

# 355 nm 全固态紫外激光直写刻蚀硼硅玻璃微通道

李奇思<sup>1,2\*</sup>, 梁庭<sup>1,2\*\*</sup>, 雷程<sup>1,2</sup>, 李旺旺<sup>1,2</sup>, 林立娜<sup>1,2</sup>, 杨娇燕<sup>1,2</sup>, 熊继军<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;

<sup>2</sup>中北大学电子测试技术国防科技重点实验室, 山西 太原 030051

**摘要** 利用 355 nm 全固态紫外激光对硼硅玻璃进行了直写刻蚀实验, 采用单一变量法探究了激光能量密度、重复频率、扫描速度、扫描间距、扫描次数对刻蚀结果的影响。研究表明, 激光能量密度过大时, 玻璃易发生严重的崩边裂损现象; 等离子体屏蔽效应随激光能量密度的增大而增强, 刻蚀深度减小; 随着重复频率的减小, 通道边缘碎裂的现象减轻, 刻蚀深度增大; 减小扫描间距可有效改善沟道底面的平整度; 刻蚀深度随扫描次数的增多而增大, 同时沟道锥度增大。在较优的加工参数下, 实现了宽度为 84.8  $\mu\text{m}$ , 刻蚀深度为 178  $\mu\text{m}$ , 底面较平整, 沟道垂直度达 89.580° 的 L 型微通道的直写刻蚀。

**关键词** 激光技术; 激光制造; 全固态紫外激光; 硼硅玻璃; 微通道刻蚀

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0802003

## 355 nm All-Solid-State Ultraviolet Laser Direct Writing and Etching of Micro-Channels in Borosilicate Glass

Li Qisi<sup>1,2\*</sup>, Liang Ting<sup>1,2\*\*</sup>, Lei Cheng<sup>1,2</sup>, Li Wangwang<sup>1,2</sup>,

Lin Lina<sup>1,2</sup>, Yang Jiaoyan<sup>1,2</sup>, Xiong Jijun<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China;

<sup>2</sup>Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

**Abstract** An experiment of 355 nm all-solid-state ultraviolet laser direct writing and etching of borosilicate glass is conducted to investigate the effects of laser energy density, repetition frequency, scanning speed, scanning distance and number of scanning on the etching results based on the single variable method. The research results show that, serious collapse phenomena occur in glass if laser energy density is too large. The plasma shielding effect increases and the etching depth decreases with the increase of laser energy density. With the decrease of repetition frequency, the channel edge fragmentation gradually reduces and the etching depth increases. The reduction of scanning distance can effectively improve the channel bottom surface flatness. The etching depth increases with the increase of number of scanning and simultaneously the channel taper increases. Under the optimal processing parameters, the direct writing and etching of L-shaped micro-channel with a width of 84.8  $\mu\text{m}$ , an etching depth of 178  $\mu\text{m}$ , a flat bottom surface and a channel verticality of 89.580° is realized.

**Key words** laser technique; laser manufacturing; all-solid-state ultraviolet laser; borosilicate glass; micro-channel etching

**OCIS codes** 140.3390; 140.3580; 140.3610; 220.4610

## 1 引 言

作为一种新兴的技术, 微流控受到了许多从事

物理科学、生命科学及工程科学的研究者的广泛关注<sup>[1]</sup>。科研市场和医疗的需求与日益成熟的微纳加工技术使微流控芯片技术迅速发展<sup>[2]</sup>。材料对微流

收稿日期: 2018-01-30; 修回日期: 2018-03-11; 录用日期: 2018-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(51405454)、国家杰出青年科学基金(51425505)

\* E-mail: L18234067499@163.com; \*\* E-mail: liangtingnuc@163.com

控芯片的构建起着关键作用,硼硅玻璃具有透光率高、热膨胀系数低、耐热性强、化学稳定性好等优点,是一种理想的微流控芯片基材<sup>[3]</sup>。

微通道是微流控芯片的基本组成部分,其宽度一般为几十微米到几百微米,但由于硼硅玻璃属于硬脆性材料,其熔点高、硬度大、质地较脆,这些特点使其在加工方面存在很大的困难<sup>[4]</sup>。与传统的化学湿法腐蚀、等离子体刻蚀等加工技术相比,激光加工技术属于无接触式加工,可以直接写入图形,且具有加工精度高、工艺简单、刻蚀效率高等独特优势<sup>[5]</sup>。目前,激光刻蚀硼硅玻璃的方法主要包括飞秒激光改性辅助化学刻蚀、超短脉冲激光加工、紫外纳秒激光加工等<sup>[6]</sup>。飞秒激光改性辅助化学刻蚀主要利用飞秒激光扫描材料的内部区域,使其发生化学改性,再使用刻蚀剂溶液对该改性区域进行腐蚀,以制作硼硅玻璃微通道<sup>[7]</sup>。Matsuo 等<sup>[8]</sup>利用波长为 800 nm 的飞秒激光脉冲在 Pyrex 7740 硼硅玻璃材料内部进行扫描使其改性后,以摩尔浓度为 10 mol/dm<sup>3</sup> 的 KOH 溶液为刻蚀剂,实现了材料内部三维微通道的刻蚀,最大刻蚀速率约为 4 μm/min。但该方法同时存在刻蚀速率不稳定、需选择适宜的刻蚀剂温度及浓度等问题。近年来,也有利用超短脉冲激光和紫外纳秒激光对玻璃材料进行直接刻蚀的相关研究。Queste 等<sup>[9]</sup>利用波长为 800 nm 的飞秒激光,在重复频率为 5 kHz、平均功率为 160 mW、脉冲持续时间为 120 fs、工作时间为 3 min 的条件下,制得了 100 μm 宽、140 μm 深、垂直度为 80°~85°的硼硅玻璃微通道。但飞秒激光本身非常昂贵,且其低效率的加工方式不利于批量生产和工业应用<sup>[10]</sup>。紫外纳秒激光加工主要利用准分子激光和固态紫外激光<sup>[11]</sup>,但目前紫外纳秒激光加工玻璃材料的研究主要集中于石英玻璃材料。王汕<sup>[12]</sup>利用 355 nm 全固态紫外激光器对石英玻璃表面进行了直写刻蚀,得到的石英玻璃微通道的刻蚀边缘有碎裂现象,但刻蚀线较为齐整,刻蚀深度为 100 μm。杨桂栓等<sup>[13]</sup>利用 248 nm 准分子激光对石英玻璃的无裂损刻蚀工艺进行了研究,获得了无裂损的石英玻璃表面微通道,但其平均刻蚀深度仅为 13.5 μm。

