

文章编号: 1001-3806(2016)05-0687-04

## 248nm 准分子激光加工玻璃微通道的实验研究

田姗姗, 陈涛\*

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100022)

**摘要:** 为了提高玻璃微通道的加工效率及质量, 采用 248nm 准分子激光加工玻璃微通道的新型加工方法进行了理论分析和实验验证, 取得了不同激光参量下玻璃微通道的加工工艺数据。结果表明, 激光加工玻璃微通道的刻蚀阈值为  $4.54 \times 10^3 \text{ mJ/mm}^2$ ; 随着激光能量的增加, 刻蚀深度近似成对数增长, 经线性拟合得到刻蚀深度随激光能量变化的公式; 随着脉冲频率的增加, 刻蚀深度近似成线性增长, 经线性拟合得到刻蚀深度随频率变化的公式; 且通道底面粗糙度随激光能量及脉冲频率的增加, 呈增长趋势; 激光的能量在 400mJ ~ 600mJ、脉冲频率在 4Hz ~ 7Hz 范围内组合激光参量可实现刻蚀率高、粗糙度小的微通道加工。这些结果对于合理选择激光参量、提高玻璃微通道的加工效率及质量是有帮助的。

**关键词:** 激光技术; 玻璃微通道; 248nm 激光; 激光参量; 刻蚀效率; 刻蚀质量

中图分类号: TN249

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.05.014

### Study on the processing of glass micro channels with 248nm excimer laser

TIAN Shanshan, CHEN Tao

(College of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency and quality in processing the glass micro channels, excimer laser ( $\lambda = 248\text{nm}$ ) was used. The relationship between laser parameters and etching quality of glass were obtained after theoretical analysis and experimental verification. The results show that the threshold of laser processing micro channels in glass is  $4.54 \times 10^3 \text{ mJ/mm}^2$ . Etching depth increases approximately logarithmically with the increasing of laser energy. The relationship between laser energy and etching depth was described by two linear fitting formulas. Etching depth increases linearly with the increasing of pulse frequency. The relationship between pulse frequency and etching depth was described by linear fitting formula. The roughness of channel bottom increases with the increasing of laser energy and pulse frequency. In the processing of glass micro channels, the optimum range of laser parameters is laser energy 400mJ ~ 600mJ and pulse frequency 4Hz ~ 7Hz. The results are helpful for selecting the laser parameters reasonably to improve processing efficiency and quality of glass micro channels.

**Key words:** laser technique; glass microchannels; 248nm laser; laser parameters; etching efficiency; etching quality

### 引言

微通道是微纳技术的研究重点, 它广泛应用于血液分析、DNA 分析、化学分析<sup>[1-4]</sup> 等多个方面。目前微通道材料主要有玻璃、硅及其氧化物、聚合物等 3 种类型, 其中玻璃具有较好的机械强度、散热性、电渗性和透光性, 且制造成本低廉, 可进行批量化生产, 在微通道制作中应用广泛。玻璃微通道传统加工方式多采用湿法腐蚀, 加工流程需要经过光刻、显影、湿法腐蚀、

清洗等多个环节<sup>[5]</sup>, 这种加工工艺复杂、成本高。激光具有高亮度、方向性好、单色性和相干性好的物理特性, 已广泛应用于微细加工领域。当前用于玻璃微细加工的激光器主要有 YAG 激光器和脉冲准分子激光器。LI<sup>[6]</sup>, PENG<sup>[7]</sup> 等人采用 YAG 激光器诱导等离子体法加工石英微通道, 实现了较大宽深比的微通道加工, 但均存在刻蚀通道宽度不均匀的现象。DAI<sup>[8]</sup> 等人采用 157nm 激光加工石英玻璃, 研究得到了合适的加工参量范围。JIANG<sup>[9]</sup>, LI<sup>[10]</sup> 等人采用 248nm 激光实现了玻璃的加工。但上述方法, 采用准分子激光加工玻璃均停留在微孔的加工, 而对于准分子激光加工玻璃微通道的研究较少。因此采用 248nm 准分子激光加工玻璃微通道, 研究加工机理并探究最佳的加工参量, 具有重要的理论意义和应用价值。作者采取 248nm 准分子激光加工玻璃微通道, 精确给出了加工损伤阈值, 同时探究了 248nm 准分子激光参量对于微

