

## CO<sub>2</sub> 激光多程平移法制备高质量梯形 PMMA 微通道

吴天昊<sup>1,2</sup>, 柯常军<sup>1\*</sup>, 姜永恒<sup>3</sup>, 孔心怡<sup>1,2</sup>, 钟艳红<sup>1</sup>

(1. 中国科学院电子学研究所, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100490;

3. 吉林大学 物理学院, 吉林 长春 435100)

**摘要:** 由于非金属材料对长波红外激光有较强的吸收, CO<sub>2</sub> 激光常被用于制备 PMMA 微通道。激光光强呈高斯分布, 导致常规激光静态多程刻蚀法制备的微通道截面为三角形, 无法满足微流体芯片中的实际应用需求。提出了一种激光多程平移刻蚀法, 以首次刻蚀形成的热影响区(HAZ)为界限多程横向重叠平移刻蚀, 可以快速制备出理想梯形截面的高质量微通道。通过与 CO<sub>2</sub> 激光静态多程刻蚀法在横截面、热影响区、表面粗糙度等方面的对比, 结果表明, CO<sub>2</sub> 激光多程平移刻蚀法制备的 PMMA 微通道热影响区更小、表面更光滑、横截面更实用。

**关键词:** 微通道; CO<sub>2</sub> 激光; 梯形通道; PMMA

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0306003

## Preparation of high quality trapezoid PMMA micro-channels by CO<sub>2</sub> laser multi-path translational method

Wu Tianhao<sup>1,2</sup>, Ke Changjun<sup>1\*</sup>, Jiang Yongheng<sup>3</sup>, Kong Xinyi<sup>1,2</sup>, Zhong Yanhong<sup>1</sup>

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100490, China;

3. Department of Physics, Jilin University, Changchun 435100, China)

**Abstract:** As non-metallic materials have strong absorption of long-wave infrared laser, the CO<sub>2</sub> laser is often used to prepare PMMA micro-channels. Due to the Gaussian distribution of the laser light intensity, the cross-section of the micro-channels prepared by the conventional method is triangular. This can't meet the practical application requirements in the microfluidic chip. In this paper, a CO<sub>2</sub> laser multi-path translational method was proposed, which used the HAZ formed by the first etching as a boundary multi-pass lateral overlap translation etching, so that high quality micro-channels with ideal trapezoid cross section can be quickly prepared. In addition, the micro-channel fabricated in this way is smoother and more practical compared with the static multi-pass method in cross-section, HAZ, surface roughness.

**Key words:** micro-channel; CO<sub>2</sub> laser; trapezoidal channel; PMMA

收稿日期: 2018-10-10; 修订日期: 2018-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(61475157)

作者简介: 吴天昊(1994-), 男, 硕士生, 主要从事激光微纳加工方面的研究。Email: ellis.wuth@gmail.com

导师简介: 柯常军(1973-), 男, 研究员, 博士, 主要从事红外激光技术及其应用方面的研究。Email: cjke@mail.ie.ac.cn

## 0 引言

随着研究尺度的延伸,微流体芯片(LOC)广泛应用于化学分析、生物医疗等领域,包括DNA分析、血液样品分析、电泳装置等<sup>[1-3]</sup>。基于微通道的微流控芯片可以实现从试样处理到检测的整体微型化、便携化、集成化<sup>[4]</sup>,最大限度地把实验室的功能转移到其中。在实际应用中,大多数微流体芯片需要在兼容材料上集成不同尺寸的微流体通道<sup>[5-8]</sup>,激光刻蚀法由于操作灵活方便、通道尺寸可控成为制备微通道的常用方法。而具备良好的光学性能、生物相容性、廉价等特点的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)是制造微流体通道的常用材料。同时,PMMA对于10.6 μm波长的CO<sub>2</sub>激光吸收率大于90%<sup>[9]</sup>,因此CO<sub>2</sub>激光器常被用于制备PMMA微通道。

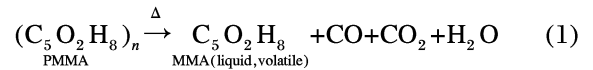
理想的微通道应具备无损流通液体和快速传导全部热量的能力。横截面形状对微通道的性能有很大的影响,研究表明:在微流控化学反应器<sup>[10]</sup>和散热器<sup>[11]</sup>中,梯形或矩形微通道性能明显优于三角形横截面。三角形横截面会限制微通道的液体流速,微通道的顶部与底部由于压强不同使得部分性能存在巨大的差异。激光光强呈高斯分布,是形成三角形截面的主要原因。Zhang通过改变光斑的偏移比,采用双程加工法实现梯形截面;但存在表面粗糙、横截面不平整的问题<sup>[4]</sup>。Samant通过静态5次刻蚀法制备出小面积的热影响区(HAZ)和低的表面粗糙度(*Ra*);但制备出尖锐的三角形截面,影响微通道的性能<sup>[12]</sup>。