高能紫外纳秒激光在玻璃材料上的快速沉积会使其迅速升温,当其温度达到相爆炸阈值时,将产生剧烈的沸腾性爆炸,此时大量高温熔融飞溅物向外喷射,玻璃材料发生大范围去蚀<sup>[14]</sup>。因此,利用紫外纳秒激光直写刻蚀玻璃材料可以得到较大的刻蚀

深度,在获得具有较大深宽比的玻璃微通道方面具有独特优势。本文探究了 355 nm 全固态紫外激光直写刻蚀硼硅玻璃时各加工参数对表面质量、刻蚀深度、底面平整度、通道垂直度的影响,并结合实验结果分析得出了较优的加工参数,得到了表面裂损尺寸较小、刻蚀深度较大、垂直度高、底面较为平整的硼硅玻璃微通道。

## 2 实验材料及装置

### 2.1 实验材料及处理方法

实验所用的硼硅玻璃材料为德国肖特公司生产的 BOROFLUAT33 (BF33) 型高品质硼硅玻璃晶圆,晶圆直径为 4 inch (1 inch = 2.54 cm),厚度为 1 mm。实验前将 BF33 玻璃放入无水乙醇中超声清洗 5 min,以去除玻璃表面的碎屑,取出后用去离子水冲洗,最后用氮气将其吹干备用。

### 2.2 实验装置及研究方法

利用苏州德龙激光公司的 FPS 紫外微加工系统对 BF33 玻璃进行直写刻蚀,该系统主要由全固态紫外激光器、紫外激光专用光学系统(包括扩束系统、振镜扫描系统和扫描聚焦透镜)、精密三维加工系统、计算机控制系统及吸尘、水冷等辅助装置构成。实验装置的示意图如图 1 所示,其中 XYZ 轴为坐标轴。

实验所用的紫外激光器为苏州 Bellin Laser 公司的 MP101 型全固态紫外激光器,其波长为 355 nm,脉宽为 10~25 ns,重复频率为 20~100 kHz,单脉冲能量为 0~300 μJ,激光光斑模式为基横模(TEM<sub>00</sub>)模式,其实物图如图 2(a)所示,加工平台如图 2(b)所示,FPS 紫外微加工系统如图 2(c)所示。

刻蚀时激光脉冲能量由北京物科光电公司的 LPE-1B 型激光功率能量计测量,实验测得圆形激光光斑的直径为 20 μm,激光能量密度可由单脉冲能量除以光斑面积计算得出。由于加工过程中会喷射出较多的飞溅物附着在样品表面,实验结束后需将样品超声清洗 15 min,以便在显微镜下能观察到其准确的表面形貌。使用日本 OLYMPUS 公司的 LEXT OLS4100 激光共聚焦显微镜观察硼硅玻璃刻蚀后微通道的表面及底部形貌,使用美国 KLA-Tencor 公司的 P-7 型台阶仪测量刻蚀深度及微通道的底面粗糙度,使用德国 ZEISS 公司的 SUPRA 55 SAPPHIRE 型场发射扫描电子显微镜(SEM)观察通道的整体形貌及截面形貌。

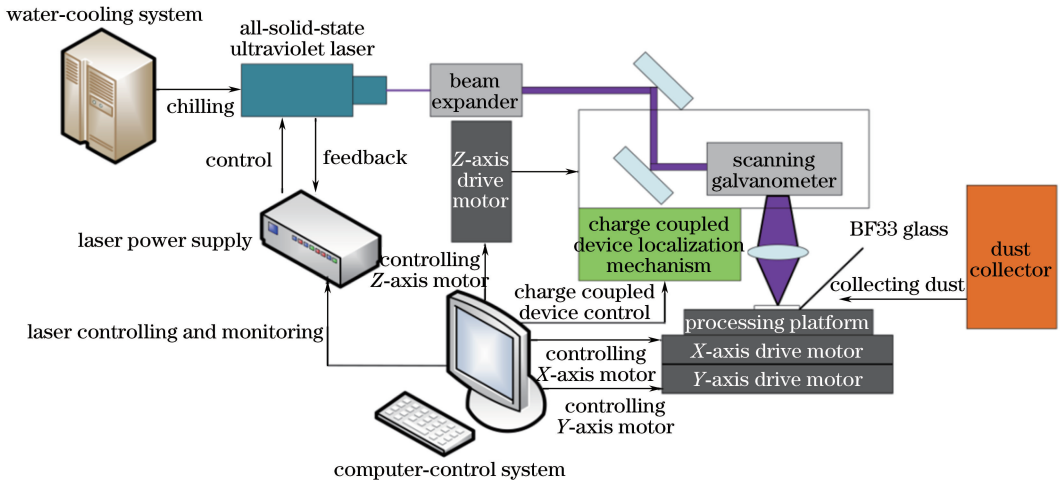


图 1 紫外微加工系统直写刻蚀 BF33 玻璃的示意图

Fig. 1 Schematic of direct writing and etching of BF33 glass based on ultraviolet micromachining system