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(4132017); 科技部国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(2011YQ030112)

作者简介: 田姗姗(1992-), 女, 硕士研究生, 现主要从事激光微纳加工的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: chentao@bjut.edu.cn

收稿日期: 2015-08-10; 收到修改稿日期: 2015-10-08

通道刻蚀性能的影响,得到了最佳的刻蚀工艺参量范围。

### 1 准分子激光与玻璃作用机理分析

准分子激光器是目前紫外波段输出功率最大的激光器件,广泛应用于工业、医疗和科研等领域<sup>[11]</sup>。特别是稀有气体卤化物准分子激光器,由于其输出激光峰值功率高、脉冲能量大,适用于材料的微细加工<sup>[12-14]</sup>。当准分子激光作用于材料表面时,可以在极短的时间内达到材料加工的阈值,引起材料产生汽化或热分解产生物理刻蚀,或者直接引起材料内部化学键断裂产生化学刻蚀,从而达到去除材料的目的<sup>[15]</sup>。本实验中所使用 KrF 准分子激光,波长为 248nm,单光子能量为 5eV。加工材料玻璃的主要成分是二氧化硅, Si—O 键长为 0.161nm,键能为 4.7eV。当 248nm 准分子激光入射到玻璃表面,材料表面吸收光子能量,达到玻璃的刻蚀阈值,引起化学键的迅速断开。当光子密度足够大时,化学键断裂速度超过复合速度,光斑中材料会被分解成若干原子、分子、离子等粒子团。这些粒子团不断吸收能量,在光照层内引起压强急剧增长,温度升高后急剧膨胀,飞离材料表面,从而达到刻蚀的目的。

### 2 实验材料与方法

#### 2.1 试验材料

玻璃加工样件为载玻片,其尺寸规格为长 7.61mm,宽 2.51mm,厚度 0.158mm;正方形掩模尺寸长 3.1mm,宽 3.1mm;无水乙醇的质量分数为 0.75。

#### 2.2 试验方法

本实验的加工系统如图 1 所示。激光光源采用 Lambda Physik 公司的 LPX 305iF 型准分子激光器,激光经反射镜 1 后经过正方形掩模得到初始光斑,再经反射镜 2 到达物镜聚焦得到 210μm × 210μm 的方形光斑作用于玻璃表面。激光光斑位置放置 CCD 摄像头用于精确定位与过程监控。X-Y-Z 三轴精确移动平台由电脑控制完成移动速度的调节。试验样品表面的清洁度将会影响材料的刻蚀质量。在实验中,首先采用无水乙醇对样品进行清洗、吹干。用镊子夹持固定于移动平台上,调节平台移动速度以及激光加工参

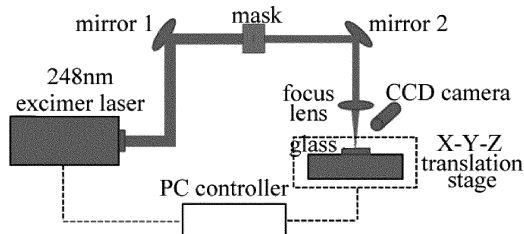


Fig. 1 Schematic diagram of processing system

量完成微通道的刻蚀。在刻蚀实验完成后,再用无水乙醇对加工样品进行清洗处理。镊子夹持放置于表面轮廓仪测量刻蚀深度和通道底面粗糙度,采用光学显微镜观测形貌。248nm 准分子激光器技术参量如表 1 所示。