文中提出一种CO<sub>2</sub>激光多程平移法用于刻蚀PMMA平面,制备出了具有光滑底面 and 高质量梯形截面的微通道。

## 1 实验部分

### 1.1 基本原理

CO<sub>2</sub>激光为中远红外激光,对PMMA光热效应显著,在热量的作用下,PMMA分子链通过振动将热量向周围传播,形成中心点最高向四周递减的温度梯度。当热量超过PMMA熔点时,PMMA吸收热量熔化并快速汽化,即固态PMMA通过反应1直接转化为易挥发液体和气体<sup>[5]</sup>。



多程平移法是在一次激光刻蚀后,以首次刻蚀形成的HAZ为界限横向平移刻蚀。这种方式不仅像静态多程法那样可以产生洁净底面,还可以改变横截面形貌,产生洁净的梯形PMMA微通道。激光一次加工刻蚀后的横截面如图1(a)所示。第二次加工,激光向左平移材料HAZ的宽度后刻蚀,使第二次熔化温度区的边缘恰好覆盖第一次的HAZ,如图1(b)所示。若平移量过小,第二次激光的高能量区不能消除第一次的低能量区,产生更大的HAZ;若平移量过大,第二次激光会与第一次激光的HAZ形成重铸层,使得表面凹凸不平。第三次加工,激光向右平移材料HAZ的宽度后刻蚀,产生底面粗糙的梯形截面。将微通道的HAZ平分为若干份,随着左右加工次数的增多,底面趋近于平坦,*Ra*值减小,截面趋近于梯形,如图1(c)所示。

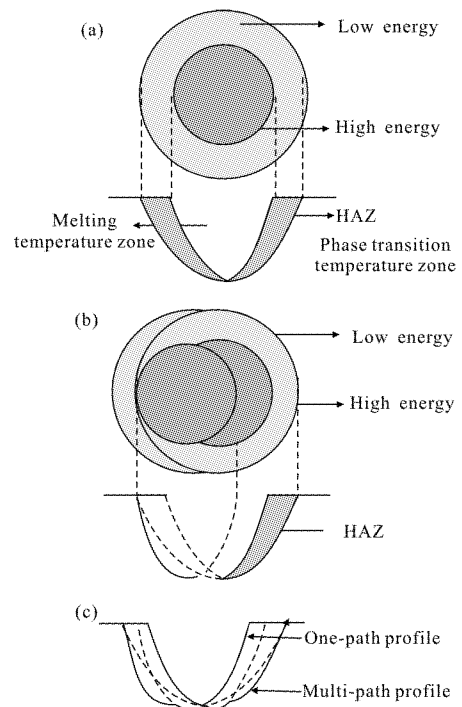


图1 多程平移法原理分析图

Fig.1 Principle analysis diagram of multi-path translational method

### 1.2 实验方案

使用波长10.6 μm的CO<sub>2</sub>激光器(SYNRAD P-100)在功率2 W时刻蚀60 mm×20 mm×2 mm(长宽厚)的PMMA平板制备微通道,所使用的激光系统

还包含焦距  $f=21.6\text{ cm}$  的聚焦镜, 将光斑尺寸限制为  $430\text{ }\mu\text{m}$  ( $1/e^2$ )。聚焦后的光束通过光学运动平台 (THORLABS BBD201), 在移动速率  $10\text{ mm/s}$  下对样品进行精确平移刻蚀。此外, 使用金相显微镜 (上海永亨 9XB-PC) 分析微通道截面轮廓, 白光干涉仪 (BRUKER GTK-1) 测量微通道粗糙度和微通道干涉图样, SEM (FEI Sirion-200) 分析微通道内壁形貌。