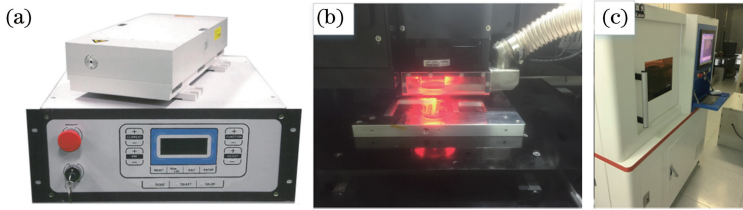


图 2 实验装置实物图。(a)全固态紫外激光器；(b)加工平台；(c)FPS 紫外微加工系统

Fig. 2 Physical map of experimental device. (a) All-solid-state ultraviolet laser;

(b) processing platform; (c) FPS ultraviolet micromachining system

### 3 实验结果

#### 3.1 激光能量密度对刻蚀结果的影响

采用单一变量法研究激光能量密度对硼硅玻璃刻蚀质量的影响。在重复频率为 30 kHz、扫描速度

为 0.2 mm/s、扫描间距为 20 μm、扫描 1 次、离焦量为 0 的条件下，调节激光功率以改变激光能量密度，对硼硅玻璃表面进行刻蚀实验。刻蚀后微通道的表面形貌如图 3(a)~(e)所示，微通道深度随激光能量密度的变化如图 3(f)所示。从图 3 可以看出，当

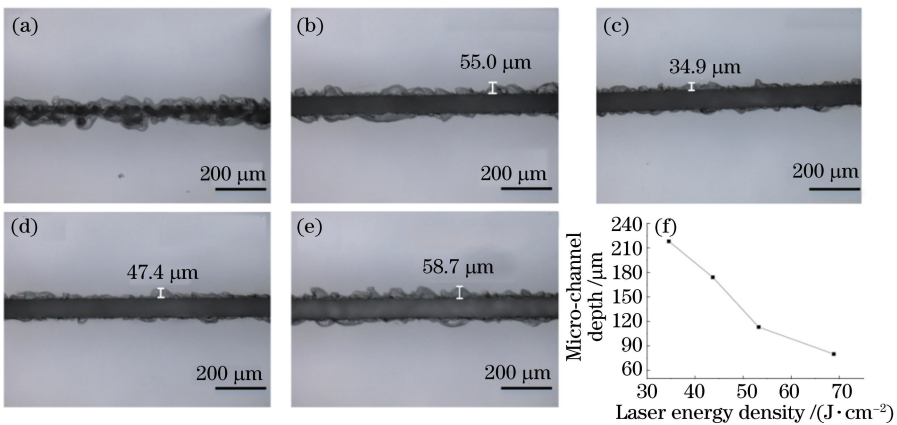


图 3 不同能量密度下紫外激光刻蚀硼硅玻璃微通道的表面形貌和微通道深度。(a) 25.28 J·cm<sup>-2</sup>；(b) 34.55 J·cm<sup>-2</sup>；

(c) 43.70 J·cm<sup>-2</sup>；(d) 53.23 J·cm<sup>-2</sup>；(e) 68.84 J·cm<sup>-2</sup>；(f) 微通道深度随激光能量密度的变化

Fig. 3 Surface morphologies and depths of micro-channels in borosilicate glass by ultraviolet laser etching under different energy densities. (a) 25.28 J·cm<sup>-2</sup>；(b) 34.55 J·cm<sup>-2</sup>；(c) 43.70 J·cm<sup>-2</sup>；(d) 53.23 J·cm<sup>-2</sup>；

(e) 68.84 J·cm<sup>-2</sup>；(f) micro-channel depth versus laser energy density

激光能量密度为  $25.28 \text{ J/cm}^2$  时,激光在硼硅玻璃表面扫描后形成了不规则的点状刻蚀,刻蚀效果较差。激光能量密度增大到  $34.55 \text{ J/cm}^2$  时,刻蚀出了形状规则的微通道,此时刻蚀深度达  $218 \mu\text{m}$ ,但存在较为严重的崩边、碎裂现象,最大崩边宽度达  $55 \mu\text{m}$ 。当激光能量密度为  $43.70 \text{ J/cm}^2$  时,裂损情况明显减轻,此时最大崩边宽度为  $34.9 \mu\text{m}$ ,刻蚀深度为  $174 \mu\text{m}$ 。当能量密度为  $53.23 \text{ J/cm}^2$  时,最大崩边宽度增至  $47.4 \mu\text{m}$ ,而刻蚀深度降至  $113 \mu\text{m}$ 。能量密度继续增大至  $68.84 \text{ J/cm}^2$  时,刻蚀深度仅为  $80 \mu\text{m}$ ,但裂损现象较为严重,最大崩边宽度达到了  $58.7 \mu\text{m}$ 。故激光能量密度过大或在有效刻蚀阈值附近时,裂损情况较严重,且刻蚀深度随能量密度的增大而减小。

