering situation of waveguide fabricated in different energy

激光加工过程中,不同材料对激光的加工及 烧蚀阈值都不同,同种材料也会因加工方式或纯 度不同引起阈值的波动。本实验所采用的融石 英,当激光平均功率在6 mW 左右时加工的波导光 路截面呈对称圆,其耦合时波导端面的输出模场 较理想,传输损耗低于 - 0.2 dB/cm。如图 13 所 示,由实验数据拟合可知,当物镜的数值孔径为 0.25,激光加工速度为 50 µm/s,激光功率在 5 ~ 11 mW 范围内,可加工出传输损耗小于 - 1 dB/cm 的光波导。



Fig. 13 Transmission loss of waveguide fabricated in different energy 4 结论

本文首先利用飞秒激光横向直写方式加工光 波导,并使用不同数值孔径的聚焦物镜,通过改变 激光的能量和扫描速度加工光波导,采用散射光 测量方法分析了波导的传输损耗。实验结果表明 材料的加工阈值为1.21×10⁴ J/cm²,烧蚀阈值为 4.78×10⁴ J/cm²。当激光功率为6 mW,物镜数值 孔径为0.25时,要达到材料的加工阈值,激光的 加工速度最大可达到 60.14 µm/s。当激光的峰值 能流密度未达到融石英的加工阈值时,波导几乎 不能通光,此时损耗可视为很大。当激光峰值能 流密度在融石英加工阈值和烧蚀阈值之间时,小 数值孔径的聚焦物镜能加工出输出模场较好,散 射光强较弱的光波导。实验表明聚焦物镜数值孔 径 0.25, 激光平均功率在 6 mW 左右, 加工扫描速 度在45~60 μm/s 范围内时,可以加工出传输损 耗低于-0.2 dB/cm 的光波导。当激光加工速度 为50 µm/s,激光功率在5~11 mW 范围内,可加 工出传输损耗小于 -1 dB/cm 的光波导。当激光 峰值能流密度超过材料的烧蚀阈值时,散射光强 大幅度增大,无法正常传输 He-Ne 激光。

实验研究分析了飞秒激光直写加工波导光路 的参数与传输损耗的关系,探索出加工光波导的 优化参数,对于设计和制造性能优良的光波导有 较好的参考价值。

参考文献:

- KM Davis, K Miura, N Sugimoto, et al. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser[J]. Optics letters, 1996, 21 (21):1729 - 1731.
- [2] GAO Fei, YUANG Xiao, CHENG Guanghua, et al. Applications of femtosecond laser micromachining[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 33 (Suppl): 415 - 418. (in Chi-

nese)

高飞,袁孝,程光华,等.飞秒激光在微加工中的应用 [J].光子学报,2006,33(Suppl),415-418.

- [3] NOLTE S, WILL M, BURGHOFF J, et al. Femtosecond waveguide writing a new avenue to three dimensional integrated optics[J]. A p pl. Phys. A, 2003, 77:1092111.
- [4] LI Shiling, YE Yongkai. Development of femtosecond laser direct writing waveguides in transparent optical materials[J]. Laser Technolgy, 2012, 36(6):783 - 787. (in Chinese)

李士玲,叶永凯.飞秒激光直写透明光学材料光波导的研究进展[J].激光技术,2012,36(6):783-787.

- [5] R R Thomson, S Campbell, I J Blewett, et al. Active waveguide fabrication in erbium-doped oxyfluoride silicate glass [J]. Applied Physics Letters, 2005, 87:121102.
- [6] YU Xiantong, WANG Wenjun, LIU Yunlong, et al. Preparation and properties of an organic polymer waveguide
 [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(4): 417 421. (in Chinese)
 俞宪同,王文军,刘云龙,等. 一种有机聚合物光波导的制备及性能研究[J]. 激光与红外, 2012, 42(4): 417 421.
- [7] CHEN Hao. Development of planar waveguide materials
 [J]. Information technology, 2010, 3:175 178. (in Chinese)
 陈昊.平面光波导器件的发展[J]. 信息技术,2010, 3:175 178.
- [8] Osellame R, Taccheo S, Marangoni M, et al. Femtosecond writing of active optical waveguides with astigmatically shaped beams [J]. J. Opt. S oc. A m. B, 2003, 20:155921567.
- [9] GAO Yu,LIAO Jinkun, YANG Yapei, et al. Measurement methods of optical waveguide propagation loss of polymer thin films[J]. Laser & Infrared, 2006, 36(9) 844 846. (in Chinese)
 高宇,廖进昆,杨亚培,等. 有机聚合物薄膜光波导传输损耗的测量方法[J]. 激光与红外,2006,36(9): 844 846.
- [10] M Rochat, M Beck, J Faist, et al. Measurement of far-infrared waveguide loss using a multisection single-pass technique[J]. Applied Physics Letters, 2001.
- [11] JIA Zhenhong. The fabrication of porous silicon channel waveguides and measurement of its propagation loss[J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(3): 311 313. (in Chinese)
 贾振红. 多孔硅通道型光波导的制备及传输损耗的

测量[J]. 光子学报,2003,32(3):311-313.

- [12] Kapron F P, Keck D B, Maurer R D. Radiation losses in glass optical waveguides [J]. Appl. Phys. Lett., 1970, 17 (10):423-425.
- [13] JIA Linghua, QIU Feng, QIAN Ying, et al. Digital camera photographing in measuring propagation loss properties of Ion-exchange planar optical waveguides [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(5):1058 - 1061 (in Chinese) 贾凌华,邱枫,钱颖,等. 数码照相法测量离子交换平 面光波导损耗特性[J]. 光子学报, 2009, 38(5): 1058 - 1061.
- [14] LIANG Yulei. Measurement of slab optical waveguide losses[D]. Changchun: Jilin University, 2004. (in Chinese)
 梁宇雷.平面光波导损耗测试[D].长春:吉林大 学,2004.
- [15] LIU Dayong. Study on thresholds for femtosecond laser three dimensional micromachining of silica glass and its application [D]. Beijing: Peking University, 2008. (in

Chinese)

刘大勇.石英玻璃中飞秒激光三维加工阈值的研究 及其应用[D].北京:北京大学,2008.

- [16] XIA Guocai, SUN Xiaoyan, DUAN Ji'an. Beam shaping technologies for efficiency laser fabrication [J]. Laser & Optoelectrionics Progress, 2012, 49 (10): 10000. (in Chinese)
 夏国才,孙小燕,段吉安.用于实现激光高效率加工的光束整形技术[J].激光与光电子学进展,2012,49 (10):100002.
- [17] CHEN Lei. Research and fabrication of waveguide in sapphire with femtosecond laser pulses[D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese) 陈磊.利用飞秒激光在蓝宝石内制备光波导的研究 [D]. 长春:吉林大学, 2009.
- [18] Haruna M, Segawa Y, Nishihara H. Nondestructive and simple method of optical waveguide loss measurment with optimization of end-fire coupling [J]. Electronics Letters, 1992,28(17):911-912.