

文章编号: 1001-3806(2010)04-0433-03

激光诱导等离子体加工石英微通道的研究

冯彩玲, 王海旭, 秦水介*

(贵州大学 贵州省光电子技术及应用重点实验室, 贵阳 550025)

摘要: 为了在熔融石英基体内制作出高质量的微通道, 分别用调 Q 的 Nd:YAG 脉冲激光器输出的基频光(1064nm)和经过倍频晶体后的混合光(倍频光为 70%, 基频光为 30%)辐照熔融石英玻璃, 通过诱导等离子体加工微通道, 并初步分析了基频光与混合光加工产生差别的原因。结果表明, 用混合光加工的通道内壁较光滑, 加工速度快, 所加工的通道最深达 8mm。

关键词: 激光技术; 微通道; 激光诱导等离子体; 熔融石英

中图分类号: TG664 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2010.04.001

Research of the fabrication of micro channels in a fused silica substrate using laser-induced plasma

FENG Cai-ling, WANG Hai-xu, QIN Shui-jie

(Key Laboratory of Photoelectron Technology and Application, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to fabricate high-quality micro channels in a fused silica, the fundamental frequency laser of a Q -switched Nd:YAG laser at 1064nm and the mixing laser composed of 70% second harmonic laser and 30% fundamental frequency laser were used to irradiate a fused silica substrate respectively to induce the plasma, by which micro channels in a fused silica substrate were fabricated. And the reasons for difference between two kinds of processing methods were analyzed. The results show that the interior wall of the channels processed by mixing laser are smoother and its drilling rate is faster than that processed by fundamental frequency. Furthermore, the depth of the channels processed by the mixing laser is up to 8mm.

Key words: laser technique; micro-channel; laser-induced plasma; fused silica

引言

微通道是微机电系统(micro electronic mechanical system, MEMS)研究和开发所必需的重要微结构之一, 已经被广泛地应用于生物芯片、微型传感器、微执行器、微光电子器件等多个领域^[1-4]。通道质量的好坏是能否实现其在微机电系统中利用价值的关键。微通道的传统制作方法有电子束刻蚀、反应离子刻蚀等。这些方法工艺复杂、耗时多^[5], 而且成本高。随着激光技术的发展, 在透明材料基质上的微加工得以实现^[6-9], 激光诱导等离子体辅助刻蚀法(laser-induced plasma assisted-ablation, LIPAA)就是一

种加工速度快, 无污染的方法, 很多学者研究的是激光诱导金属等离子体对透明材料的微加工^[10-13]。QIN 等人提出了用 1064nm 的 Nd:YAG 脉冲激光诱导石英等离子体制作微通道的方法^[14], 它是指用激光辐照材料表面, 当功率密度达到一定值时, 材料气化产生等离子体, 利用其具有的极度高能高热进一步刻蚀材料从而形成通道, 通过改变加工参量可以改变通道的直径, 所加工的通道最深约 4.2mm。FAN 等人^[15-16]继续研究发现, 微通道内的压强随着加工深度增加而减小, 激光的平均功率密度以及脉冲次数等参量都对微通道的加工有影响, 但是加工通道深度还是未能突破 4.2mm^[17]。关于这种直接在石英玻璃基体内单步加工微通道的报道还比较少, 还未曾看见通道深度超过 8mm 的报道。

本文中通过对调 Q 的 Nd:YAG 激光器实现腔外倍频(倍频光为 70%)来产生混合光用以加工微通道。实验中分别用 1064nm 的基频光和 532nm 的倍频光为主要成分的混合光诱导等离子体加工微通道。实验中发现, 在相同的激光参量下, 后者加工的通道内壁较光滑, 而且加工速度明显比基频光加工

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50375031); 贵州省国际科技合作计划资助项目(黔科合国字(2004)11004号); 贵州省优秀科技教育人才省长专项资金项目(黔省专合字(2005)199号); 2006年度教育部博士点基金资助项目