### 3.2 激光重复频率对刻蚀结果的影响

选取激光能量密度为  $43.70 \text{ J/cm}^2$ ,扫描速度为

$0.2 \text{ mm/s}$ ,扫描间距为  $20 \mu\text{m}$ ,扫描1次,离焦量为0,通过改变激光脉冲重复频率探究其对刻蚀结果的影响。图4(a)~(c)所示为不同重复频率下激光刻蚀微通道的表面形貌,微通道深度随激光重复频率的变化如图4(d)所示。可以看出,当重复频率为  $40 \text{ kHz}$  时,微通道边缘的碎裂情况较为严重,如图4(a)所示,红圈区域内存在一些宽度为  $13.8 \mu\text{m}$  的小型微碎块,此时微通道的刻蚀深度为  $109 \mu\text{m}$ 。当重复频率为  $30 \text{ kHz}$  时,如图4(b)所示,红圈区域内的碎块变大,宽度增至  $21.2 \mu\text{m}$ ,且碎块数量减少,说明微通道边缘只发生了轻微碎裂,同时刻蚀深度增至  $149 \mu\text{m}$ 。继续降低重复频率至  $25 \text{ kHz}$  时,几乎没有碎块产生,如图4(c)所示,红圈内出现了一段形貌相对较好的微通道边缘区域,微通道的刻蚀深度为  $175 \mu\text{m}$ 。故随着重复频率的减小,碎裂现象逐渐减轻,刻蚀深度逐渐增大。

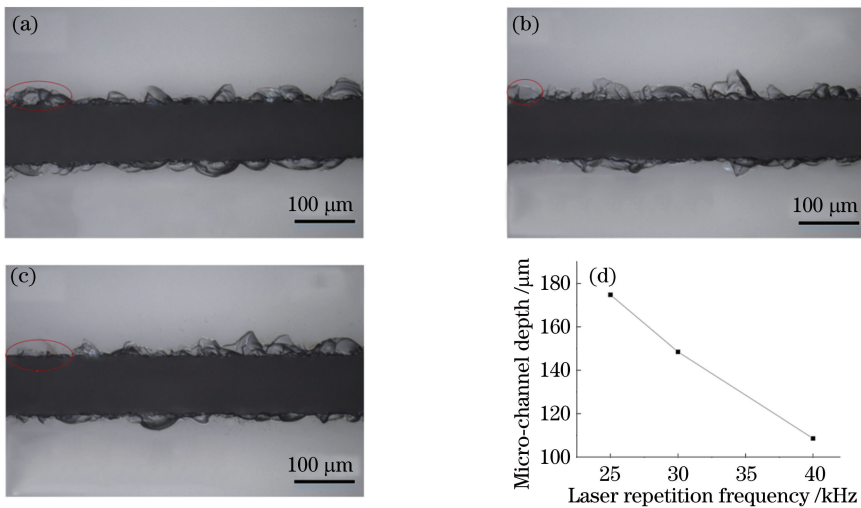


图4 不同重复频率下紫外激光刻蚀硼硅玻璃微通道的表面形貌和微通道深度。

(a)  $40 \text{ kHz}$ ; (b)  $30 \text{ kHz}$ ; (c)  $25 \text{ kHz}$ ; (d)微通道深度随激光重复频率的变化

Fig. 4 Surface morphologies and depths of micro-channels in borosilicate glass by ultraviolet laser etching under different repetition frequencies. (a)  $40 \text{ kHz}$ ; (b)  $30 \text{ kHz}$ ; (c)  $25 \text{ kHz}$ ; (d) micro-channel depth versus laser repetition frequency

### 3.3 扫描速度对刻蚀结果的影响

在激光能量密度为  $43.70 \text{ J/cm}^2$ 、重复频率为  $25 \text{ kHz}$ 、扫描间距为  $20 \mu\text{m}$ 、扫描1次、离焦量为0的条件下,调整激光扫描速度对硼硅玻璃表面进行刻蚀。刻蚀后的微通道表面形貌如图5(a)~(c)所示,微通道深度随激光扫描速度的变化如图5(d)所示。可以看出,当扫描速度为  $1.0 \text{ mm/s}$  时,通道边缘附着了大量的熔融凝固物,且裂损现象较严重,最大崩边宽度达  $57.6 \mu\text{m}$ ,此时刻蚀深度仅为  $121 \mu\text{m}$ 。当扫描

速度降至  $0.5 \text{ mm/s}$  时,附着在通道边缘的熔融凝固物明显减少,但裂损现象未明显改善,最大崩边宽度为  $55.8 \mu\text{m}$ ,此时刻蚀深度增至  $147 \mu\text{m}$ 。进一步减小扫描速度至  $0.2 \text{ mm/s}$  时,几乎没有熔融凝固物附着在微通道边缘,且碎裂情况明显改善,最大崩边宽度降至  $38.0 \mu\text{m}$ ,刻蚀线更加平整,此时微通道刻蚀深度可达  $175 \mu\text{m}$ 。由以上实验结果可知,随着扫描速度的减小,通道边缘的熔融凝固物逐渐消失,刻蚀边缘的形貌有所改善,且刻蚀深度随之增大。