Table 1 Main technical parameters of 248nm excimer laser

technical parameters	value
working gas	KrF
wavelength λ	248nm
repeat frequency f	1Hz ~ 10Hz
single pulse energy w	1mJ ~ 1200mJ
spot size	35.15mm × 16.5mm

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 准分子激光加工玻璃刻蚀阈值

当 248nm 准分子激光入射到玻璃表面,玻璃表面吸收光子能量,直至达到玻璃的损伤阈值时,玻璃表面才能发生刻蚀。因此探究 248nm 准分子激光加工玻璃材料时的损伤阈值,对于探究微通道加工参量是至关重要的。在实验中选择频率为 4Hz、脉冲个数为 200 的激光参量,且依次改变激光输出能量,实现玻璃的刻蚀。如图 2a 所示,激光能量为 370mJ 时,玻璃表面发生刻蚀。在激光输出能量为 200mJ 时,由图 2b 可以看到,工件表面只发生部分刻蚀,不能得到完整的加工图样。当 200mJ 以下,玻璃表面不会发生刻蚀,因此确定准分子激光加工玻璃损伤能量密度阈值为  $4.54 \times 10^3 \text{ mJ/mm}^2$ 。由实验结果可知,准分子激光加工玻璃阈值较低、易于加工,且加工质量较好。

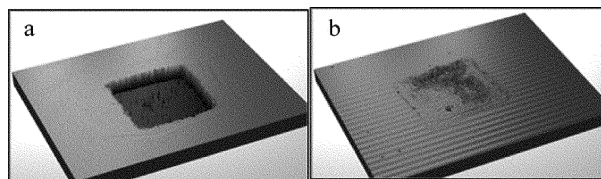


Fig. 2 Glass surface damage morphology with different energies  
a—370mJ b—200mJ

#### 3.2 激光能量对于微通道刻蚀深度的影响

准分子激光加工玻璃微通道过程中,微通道的深度是加工的重要因素。在本实验中,选取激光参量为频率 4Hz、脉冲个数 300、加工平台 x 轴扫描速率 0.001mm/s,依次改变激光输出能量,探究激光能量与加工刻蚀深度的关系。如图 3 所示,在加工刻蚀阈值以上,随着激光能量的增加,材料表面吸收光子能量不断增加,刻蚀深度近似成对数趋势增加。根据实验数据,线性拟合加工曲线,得到拟合公式如下:

$$y = 0.0498x - 1.1999 \quad (1)$$

式中, y 为刻蚀深度, x 为激光能量。在实际加工中,可以根据不同微通道深度要求,选择不同的激光能量,从

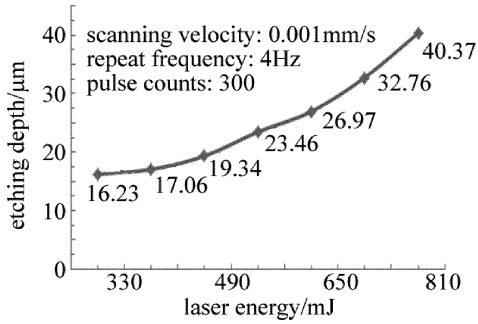


Fig. 3 Relationship between laser energy and etching depth

而实现可控的、高效率的微通道加工。

### 3.3 激光能量对于微通道底面粗糙度的影响

微通道底面粗糙度是激光加工玻璃微通道中一个重要的参量。实验中,选取激光参量为频率 4Hz、脉冲个数 300、加工平台  $x$  轴扫描速率 0.001mm/s,得到不同能量下玻璃微通道底面粗糙度。如图 4 所示,在激光能量为 290mJ ~ 370mJ 时,玻璃通道刚开始刻蚀,其底面粗糙度迅速增加。当激光能量达到 370mJ ~ 610mJ 时,底面粗糙度增加较为缓慢。当能量高于 610mJ 时,则底面粗糙度迅速增加。由准分子激光与玻璃材料作用原理可知,当激光作用于材料表面时,材料吸收光子能量,引起化学键的迅速断开,形成材料表面的刻蚀。同时光斑中材料会被分解成若干原子、分子、离子等粒子团,其中很大一部分由于材料表面的膨胀飞离表面,而极少的粒子残留在通道底部。当然,激光能量越大,刻蚀效率越高,残留物也会越多,使底面粗糙度增加。根据实验数据表明,能量在 400mJ ~ 600mJ 范围时,刻蚀效率较高,粗糙度较小。