作者简介: 冯彩玲(1982-), 女, 硕士研究生, 现主要从事激光微加工的研究。

* 通讯联系人。E-mail: sjqin@mail.gzst.gov.cn

收稿日期: 2009-09-08; 收到修改稿日期: 2009-10-23

的快,更重要的是在通道深度上有了改进,目前加工的通道最深达 8mm, 作者认为这是混合光中波长为 532nm 的倍频光起了主要作用。另外对实验结果做了相应的理论分析。

1 实验

1.1 实验装置

实验装置如图 1 所示,其中,微加工激光光源使用

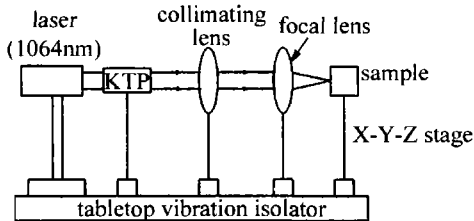


Fig. 1 Experimental setup for fabricating of micro channels

长春禹衡时代光电科技有限公司生产的 DGTQ 型 Nd:YAG 脉冲调 Q 激光器(采用电光调 Q, 脉冲宽度约 25ns, 脉冲重复频率为 1 次/s, 5 次/s, 10 次/s, 20 次/s 可调);KTP 晶体用来实现腔外倍频;熔融石英样品是上海石创光学玻璃仪器有限公司生产的六面抛光的熔融石英玻璃。

首先,激光束经过一个准直透镜,再经一个焦距为 10cm 的会聚透镜聚焦于样品前表面进行激光微加工;该实验在空气大气压环境下进行。

1.2 实验方法

加工前,调节整个光路,保证激光器的出光效果最好。在静态下,调节支架使激光会聚点位于样品的前表面,然后给调 Q 晶体两端加上合适的电压,增大抽运电压至 615V。首先,用 1064nm 基频光(脉冲能量 $E = 17.6\text{mJ}$, 脉冲重复频率 $f = 20\text{Hz}$) 进行加工,并且在加工过程中通过调节支架水平微动旋钮使样品逆着激光传播方向缓慢移动,以保证焦点位于加工通道的最底端,直至等离子体消失,停止加工。然后,采用如图 1 位置放置 KTP 晶体腔外倍频,用混合光(脉冲能量 $E = 17.6\text{mJ}$, 脉冲重复频率 $f = 20\text{Hz}$) 在同一样品的另一位置诱导等离子体加工微通道,直至等离子体消失。

加工速度的测量是采用秒表控制加工时间,脉冲重复率设置为 20Hz,先用基频光对熔融石英基体进行不同时间的加工,分别获得不同长度的通道;再向通道内注入去离子水,在 JXD-2 型读数显微镜(长春市第三光学仪器厂生产,最小分度值 0.01mm,最大量程 50mm)下分别测得每个通道的长度;加上倍频晶体后,在同一熔融石英上用混合光重复上述步骤。

2 结果与分析

2.1 基频光与倍频光为主要成分的混合光加工的微通道长度对比

在脉冲能量 $E = 17.6\text{mJ}$ 、脉冲重复频率 $f = 20\text{Hz}$ 时加工的通道,如图 2 所示。其中,较短的通道是由基

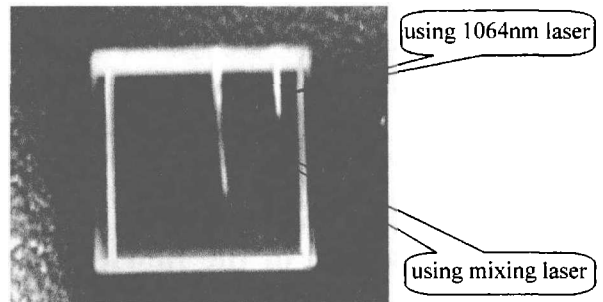


Fig. 2 Comparison of micro channels fabricated by the 1064nm laser and the mixing laser