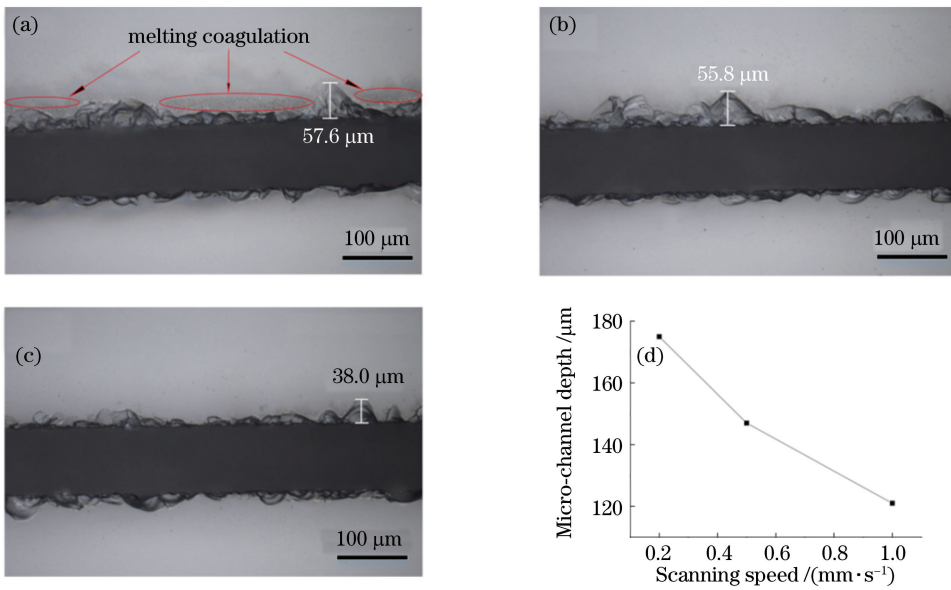


图 5 不同扫描速度下紫外激光刻蚀硼硅玻璃微通道的表面形貌和微通道深度。

(a) 1.0 mm·s<sup>-1</sup>; (b) 0.5 mm·s<sup>-1</sup>; (c) 0.2 mm·s<sup>-1</sup>; (d) 微通道深度随激光扫描速度的变化

Fig. 5 Surface morphologies and depths of micro-channels in borosilicate glass by ultraviolet laser etching under different scanning speeds. (a) 1.0 mm·s<sup>-1</sup>; (b) 0.5 mm·s<sup>-1</sup>; (c) 0.2 mm·s<sup>-1</sup>; (d) micro-channel depth versus laser scanning speed

### 3.4 扫描间距对刻蚀结果的影响

保持其他加工条件不变,使焦点位于样品表面,并将刻蚀面积扩大至 1 mm×1 mm,改变激光的扫描间距以观察其对刻蚀结果的影响。图 6 所示为不同扫描间距下紫外激光所刻蚀微通道的底部形貌,可以看出,当扫描间距为 25 μm 时,通道底部主要存在平行相间的波纹和附着在底部的熔融物,其底

面粗糙度  $R_a$  值经测量为 11.2 μm。当扫描间距为 15 μm 时,平行波纹消失,底部主要存在的是激光作用后留下的烧蚀坑及熔融物,此时底面粗糙度  $R_a$  值大幅减小至 3.99 μm。继续减小扫描间距至 10 μm 时,底部主要存在的仍为烧蚀坑及熔融物,但其粗糙度  $R_a$  值减小为 3.65 μm。可以看出,扫描间距的缩短有效改善了刻蚀底面的平整度。

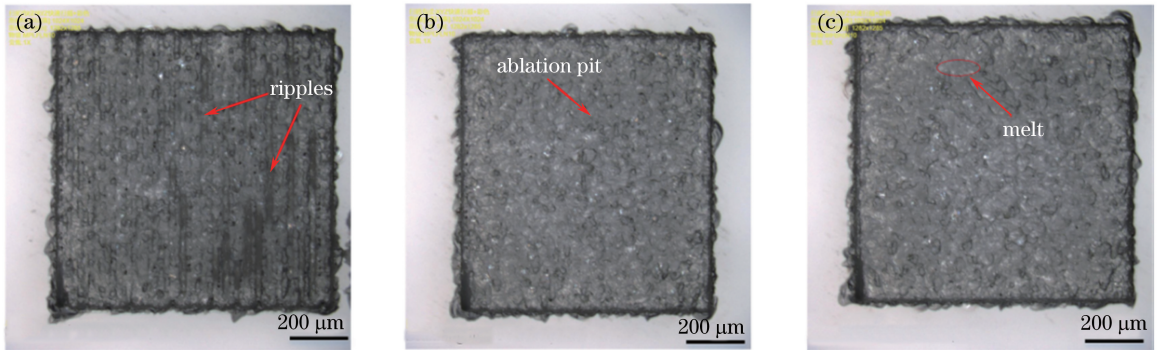


图 6 不同扫描间距下紫外激光刻蚀硼硅玻璃微通道的底部形貌。(a) 25 μm; (b) 15 μm; (c) 10 μm

Fig. 6 Bottom morphologies of micro-channels in borosilicate glass by ultraviolet laser etching under different scanning distances. (a) 25 μm; (b) 15 μm; (c) 10 μm

### 3.5 扫描次数对刻蚀结果的影响

在其他加工条件不变的情况下,通过设置 Z 轴的进给距离以保证每次扫描焦点均位于刻蚀表面,逐步增加激光扫描的次数以探究其对刻蚀结果的影响。图 7(a)~(d) 所示为不同扫描次数下,使用

SEM 观察到的微通道截面形貌。图 7(e)、(f) 所示分别为微通道深度、锥度随激光扫描次数的变化情况。可以看出,扫描 1 次时,微通道垂直度较好,其锥度角仅为 0.526°,刻蚀深度为 174 μm。当扫描次数为 2 次时,可观察到微通道有明显的锥度,其锥度角增

