

# 透明脆性材料的 bottom-up 激光高速钻孔

王皓智<sup>1</sup>, 郭鹏峰<sup>1</sup>, 吴双<sup>1,2\*</sup>, 陶沙<sup>1</sup>, 陈蔚<sup>1</sup>, 赵晓杰<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>英诺激光科技股份有限公司, 广东 深圳 518000;

<sup>2</sup>江苏微纳激光应用技术研究院有限公司, 江苏 常州 213000

**摘要** 与传统的激光钻孔不同,透明材料的 bottom-up 钻孔是将激光穿过材料,聚焦于材料的下表面,由底部一层一层地将材料向上去除。基于不同脉宽的激光,探讨了玻璃材料 bottom-up 钻孔的机理。结果表明:除了超短脉冲激光外,纳秒激光亦可以实现 bottom-up 钻孔,而且更容易实现零锥度钻孔;bottom-up 钻孔效率随脉宽减小而降低,2 ns~50 ps 激光的切割效率比超快激光高,此结果不同于常用的 top-down 加工的结果,文中亦尝试对此现象进行了解释。

**关键词** 激光加工;激光钻孔;玻璃;纳秒激光;超快激光;超短脉冲激光;零锥度

中图分类号 V261.8

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0302003

## Bottom-Up Drilling of Transparent Materials

Wang Haozhi<sup>1</sup>, Guo Pengfeng<sup>1</sup>, Wu Shuang<sup>1,2\*</sup>, Tao Sha<sup>1</sup>, Chen Wei<sup>1</sup>, Zhao Xiaojie<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Inno Laser Technology Corporation Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China;

<sup>2</sup>Jiangsu Weina Laser Application Technology Research Institute, Changzhou, Jiangsu 213000, China

**Abstract** Unlike traditional laser drilling, the bottom-up drilling of transparent materials involves passing the laser through the material, focusing on the lower surface of the material, and removing the material from the bottom to the top layer by layer. Based on lasers with different pulse widths, this study investigates the mechanism of bottom-up drilling of glass materials. It is found that in addition of ultrashort pulse laser, the nanosecond laser can also achieve bottom-up drilling. Furthermore, it can achieve zero taper drilling. The efficiency of bottom-up drilling decreases with the decrease of pulse width, and the cut efficiency of lasers with pulse width from 2 ns to 50 ps is still higher than that of ultrafast laser. This result differs from the result of general top-down processing, which is attempted to be explained herein.

**Key words** laser technique; laser drilling; glass; nanosecond laser; ultrafast laser; ultrashort pulse laser; zero taper

**OCIS codes** 140.7090; 160.2750

## 1 引言

市场上有愈来愈多的电子产品使用玻璃或蓝宝石玻璃作为基板或保护层,故对在基板上钻孔的需求愈来愈大。由于激光加工具有非接触式特性,因此常采用激光加工取代传统的机械加工。由于玻璃及蓝宝石对大部分激光的波长透明,因此激光加工的方式可分为由上到下(top-down)或是由下到上(bottom-up)。前者就如同一一般材料的激光加工,将激光聚焦于材料上表面,一层一层地消融材料,直至激光将材料钻穿/切穿。后者则反其道而行,激光穿

过材料聚焦于材料的下表面,由底部开始一层一层地将材料向上去除。

一般情况下,采用 top-down 加工时样品会产生坡度。激光加工的深度愈大,缝宽愈窄。材料被切穿时,加工的开口表现为入口大出口小的特征。此外,激光加工时,被气化的材料分子若再进一步吸收激光的能量而离化,就会成为等离子体。等离子体被材料阻挡,只能从材料的反方向逃逸,即从加工面反射。等离子体对于光有很强的吸收能力,当反射的等离子体遇上迎面而来的激光时,部分激光能量就会被吸收,使得加工材料的激光能量减弱,从而降