频光加工的,长 3.168mm;较长的是用混合光加工的,长 7.206mm。本课题组分析认为,其原因可能是混合光中,主要成分是波长为 532nm 的倍频光在加工过程中起了主要的作用。根据基膜高斯光束通过透镜的传输规律^[18]可知,透镜焦平面上的光斑大小为 $w = \lambda F / (\pi w_0)$ (其中 F 为透镜的焦距, λ 为激光束的波长, w_0 为透镜前焦面的光斑半径尺寸),对于同一个透镜,波长越短,聚焦光斑越小,并且经测量发现,在同一抽运电压下,加倍频晶体前后,激光的输出能量近似相等。这样,波长越短,其焦点处的功率密度就越大,该实验中经测量计算得基频光与倍频光焦点处功率密度分别为 $8.89 \times 10^{10} \text{W/cm}^2$, $3.25 \times 10^{11} \text{W/cm}^2$,而较大的功率密度能产生更高温高密度的等离子体,所以倍频光的加工能力较强。

另外,波长的减小,导致聚焦后的高斯光束的瑞利长度增加,这也可能是倍频光能加工出较长通道的原因。

2.2 基频光与倍频光为主要成分的混合光加工的微通道内壁的对比

为了清晰地对比通道内壁的光滑程度,将上述样品在 XSP-BM-13 三目生物显微镜 $\times 10$ 倍物镜下观察,如图 3 所示。从图 3a 和 3b 中可以明显看出,基频光加工获得的通道内壁很粗糙,而且横截面也不均匀,而用混合光加工的通道光滑,横截面较均匀。

实验中计时发现,基频光加工时等离子体持续时间为 86min,混合光加工时等离子体持续时间为 32min。分析认为:当激光束照到样品表面时,混合光可以迅速产生高温高密度的等离子体,并且在整个加工过程中,等离子体的密度都较基频光加工的高。另

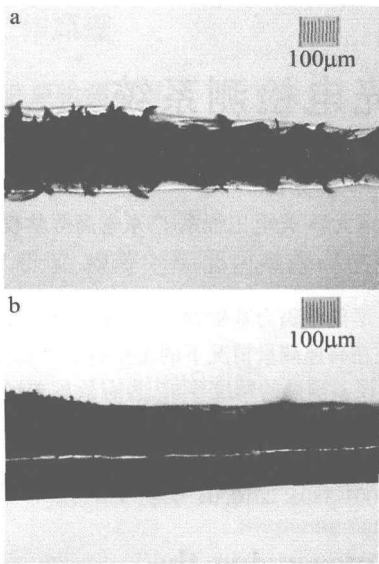


Fig. 3 Microscope photos of microchannels

a—microchannel fabricated the 1064nm laser b—microchannel fabricated the mixing laser

外,在加工过程中由于基频光的热效应作用的时间较长,形成的裂纹就较多,故用混合光加工的通道内壁较光滑。

2.3 基频光与倍频光为主要成分的混合光加工速度的对比

在实验中发现,激光脉冲个数对样品中通道的加工深度有很大的影响,图4是通道长度随脉冲个数变化的关系。

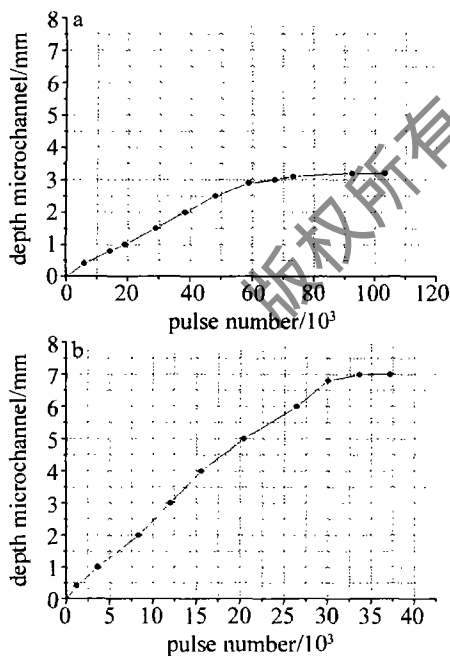


Fig. 4 The dependence of the depth of microchannels on pulse number
a—fabricating using 1064nm laser b—fabricating using mixing laser