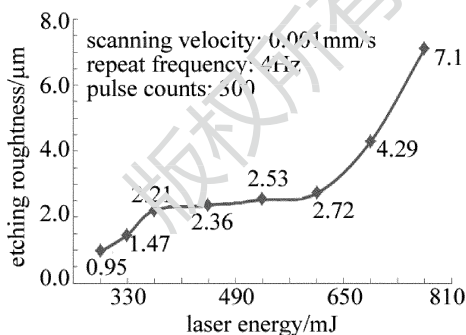


Fig. 4 Relationship between laser energy and etching roughness

### 3.4 激光频率对于微通道刻蚀深度的影响

实验中选取能量为 350mJ、脉冲个数为 300 的激光参量,调节  $x$  轴平台的扫描速率为 0.001mm/s,同时改变激光脉冲频率,探究激光频率对刻蚀深度影响。如图 5 所示,随着激光脉冲频率增加,同一刻蚀点刻蚀次数增加,刻蚀深度成线性趋势增加。其线性拟合公式如下:

$$y = 5.9927x - 3.58 \quad (2)$$

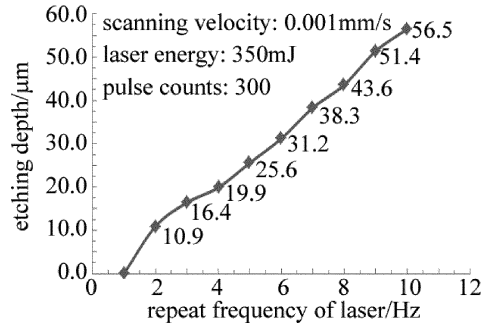


Fig. 5 Relationship between laser repeat frequency and etching depth

式中, $y$  为刻蚀深度, $x$  为激光频率。根据拟合公式可得到不同激光频率下,玻璃微通道的刻蚀深度,实现可控的微通道加工。

### 3.5 激光频率对于微通道底面粗糙度的影响

粗糙度是微通道加工过程中的重要参量,如图 6 所示,玻璃微通道底面粗糙度随着激光频率的增加而增加。在实际加工过程中需要选择合适的频率,实现高刻蚀率、低粗糙度的微通道加工。通过反复实验,得到了最佳的加工频率为 4Hz ~ 7Hz。在此加工频率范围内,所得微通道底面粗糙度较低、刻蚀效率较高。

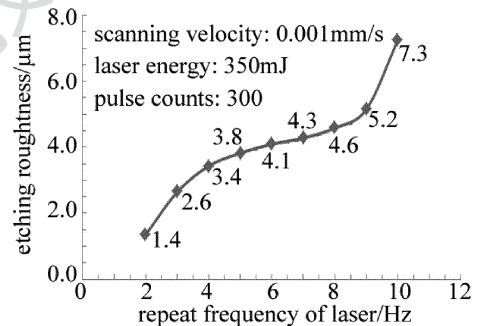


Fig. 6 Relationship between repeat frequency and etching roughness

### 3.6 激光加工玻璃微通道质量分析

由实验可知,248nm 准分子激光加工玻璃微通道,其边缘刻蚀面整齐、通道宽度均匀。图 7 为不同激光脉冲频率加工通道,可知在脉冲频率增大时,单位面积内激光作用次数增加,材料表面吸收能量增加,则材料表面刻蚀深度增加。同时加工过程生成了大量粒子团,不能及时飞离出去,最终残留于通道底面,使刻蚀深度增加的同时,底面粗糙度也在增加。