至  $3.005^\circ$ , 刻蚀深度为  $381\ \mu\text{m}$ 。扫描次数增至 3 次时, 微通道的锥度愈发明显, 此时锥度角为  $3.650^\circ$ , 刻蚀深度增至  $558\ \mu\text{m}$ 。扫描次数增至 4 次时, 刻蚀深

度达到了  $624\ \mu\text{m}$ , 同时微通道的锥度角增至  $4.002^\circ$ 。由以上实验结果可知, 随着扫描次数的增多, 刻蚀深度逐渐增大, 但同时沟道锥度也逐渐增大。

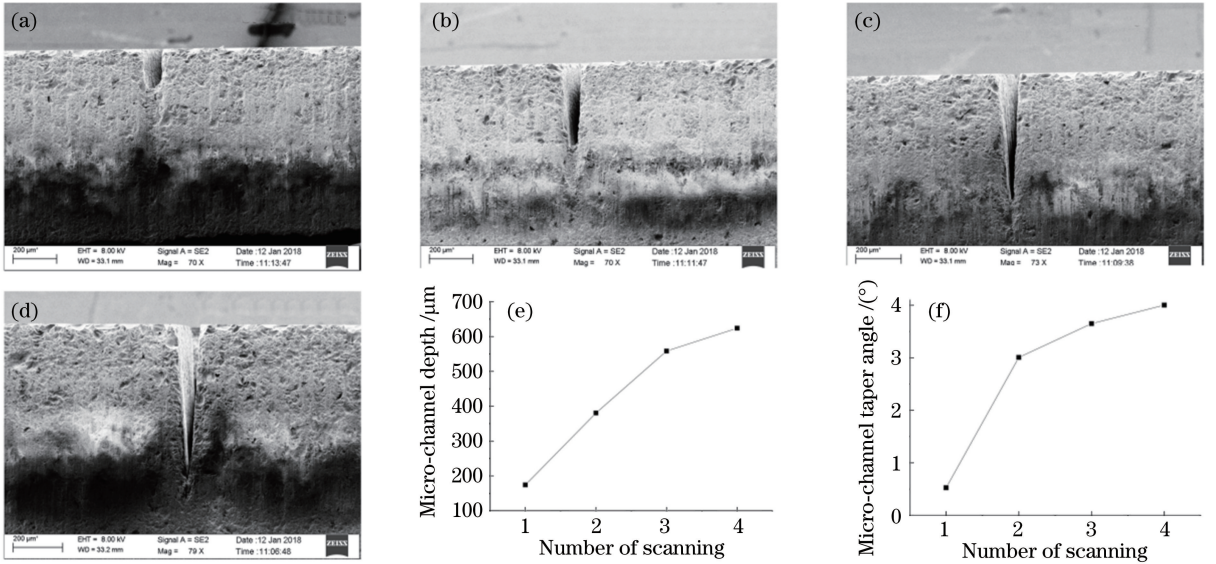


图 7 不同扫描次数下紫外激光刻蚀硼硅玻璃微通道截面形貌的 SEM 图和微通道深度/锥度。(a) 1 次; (b) 2 次; (c) 3 次; (d) 4 次; (e) 微通道深度随激光扫描次数的变化; (f) 微通道锥度随激光扫描次数的变化

Fig. 7 Cross-sectional SEM images and depths/tapers of micro-channels in borosilicate glass by ultraviolet laser etching under different number of scanning. (a) 1 time; (b) 2 times; (c) 3 times; (d) 4 times; (e) micro-channel depth versus number of laser scanning; (f) micro-channel taper versus number of laser scanning

## 4 分析与讨论

紫外纳秒激光属于长脉冲激光, 其刻蚀硼硅玻璃的机理主要是雪崩电离机制<sup>[15]</sup>。雪崩电离要求介质中存在种子电子, 纳秒激光的脉冲宽度较大, 很难达到较高的峰值功率, 在低能密度激光的辐照下, 束缚电子很难摆脱原子成为自由电子。但在实际的玻璃材料中, 总是存在一些杂质, 这些杂质在低能态热光子或线性光子电离下产生出的自由电子可作为雪崩效应的起因, 故纳秒脉冲激光在高输出功率的情况下, 也能使透明介质发生破坏<sup>[16]</sup>。当激光能量密度低于有效刻蚀阈值时, 出现的点状刻蚀现象与材料表面的缺陷有密切联系。当材料表面存在缺陷时, 这些缺陷对激光能量的超强吸收导致了缺陷处在激光能量作用下的熔融烧蚀, 从而在材料表面产生损伤点。当激光能量密度增至有效刻蚀阈值附近时, 较高的能量密度激发了材料的内部缺陷, 从而引

发内部晶格结构的应力拉裂, 破坏玻璃表面的应力分布, 导致了裂损现象的出现。而当激光能量密度较大时, 由于激光脉冲的持续时间为纳秒量级, 光致电离物质对高密度激光产生重吸收, 引发强烈的等离子体团爆炸现象, 加重了通道边缘的裂损。

刻蚀深度随激光能量密度的增大逐渐减小, 这是由于刻蚀产生的大量蒸汽和等离子云团存在于材料近表面的空气层中, 对激光束形成了一定的屏蔽作用<sup>[17]</sup>, 降低了作用在刻蚀区域的实际能量密度, 使刻蚀深度在激光能量密度增大时呈下降趋势。