从图4a和图4b中明显看出,混合光的加工速度远大于基频光的加工速度。分析认为:对熔融石英而言,倍频光的加工阈值低于基频光的加工阈值^[11,19],当激光束照到样品表面时,倍频光可以迅速产生高温

高密度的等离子体,使整个加工过程变得快速。并且在相同条件下,倍频光的功率密度高于基频,其诱导产生的等离子体密度和温度较高,势必有利于通道的快速加工;而基频光诱导产生的等离子体密度相比较而言要弱一些,虽然持续时间长,但对加工深度影响小,速度较慢。

3 结论

通过基频光和倍频光为主要成分的混合光加工熔融石英玻璃微通道的对比,发现在相同条件下,用混合光加工速度快,通道内壁较光滑,最主要的是在深度上有了很大的突破,分析认为是波长为532nm的倍频光起了主要作用。目前,加工的深度为8mm的微通道已成功用于酵母菌干细胞表面带电荷量的测量,获得了较好的实验结果^[20]。为了得到更高质量的微通道,必须综合考虑影响加工的各种因素,优化加工参量,对激光等离子体与透明物质的相互作用及传播作进一步的理论分析模拟,完善该种加工技术。

参考文献

- [1] LIN B Ch, QIN J H. Laboratory on a microfluidic chip[J]. Chinese Journal of Chromatography, 2005, 23(5): 456-463 (in Chinese).
- [2] BAI Zh Ch, JIANG Ch J, QIN Sh J, et al. A novel fiber optic biosensor based on microchannels fabricated laser[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2009, 20(5): 605-608 (in Chinese).
- [3] Shanghai Jiaotong University. A oxygen micro-pump based on decomposition of hydrogen peroxide; China, 200510026602 [P]. 2007-05-02 (in Chinese).
- [4] PAN J Sh. Microchannel plates and its main characteristics[J]. Journal of Applied Optics, 2004, 25(5): 25-28 (in Chinese).
- [5] QIN Sh J, LI W J. Analysis of nano channel formation in quartz cubes by laser-induced process[J]. Acta Mechanica Sinica, 2004, 20(2): 125-131.
- [6] LI Y, ITOH K, WATANABE W, et al. Three-dimensional hole drilling of silica glass from the rear surface with femtosecond laser pulses [J]. Opt Lett, 2001, 26(23): 1912-1914.
- [7] LIU Q, CHENG G H, WANG Y S, et al. Fabrication of internal diffraction gratings in transparent materials using femtosecond laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(11): 1290-1293 (in Chinese).
- [8] ZHAI L B, ZHAO H L, CHEN J M. The microfabrication of microchannel on glass with frequency tripled Nd:YAG laser[J]. Applied Laser, 2006, 26(6): 362-368 (in Chinese).
- [9] YOU M, ZHAO W, CHENG G H, et al. Crystallization in PTR glass induced by irradiation of femtosecond lasers[J]. Laser Technology, 2006, 30(1): 40-42 (in Chinese).
- [10] ZHANG J, SUGIOKA K, MIDORIKAWA K. High-speed machining of glass materials by laser-induced plasma-assisted ablation using a 532nm laser[J]. Appl Phys, 1998, A67(4): 499-501.
- [11] ZHANG J, SUGIOKA K, MIDORIKAWA K. Study of microprocessing of glass materials by laser-induced plasma assisted-ablation using nanosecond pulsed lasers[J]. Proc of SPIE, 2000, 3933: 332-337.