收稿日期: 2019-09-14; 修回日期: 2019-09-27; 录用日期: 2019-10-14

\* E-mail: wushuang@inno-laser.com

低了激光的加工效率,此为等离子掩盖效应。基于上述现象,材料愈厚,加工速度愈慢,加工速度与厚度的平方成反比。

与 top-down 加工相比,bottom-up 加工方式有其优点。比如:bottom-up 加工方式不会使样品出现坡度,也不会出现等离子掩盖效应<sup>[1-3]</sup>;加工速度与材料厚度呈线性关系,待加工材料越厚,加工速度越慢。但 bottom-up 加工方式的工作区间较 top-down 加工方式的窄,实验上或生产上的设置相对要求高。

为了实现 bottom-up 加工方式的工业化,研究人员对该方法适用的材料(如硅树脂、玻璃材料以及其他聚合物材料等)进行了研究。本研究比较了激光脉宽对玻璃 bottom-up 钻孔的影响,目的是了解

bottom-up 加工方式的机理,更好地对该加工方式进行控制,实现工业化。

## 2 实 验

本研究中使用的激光皆为 Advanced Optowave Corporation 生产的激光器(相关参数如表 1 所示),纳秒激光的波长为 532 nm,皮秒激光的波长为 1064 nm,飞秒激光的波长为 515 nm。在本研究中,采用扫描振镜和场镜将激光聚焦在玻璃的下表面进行加工。扫描振镜和场镜的相关参数如表 2 所示。

实验装置如图 1 所示,激光通过扩束器后进入配有 Z 轴平台的振镜,最后被场镜聚焦后到达样品表面。

表 1 实验用激光器的相关参数

Table 1 Parameters of lasers used in experiment

No.	Model	Wavelength /nm	Pulse width	Max pulse energy / $\mu\text{J}$
Laser 1	AONano-Vanadate	532	<30 ns	800
Laser 2	AONano-XP	532	<5 ns	60
Laser 3	AOPico	1064	<15 ps	60
Laser 4	AOFemto	515	<800 fs	50

表 2 振镜和场镜的相关参数

Table 2 Parameters of galvanometer and field lens

Laser	Galvano brand	Model	Field lens brand	Model	Field lens focal length /mm
Green	SCANLAB	IntelliSCAN III 14	Linos	4401-461-000-21	100
Infrared	SCANLAB	IntelliSCAN III 14	Linos	4401-561-000-21	100

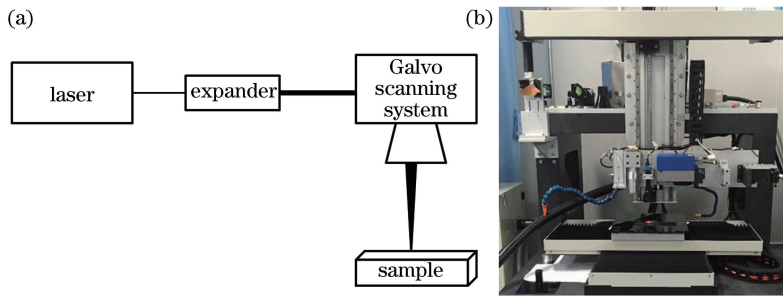


图 1 实验装置示意图和实物图。(a)示意图;(b)实物图

Fig. 1 Schematic and photo of experimental setup. (a) Schematic; (b) photo

## 3 结果与讨论

图 2 为采用纳秒绿光以 bottom-up 的方式在 1 mm 厚显微镜载玻片上进行切割的结果。图 3 为激光扫描次数与切缝深度的关系。由图 2、3 可以看出,激光扫描次数与切缝深度为线性关系,切缝宽度固定且切穿的样品无坡度。

接着比较不同脉宽的激光以 bottom-up 方式在

第三代非强化玻璃——Corning © Gorilla © glass 上钻孔的效率及质量,玻璃的厚度为 0.4 mm。由于加工路径是圆,故激光的切割效率以  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$  作为单位。

图 4 为采用脉宽为 12 ns 的绿光以 bottom-up 方式钻孔的结果,切割效率为  $1.507 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ ,玻璃的最大崩边尺寸约为  $83 \mu\text{m}$ ,所钻的孔没有坡度。