激光器脉宽与重复频率的对应关系见表 1。当激光能量不变时, 随着重复频率的减小, 脉宽减小, 峰值功率增大, 因此更多的激光能量用于汽化材料, 并将烧蚀的熔融物排出, 刻蚀深度增大。而且脉宽减小使激光脉冲作用于材料上的时间变短, 热传导距离因此减小, 降低了由温度梯度产生的热应力, 有效改善了通道边缘的碎裂现象。

表 1 激光器脉宽与重复频率间的关系

Table 1 Correspondence between laser pulse width and repetition frequency

Repetition frequency / kHz	25	30	40	50	60	70	80	90
Pulse width / ns	10.1	11.5	13.4	15.5	17.7	19.8	21.0	23.2



激光光斑的重叠率  $\alpha$  与扫描速度的关系为

$$\alpha = \frac{D - V}{Df} \times 100\%, \quad (1)$$

式中  $D$  为激光光斑直径,  $V$  为加工速度,  $f$  为重复频率。因此, 随着扫描速度的增大, 光斑重叠率减小, 材料吸收的激光能量减少, 导致刻蚀深度减小, 同时光斑重叠率的减小也使得刻蚀边缘的形貌变差。且当扫描速度增大时, 单位距离内作用在材料上的脉冲数减少, 而脉冲数表征了激光与材料之间作用时间, 决定了激光能量传递到材料内部的深浅程度。因此, 当脉冲数减少时, 部分能量传递不到材料内部而积聚于材料表层, 促使了通道边缘熔融凝固物的生成<sup>[18]</sup>。

当扫描间距大于光斑直径时, 相邻光斑间产生了一块未被扫描的区域。该区域主要依靠两侧光斑边缘的热量积累产生汽化蒸发, 刻蚀速度较慢, 因此未被扫描区域相较于光斑扫描区域呈凸起状; 同时, 光斑扫描区域被刻蚀后产生的一部分熔融物在凸起区域边缘重新凝结, 使得通道底部形成了平行相间的波纹。当扫描间距小于光斑直径时, 平行波纹消失, 底部的剩余熔融物及烧蚀坑成为影响底面平整度的主要因素。由于紫外激光光强呈高斯分布, 故在刻蚀材料时, 光斑中心的去蚀量较光斑边缘的要大, 因此激光脉冲刻蚀时会形成一定高度差。当扫描间距减小时, 相邻光斑的中心距离随之减小, 有效减小了由光斑光强的高斯分布产生的刻蚀高度差, 故底面粗糙度  $R_a$  值减小。

随着刻蚀深度的增大, 沟道边缘不断累积未喷射出沟道的熔融物, 这些熔融物形成了一层掩蔽层, 阻挡了下层材料对激光能量的吸收, 随着被冲刷到沟道边缘的残余熔融物的不断增多, 屏蔽面积越来越大, 导致沟道锥度逐渐增大。

基于以上研究, 对加工参数进行优化后, 在硼硅玻璃材料上进行了 L 型微通道的刻蚀。图 8 所示是在激光能量密度为  $43.70 \text{ J/cm}^2$ 、重复频率为  $25 \text{ kHz}$ 、扫描速度为  $0.2 \text{ mm/s}$ 、扫描间距为  $10 \mu\text{m}$ 、焦点位于材料表面、扫描 1 次的条件下刻蚀的 L 形微通道的整体形貌。其宽度为  $84.8 \mu\text{m}$ , 刻蚀深度达  $178 \mu\text{m}$ , 底面粗糙度  $R_a$  为  $3.55 \mu\text{m}$ , 有轻微崩边, 但刻蚀线较为齐整, 沟道垂直度达  $89.580^\circ$ 。

## 5 结 论

探究了  $355 \text{ nm}$  全固态紫外激光直写刻蚀硼硅

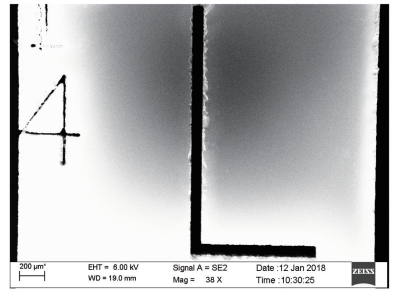


图 8 优化加工参数下刻蚀的 L 形微通道的整体形貌  
Fig. 8 Overall morphology of L-shaped micro-channel etched under optimal processing parameters

玻璃微通道时, 各激光加工参数对刻蚀结果的影响。激光能量密度在刻蚀阈值附近时, 较高的能量密度激发了材料的内部缺陷, 引发了内部晶格结构的应力拉裂, 破坏了玻璃表面的应力分布; 激光能量密度较大时, 光致电离物质对高密度激光产生了重吸收, 引发了强烈的等离子体团爆炸, 这两种条件下通道边缘均出现了较严重的裂损现象。由于等离子体的屏蔽效应随激光能量密度的增大而增强, 故刻蚀深度随激光能量密度的增大呈减小趋势。低重复频率时, 脉宽较短, 峰值功率增大, 故材料去蚀量增大; 同时材料表面的热传导距离减小, 减轻了因热应力产生的边缘碎裂现象。适宜的低速加工可增大光斑的搭接率及单位距离内作用在材料上的脉冲数, 在保证材料去蚀量的同时, 也有利于获得较好的边缘形貌。随着扫描间距的减小, 相邻光斑的重叠率增大, 刻蚀底面的平整度逐渐改善。刻蚀深度随扫描次数的增大而增大, 但随着刻蚀深度的增大, 未能喷发出沟道的熔融物被冲刷聚集在沟道边缘形成掩蔽层, 阻碍了激光对材料的刻蚀。边缘区域熔融物的不断堆积使屏蔽面积不断增大, 沟道锥度也不断增大。