取 PMMA 基片置于无水乙醇中超声处理  $30\text{ min}$  并烘干, 在该参数下刻蚀一次后, 通过显微镜观察表面 HAZ 宽度, 测得左侧 HAZ 为  $162.21\text{ }\mu\text{m}$ , 右侧 HAZ 为  $163.87\text{ }\mu\text{m}$ 。在保持激光功率、扫描速率、聚焦镜不变的前提下, 取 3 组为研究对象: 刻蚀 3 次 (中心一次, 左平移  $162\text{ }\mu\text{m}$  一次, 右平移  $164\text{ }\mu\text{m}$  一次), 刻蚀 5 次 (中心一次, 左平移  $81\text{ }\mu\text{m}$  两次, 右平移  $82\text{ }\mu\text{m}$  两次), 刻蚀 7 次 (中心一次, 左平移  $54\text{ }\mu\text{m}$  三次, 右平移  $55\text{ }\mu\text{m}$  三次)。此外在相同激光功率、相同扫描速率下静态多程刻蚀 (3 次、5 次、7 次) 作为对照。

## 2 实验结果与分析

将各个微通道编号, 测量其宽度、深度、表面粗糙度 ( $Ra$ )、HAZ 宽度, 取 5 次测量的平均值后, 结果如表 1 所示。下面将从横截面、HAZ、表面粗糙度等方面进行分析。

表 1 功率  $2\text{ W}$  扫描速率  $10\text{ mm/s}$  时微通道的实验结果数据

Tab.1 Experimental results of micro-channels in  $P=2\text{ W}$  and scanning speed is  $10\text{ mm/s}$

No.	Paths	Distance / $\mu\text{m}$	Width / $\mu\text{m}$	Depth/ $\mu\text{m}$	$Ra/\mu\text{m}$	HAZ/ $\mu\text{m}$ L:R
1	1	0	480.22	252.57	0.852	162.21: 163.87
2	3	0	511.65	627.11	0.777	130.18: 131.94
3	5	0	520.36	966.45	0.756	128.23: 130.52
4	7	0	525.91	1318.3	0.726	121.24: 122.37
5	3	L:162 R:164	810.35	301.42	1.099	160.24: 161.23
6	5	L:81 $\times$ 2 R:82 $\times$ 2	813.52	510.56	0.963	135.68: 136.13
7	7	L:54 $\times$ 3 R:55 $\times$ 3	812.12	681.02	0.704	112.10: 112.86

### 2.1 横截面

各组实验刻蚀的微通道截面如图 2 所示。激光一次刻蚀后形成的通道截面呈类似高斯分布, 随着刻蚀次数的增多, 静态多程法将产生更尖锐的三角

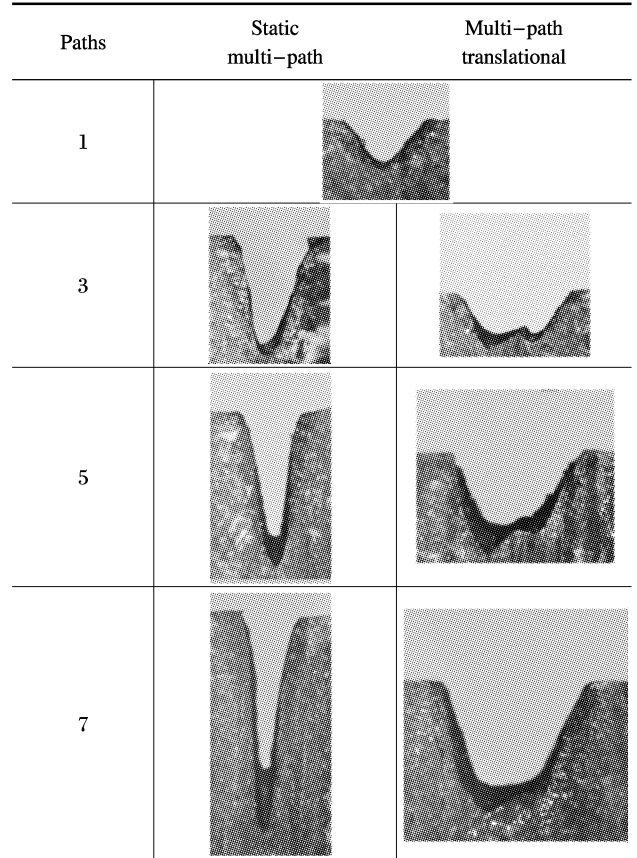


图 2 微通道的横截面对比图

Fig.2 Cross-sectional comparison of micro-channels

形横截面。采用多程平移法时, 随着刻蚀次数的增多, 横截面由不规则锯齿型越来越趋向于理想梯形。将激光以某个功率进行单次刻蚀的横截面视为高斯分布, 如公式 (2) 所示:

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right\} \quad (2)$$

式中:  $\mu$  为  $x$  的期望;  $\sigma$  为  $x$  的标准差, 记为:  $g(x) \sim N(\mu, \sigma^2)$ 。在激光功率与扫描速率不变的前提下, 依据图 1 的模型, 多程平移法的横截面  $G(x)$  可表示为:

$$G(x) = \sum_{i=1}^n g\left\{x + \left(i - \frac{n+1}{2}\right) \cdot \Delta x\right\} \quad (3)$$

式中:  $n$  为激光刻蚀次数;  $\Delta x$  为单个激光的扫描间距。依据正态分布性质,  $G(x)$  为统计独立的正态分布和, 记为:  $G(x) \sim N(\mu, \sigma n^2)$ 。由于高斯分布的方差越

大,图像越扁平,因此多程平移法会随着刻蚀次数  $n$  的增大,产生理想梯形横截面。

## 2.2 HAZ

表面 HAZ 引起的形变和膨胀凸起会导致微通道粘合不紧密而影响性能,因此要尽量缩小 HAZ 的范围。由表 1 不难看出,随刻蚀次数增加,微通道左右表面 HAZ 都有小幅度减小。原因是多次激光刻蚀时,入射激光会在已熔化和未熔化之间的不平整表面上产生散焦现象,导致入射角变化;随着深度的增加,光束的散焦程度增加,热量更多聚集在微通道底部。如图 2 黑色部分所示,新产生的 HAZ 大部分集中在底部。根据能量守恒定律,刻蚀次数增加,热影响区总面积增大,但大部分集中在底面,反而使得微通道两侧表面 HAZ 减小,进而有利于微流体芯片的粘合。

## 2.3 表面粗糙度

微通道的底面形貌 3D 图以及局部 SEM 放大如图 3 所示,选取多程平移法制备的 1、5、6、7 号样品分别对应图 3。图 3(a)为一次刻蚀的样品,当放大

860 $\times$ 表面存在长尺寸裂痕与大量体积不等的凸起;图 3(b)、(c)在放大 430 $\times$ 时就存在大量气孔与明显裂痕;图 3(d)对应 7 号样品,放大 860 $\times$ 存在尺度更小的裂痕、气孔,此外也有体积较小的凸起。底面放大图的不平整程度也对应  $Ra$  值  $5>6>1>7$ ,经过多程平移法刻蚀 7 次的样品  $Ra$  值为  $0.704 \mu\text{m}$ ,略好于同样普通方法刻蚀 7 次的  $0.726 \mu\text{m}$ 。

激光光斑辐射底部时,使 PMMA 熔化并快速汽化,产生的蒸汽通过狭窄区域时对底面施加压力形成粗糙表面,也就是底面粗糙度产生的原因。5、6 号样品  $Ra$  增大,是因为平移较大的间隔时光斑重合度小,多次刻蚀会产生新的裂痕。而刻蚀 7 次时平移间隔更小,侧壁倾斜角会产生更大的反射率,使得相同条件下第二次的热量吸收会更小,底面受热更均匀,可以熔化部分首次加工产生表面凸起与气孔, $Ra$  就相应降低。

表面裂痕、凸起、小孔为粗糙度产生的三种表现形式。由于微通道底部受热不均,高温部分向低温部分拉伸膨胀形成了表面裂痕。 $\text{CO}_2$  激光刻蚀过程中加热使得固态 PMMA 融化为少量液体或迅速升华为气体,一小部分液体和气体在高压、底面体积膨胀下离开熔化区,遇空气冷凝为不规则的固体,导致了表面凸起的形成。由于上述凸起受到二次热量集中时,产生爆裂并升华为气体,在原位置形成了表面小孔。

## 3 结 论

文中提出一种  $\text{CO}_2$  激光多程平移刻蚀法,以首次刻蚀形成的 HAZ 为界限多程横向重叠平移刻蚀 PMMA 基板。通过与  $\text{CO}_2$  激光静态多程刻蚀法在横截面、热影响区、表面粗糙度等方面的对比,结果表明经过低功率  $\text{CO}_2$  激光多程平移 7 次( $L:54 \mu\text{m} \times 3$ ,  $R:55 \mu\text{m} \times 3$ )刻蚀 PMMA 基板,形成的微通道横截面为梯形,热影响区( $112 \mu\text{m}$ )更小、表面更光滑( $Ra=0.704 \mu\text{m}$ )。因此,激光多程平移法可用于快速制备理想梯形截面的高质量 PMMA 微通道。