(下转第451页)

密度值,分别达到 $HV_{0.3}$ 250 与 95.8%。

3 结 论

(1)在正交试验基础上初步优化了工艺参量,详细分析了正交试验中存在的孔隙、凹谷及烧结态等扫描线间搭接缺陷,以及外边突起缺陷,这些缺陷的存在阻碍了样品致密度的进一步提高。

(2)使用“层间错开”扫描策略,即下一层扫描线在前一层的两道扫描线之间扫描,拥有更多的基体体积润湿,使得熔化金属液铺展开顺利,观察扫描线间及层间搭接情况,基本克服了正交实验中存在的缺陷,层内及层间扫描线具有明显的冶金结合。

(3)使用扫描速率 160mm/s,激光功率 140W,扫描间距 0.08mm,加工层厚 0.03mm,及“层间错开”扫描策略成型个性化手术导板,致密度达 95.8%,硬度为 $HV_{0.3}$ 250,成型效果良好。

参 考 文 献

- [1] SANTOS E C, SHIOMI M, OSAKADA K, *et al.* Rapid manufacturing of metal components by laser forming[J]. *Machine Tools & Manufacture*, 2006, 46(12/13): 1459-1468.
- [2] LIU J Ch, LI L J, YAN C. Discussion on direct manufacturing metallic pattern for sand mold based on laser cladding technology[J]. *Laser Technology*, 2003, 27(6): 572-576 (in Chinese).
- [3] YADROITSEV I, BERTRAND P, LAGET B, *et al.* Application of laser assisted technologies for fabrication of functionally graded coatings and objects for the international thermonuclear experimental reactor components[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, 362(2/3): 189-196.
- [4] WU W H, YANG Y Q, HUANG Y L. Direct manufacturing of Cu-based alloy parts by selective laser melting[J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(1): 37-40.
- [5] YADROITSEV I, SHISHKOVSKY I, BERTRAND P, *et al.* Manufacturing of fine-structured 3-D porous filter elements by selective laser melting[J]. *Applied Surface Science*, 2009, 255(10): 5523-5527.
- [6] The Manufacturingtalk Editorial Team. EOS whitepaper assesses DMLS benefits[EB/OL]. [2009-01-01]. <http://www.manufacturingtalk.com/news/eos/eos175.html>.
- [7] MTT Technologies Group. A world-class generative process developed for direct product realisation: selective laser melting™ (SLM) [EB/OL]. [2009-01-01]. <http://www.mtt-group.com/selective-laser-melting.html>.
- [8] KRUTHA J P, FROYENB K, van VAERENBERGHA J, *et al.* Selective laser melting of iron-based powder[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 149(1/3): 616-622.
- [9] YADROITSEV I, BERTRAND Ph, SMUROV I. Parametric analysis of the selective laser melting process[J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253(19): 8064-8065.
- [12] HANADA Y, SUGIOKA K, GOMI Y, *et al.* Development of practical system for laser-induced plasma-assisted ablation (LIPAA) of micromachining of glass materials[J]. *Appl Phys*, 2004, A79(4): 1001-1003.
- [13] HANADA Y, SUGIOKA K, MIDORIKAWA K. Laser-induced plasma-assisted ablation (LIPAA): fundamental and industrial applications[J]. *Proc SPIE*, 2006, 6261: 626111.
- [14] QIN SH J, LI W J. Micromachining of complex channel systems in 3-D quartz substrates using Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Appl Phys*, 2002, A74(6): 773-777.
- [15] FAN Y F. Study on the laser induced plasma in the laser micro machining[D]. Guiyang: Guizhou University, 2006: 34-39 (in Chinese).
- [16] PENG Ch P. Study on laser machining micro channels on quartz[D]. Guiyang: Guizhou University, 2007: 24-25 (in Chinese).
- [17] FAN Y F, QIN Sh J. Optical analysis of the plasma induced by the laser micromachining[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2006(6): 64-67 (in Chinese).
- [18] ZHOU B K, GAO Y Z, CHEN T R, *et al.* Principles of Laser[M]. 5th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 74-82 (in Chinese).
- [19] HUANG J, REN H, LÜ H B, *et al.* Comparison of damage action of fused silica at different laser wavelength[J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2007, 5(6): 5-8 (in Chinese).
- [20] CHEN D L, FENG C L, QIN Sh J. Study on measuring surface-charges of cells in a quartz microchannel[J]. *Laser Technology*, 2009, 33(6): 561-564 (in Chinese).

(上接第 435 页)