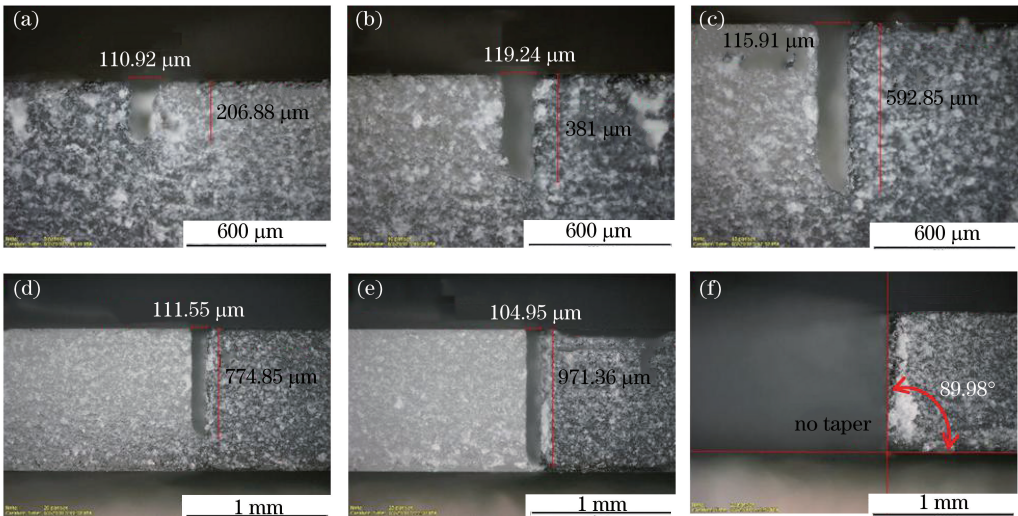


图 2 采用纳秒绿光 bottom-up 加工时,不同扫描次数下载玻片的切割结果。

(a) 5 次;(b) 10 次;(c) 15 次;(d) 20 次;(e) 25 次;(f) 28 次(切穿)

Fig. 2 Cut results of glass slide at different scan times with nanosecond green laser bottom-up processing.

(a) 5 times; (b) 10 times; (c) 15 times; (d) 20 times; (e) 25 times; (f) 28 times, cut through

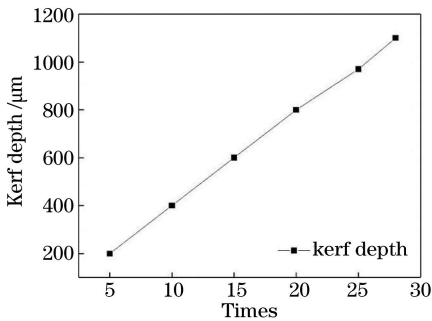


图 3 激光扫描次数与切缝深度的关系

Fig. 3 Relationship between scan times and kerf depth

图 5 为采用脉宽为 2 ns 的绿光以 bottom-up 方式钻孔的结果,切割效率为  $0.454 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ ,玻璃的最大崩边尺寸约为  $41 \mu\text{m}$ 。与 12 ns 绿光的切割结果相同,2 ns 绿光所钻的孔没有坡度。

图 6 为采用红外皮秒激光以 bottom-up 方式钻孔的结果,切割效率为  $0.067 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ 。图 7 为采用飞秒绿光以 bottom-up 方式钻孔的结果,切割效率为  $0.072 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ 。如图 6、7 所示,皮秒红外激光所钻孔的最大崩边尺寸约为  $9.5 \mu\text{m}$ ,而飞秒绿光所钻的孔则没有观察到崩边。

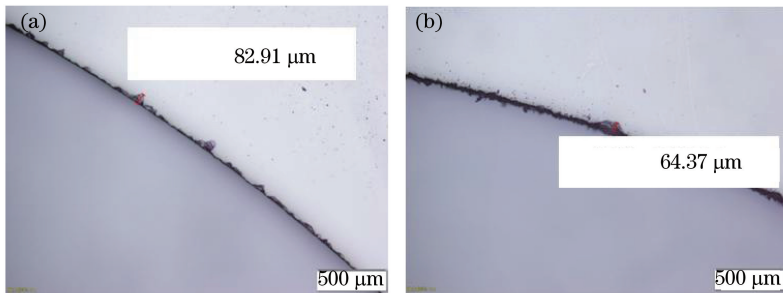


图 4 采用脉宽为 12 ns 的绿光以 bottom-up 方式钻孔的结果。(a)入口;(b)出口

Fig. 4 Bottom-up drilling using green laser with pulse width of 12 ns. (a) Entrance; (b) exit