## 参考文献:

[1] Levy L, Mannios J T, Chen J. Entropic unfolding of DNA molecules in nano-fluidic channels[J]. *Nano Letters*, 2008, 8

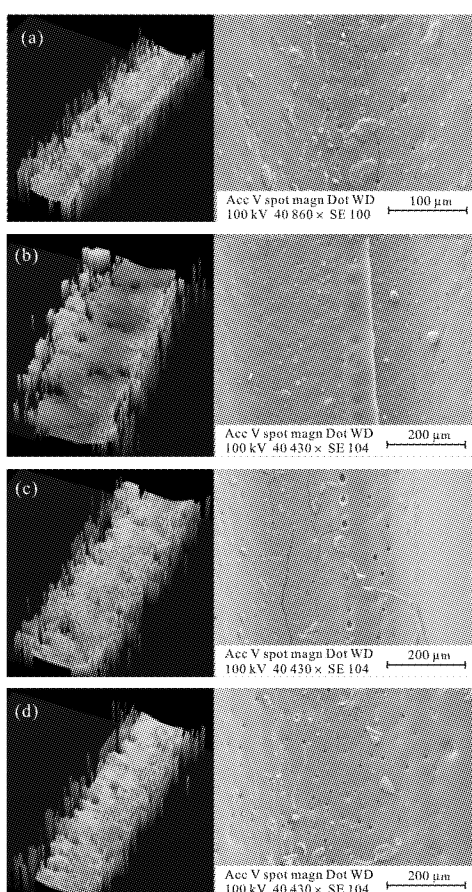


图 3 微通道底面 3D 图和 SEM 部分放大图

Fig.3 Bottom 3D views and partial SEM of micro-channels

- (11): 3839–3844.
- [2] Li S F, Fozdar D Y, Ali M F, et al. A continuous–flow polymerase chain reaction microchip with regional velocity control [J]. *Microelectromesh Syst*, 2006, 15(1): 223–236.
- [3] Fernández–Pradas J M, Florian, Caballero–Lucas F, et al. Femtosecond laser ablation of polymethyl–methacrylate with high focusing control [J]. *Applied Surface Science*, 2013, 278: 185–189.
- [4] Zhang Sijie, Shin Y C. Effective methods for fabricating trapezoidal shape micro–channel of arbitrary dimensions on polymethyl methacrylate (PMMA) substrate by a CO<sub>2</sub> laser [J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2017, 6(3): 442–447.
- [5] Mironov V, Trusk T, Kasyanov V, et al. Biofabrication: a 21st century manufacturing paradigm [J]. *Biofabrication*, 2009, 1(2): 022001.
- [6] Shashi Prakash, Subrata Kumar. Experimental investigations and analytical modeling of multi–pass CO<sub>2</sub> laser processing on PMMA[J]. *Precision Engineering*, 2017, 49: 220–234.
- [7] Muhammad Imran, Rosly Rahman. Fabrication of microchannels on PMMA using a low power CO<sub>2</sub> laser [J]. *Laser Phys*, 2016, 26: 096101.
- [8] Shashi Prakash, Subrata Kumar. Fabrication of microchannels on transparent PMMA using CO<sub>2</sub> laser (10.6 μm) for microfluidic applications: an experimental investigation [J]. *International Journal of Precision Engine & Manu*, 2015, 16(2): 361–366.
- [9] Jensen M F, Noerholm M, Christensen L. Micro–structure fabrication with a CO<sub>2</sub> laser system: characterization and fabrication of cavities produced by raster scanning of the laser beam[J]. *Lab Chip*, 2003, 3: 302–307.
- [10] Kurnia J, Sasmito A, Birgersson E. Evaluation of mass transport performance in heterogeneous gaseous in–plane spiral reactors with various cross–section geometries at fixed cross–section area [J]. *Chem Eng Process: Process Intensif*, 2014, 82: 101–111.
- [11] Shashi Prakash, Nitish Kumar, Subrata Kumar. Monte–carlo based uncertainty analysis for CO<sub>2</sub> laser microchanneling model [J]. *Materials Science & Engineering*, 2016, 149: 012125.
- [12] Samant A N, Dahotre N B. Physical effects of multipass two–dimensional laser machining of structural ceramics [J]. *Adv Eng Mater*, 2009, 11(7): 579–85.