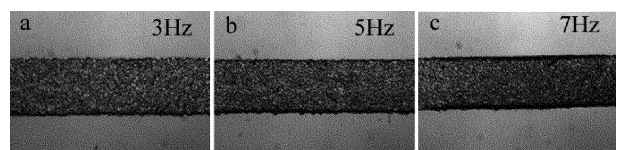


Fig. 7 Image of micro-channel (scanning velocity of 0.001mm/s, laser energy of 350mJ)

## 4 结论

提出 248nm 准分子激光加工玻璃微通道,所得微

通道边缘刻蚀面整齐、通道宽度均匀;且激光能量在400mJ~600mJ及激光脉冲频率在4Hz~7Hz的组合激光参量可实现高刻蚀率、较小粗糙度的微通道加工;相对于传统工艺,其通道参量可控、加工工艺灵活、加工效率高、成本低,是一种具有应用价值的新型加工方式。

#### 参 考 文 献

- [1] SMEGKAL P, BREADMORE M C, GUIJTR M, *et al.* Separation of carboxylic acids in human serum by isotachopheresis using a commercial field-deployable analytical platform combined with in-house glass microfluidic chips[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2012, 755(22):115-120.
- [2] XU Zh, WEN J K, LIU Ch, *et al.* Research on forming and application of U-form glass micro-nanofluidic chip with long nanochannels [J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2009, 7(3):423-429.
- [3] YE J M, WANG X D, ZHUANG J L, *et al.* Microcontact electrochemical etching technique for rapid fabrication of glass-based microfluidic chips [J]. *RSC Advances*, 2013, 19(3): 6960-6963.
- [4] ZHOU J. A coating method of glass microchip for capillary electrophoretic separation and detection of DNA fragments[D]. Shenyang: China Medical University, 2006:9-25(in Chinese).
- [5] LUO Y, LOU Zh F, CHU D N, *et al.* Fabrication of glass microfluidic chip [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2004, 2(1): 20-23(in Chinese).
- [6] LI Sh X, BAI Zh Ch, HUANG Zh, *et al.* Breakdown model of micro channels fabrication in fused silica substrates by laser-induced plasma [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(9):969-973(in Chinese).
- [7] PENG Ch P. Study on laser machining micro channels on quartz [D]. Guiyang: Guizhou University, 2007:19-25(in Chinese).
- [8] DAI Y T, CUI J L, XU G, *et al.* Influence of laser parameters on etching performance during 157nm laser micromachining [J]. *Laser Technology*, 2011, 35(1):36-38(in Chinese).
- [9] JIANG Ch, WANG Y Q. Study on machining K9 optical glass with KrF excimer laser [J]. *Electromachining & Mould*, 2003(2):33-35(in Chinese).
- [10] LI L. The Research of 248nm excimer laser interaction with three kinds of inorganic nonmetal optical materials[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014:39-44(in Chinese).
- [11] BASTING D, STAMM U. The development of excimer laser technology-history and future prospects [J]. *International Journal of Research in Physical Chemistry and Chemical Physics*, 2001, 215(15): 75-99.
- [12] LEE S K, YOON K K, WANG K H, *et al.* Excimer laser ablation removal of thin chromium films from glass substrates [J]. *Surface and Coatings Technology*, 1999, 113(1):63-74.
- [13] BASTING D, PIPITRAT K, STAMM U. History and future prospects of excimer lasers[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2002, 4426: 25-34.
- [14] LOU Q H, XU J, FU Sh F, *et al.* Pulsed gas-discharge lasers [M]. Beijing: Science Press, 1993: 238-293(in Chinese).
- [15] ZUO T Ch. Advanced manufacturing 21 century-laser technology and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2007: 363-375(in Chinese).