值得注意的是,采用皮秒或飞秒激光以 bottom-up 方式所钻的孔仍然有斜坡,红外皮秒激光产生的斜坡约为  $10.5 \mu\text{m}$ ,而飞秒绿光产生的斜坡约为  $30 \mu\text{m}$ 。观察后发现,皮秒激光和飞秒激光钻孔方式为不完全的 bottom-up 方式。当激光由底部向上加工到一定程度时,激光会转而由材料上表面开始以 top-down 方式钻孔。这是因为超快激光

的破坏阈值远小于纳秒激光,当激光上升到玻璃中间时,照射在上表面的激光的能量密度已足够破坏上表面。一旦上表面被破坏,激光钻孔的方式便由 bottom-up 转为 top-down,而斜坡也随之产生。此发现与文献[4]的结果一致。

Top-down 加工方式所产生的坡度几乎是固定的,由斜坡的大小可推断出 bottom-up 加工转变为

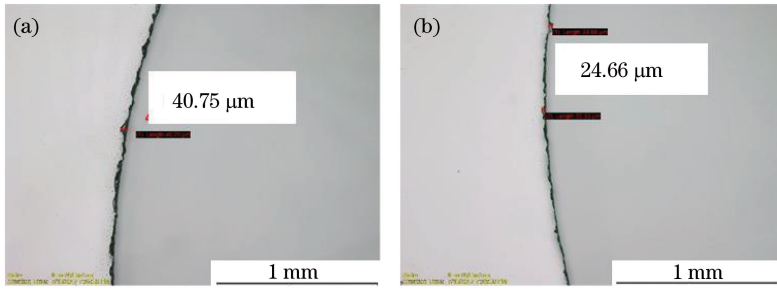


图 5 采用脉宽为 2 ns 的绿光以 bottom-up 方式钻孔的结果。(a)入口;(b)出口  
Fig. 5 Bottom-up drilling using green laser with pulse width of 2 ns. (a) Entrance; (b) exit

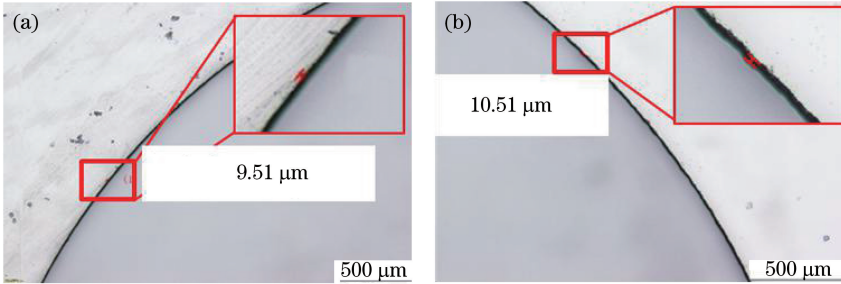


图 6 采用皮秒红外激光以 bottom-up 方式钻孔的结果。(a)入口;(b)出口  
Fig. 6 Bottom-up drilling using picosecond infrared laser. (a) Entrance; (b) exit

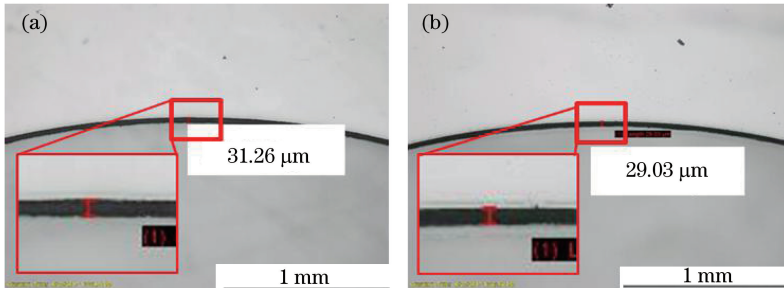


图 7 采用飞秒绿光以 bottom-up 方式钻孔的结果。(a)入口;(b)出口  
Fig. 7 Bottom-up drilling using femtosecond green laser. (a) Entrance; (b) exit