研究结果对  $355 \text{ nm}$  全固态紫外激光直写刻蚀硼硅玻璃微通道的参数选取具有一定的参考价值。实验虽可获得较大的刻蚀深度, 但无法避免裂损现象, 沟道底部粗糙度略大, 还存在沟道锥度随扫描次数的增大而增大的问题, 以后的工作将围绕改善底面粗糙度及多次加工后的沟道锥度两方面展开。

## 参 考 文 献

- [1] Qin J H. Some advances in microfluidic technology [J]. Chinese Journal of Chromatography, 2010, 28(11): 1009-1010.  
秦建华. 微流控技术研究的若干进展[J]. 色谱, 2010, 28(11): 1009-1010.
- [2] Wang H. Functional microfluidic chip laser

- preparation and application [D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- 王欢. 功能微流控芯片的激光制备及应用[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [3] Zheng X L, Yan J W, Hu N, *et al.* Research progress on materials and processing methods of microfluidic chips [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2011, 30(6): 1-4.
- 郑小林, 鄢佳文, 胡宁, 等. 微流控芯片的材料与加工方法研究进展 [J]. *传感器与微系统*, 2011, 30(6): 1-4.
- [4] Yang G S, Chen H, Chen T. Study on low-loss microcracks of 248 nm excimer laser etching soda-lime glass [J]. *Applied Laser*, 2017, 37(4): 586-592.
- 杨桂栓, 陈虹, 陈涛. 248 nm 准分子激光刻蚀钠钙玻璃微通道低裂损工艺研究 [J]. *应用激光*, 2017, 37(4): 586-592.
- [5] Yang X. Study on micro-fabrication of single-crystal silicon by ultraviolet laser [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- 杨雄. 单晶硅紫外激光微加工工艺研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [6] Zhou B G, Guo Z N, Yu Z Q, *et al.* Microfluidic chip fabrication based on glass substrate [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2017, 46(2): 49-57.
- 周兵高, 郭钟宁, 于兆勤, 等. 基于玻璃基材的微流控芯片制造工艺 [J]. *机电工程技术*, 2017, 46(2): 49-57.
- [7] Cai H L, Yan X L, Wang S M, *et al.* Research progress on processing femtosecond laser microchannels [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2012, 32(10): 991-1003.
- 蔡海龙, 闫雪亮, 王素梅, 等. 飞秒激光微通道加工研究进展 [J]. *北京理工大学学报*, 2012, 32(10): 991-1003.
- [8] Matsuo S, Sumi H, Kiyama S, *et al.* Femtosecond laser-assisted etching of pyrex glass with aqueous solution of KOH [J]. *Applied Surface Science*, 2009, 255(24): 9758-9760.
- [9] Queste S, Salut R, Clatot S, *et al.* Manufacture of microfluidic glass chips by deep plasma etching, femtosecond laser ablation, and anodic bonding [J]. *Microsystem Technologies*, 2010, 16(8/9): 1485-1493.
- [10] Cao X W, Zhang L, Yu Y S, *et al.* Preparation of micro-optical components by femtosecond laser and its application [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0102004.
- 曹小文, 张雷, 于永森, 等. 飞秒激光制备微光学元件及其应用 [J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0102004.
- [11] Nie S L, Guan Y C. Ultraviolet laser and its application in micromachining [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(12): 1169-1179, 1251.
- 聂世琳, 管迎春. 紫外激光器及其在微加工中的应用 [J]. *光电工程*, 2017, 44(12): 1169-1179, 1251.
- [12] Wang S. Study of laser etch-polished quartz glass technology [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- 王汕. 激光刻蚀抛光石英玻璃工艺研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [13] Yang G S, Chen T, Chen H. Micro-channel of quartz glass surface with 248 nm excimer laser etching [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(9): 0902004.
- 杨桂栓, 陈涛, 陈虹. 248 nm 准分子激光刻蚀的无裂损石英玻璃表面微通道 [J]. *中国激光*, 2017, 44(9): 0902004.
- [14] Wang K F, Zhang Q H. Microstructure of high-energy nanosecond laser ablated single crystal silicon [J]. *Laser Journal*, 2012, 33(5): 36-37.
- 王克甫, 张秋慧. 高能纳秒激光烧蚀单晶硅的微观结构 [J]. *激光杂志*, 2012, 33(5): 36-37.
- [15] Zhang S G. Theoretical and experimental research on ultrashort pulse frequency multiplication of periodically-polarized microstructure [D]. Tianjin: Nankai University, 2009.
- 张双根. 周期极化微结构超短脉冲倍频的理论和实验研究 [D]. 天津: 南开大学, 2009.
- [16] Wu Y. Study on theory and technology of photosensitive glass ultraviolet pulsed laser micromachining [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- 邬泳. 光敏玻璃紫外脉冲激光微加工理论与技术的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [17] Ye T B. Experimental study of laser plasma shielding [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.
- 叶太兵. 激光等离子体屏蔽现象的实验研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [18] Peng Y, Wen Y, Zhang D S, *et al.* Effect of the proportional relationship between power and number of pulses on the microstructure of silicon surfaces [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(12): 1203005.
- 彭艳, 温雅, 张冬生, 等. 飞秒激光功率与脉冲数的比例关系对制备硅表面微结构的影响 [J]. *中国激光*, 2011, 38(12): 1203005.