top-down 加工的时间。皮秒红外激光所产生的斜坡约为  $10.5 \mu\text{m}$ ,且只能在出口处(上表面)清楚地观测到,这说明钻孔快完成时加工方式才从 bottom-up 转变为 top-down。而飞秒绿光所产生的斜坡约为  $30 \mu\text{m}$ ,且在进口和出口处皆能清楚地观察到斜坡,这说明斜坡延伸到了较靠近玻璃中间的位置,由此可推断出加工方式转变得更早。由于飞秒绿光的破坏阈值比红外皮秒激光低,因此观察结果的推断与理论结果一致。

将上述实验数据绘制成图 8,可见,两种加工方式的切割效率与脉宽的关系不同。采用 top-down 加工方式在脆性材料上钻孔时,材料移除效率与脉宽的关系如图 9 所示。自纳秒开始,脉宽愈短,材料的移除效率愈低,在  $2 \text{ ns} \sim 50 \text{ ps}$  之间材料的移除效率极低,此即“死亡谷”现象。由于上述脉宽过短,不

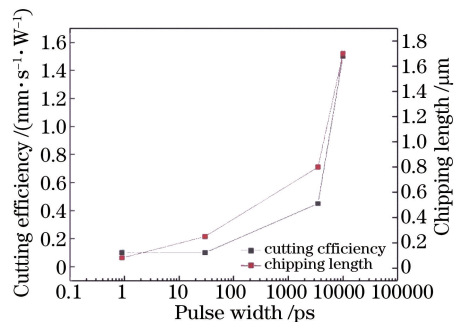


图 8 两种加工方式的切割效率、切屑长度与脉宽的关系  
Fig. 8 Relation between cutting efficiency or chipping length and pulse width for two cutting methods

足以有效熔融材料,但脉宽又不至于短到会产生超短脉冲激光的多光子吸收及其他非线性光学现象,因此材料的移除效率非常低。极低的移除效率意味着会产生非常高的废热,从而使得热效应非常显著。

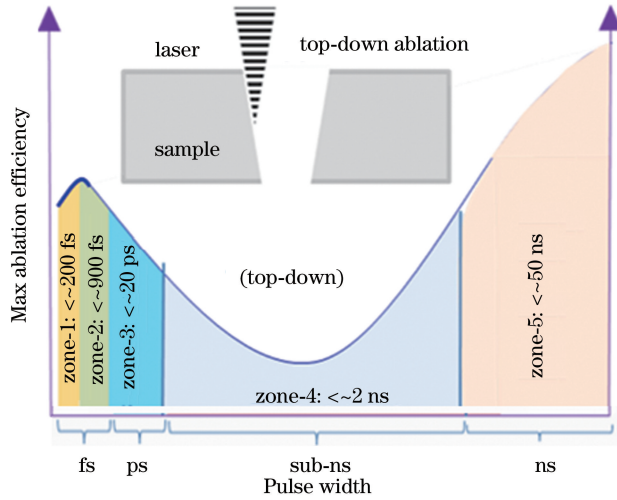


图 9 采用 top-down 加工方式在脆性材料上钻孔时,材料移除效率与脉宽的关系

Fig. 9 Relationship between ablation efficiency and pulse width when drilling in brittle materials using top-down method

随着脉宽继续变短,超快激光的特性愈加显著,材料移除效率开始增大,直到脉宽达到 200 fs 左右时,移除效率又开始慢慢下降。数十纳秒以上的脉宽会因过多的热累积而导致材料开裂,无法钻孔。

采用 bottom-up 方式加工时,没有出现“死亡谷”现象。图 10 为在皮秒及纳秒激光以 bottom-up

方式加工过程中,样品底部的碎渣。由图 10 可以看出:采用皮秒激光加工时,碎渣不但小而且少,表明玻璃大部分被气化了;采用纳秒激光加工时,产生的碎渣量多且碎渣较大,表明更多的玻璃被破坏后便落下,大部分能量被用于破坏材料上,而不是气化材料,因此切割效率高。

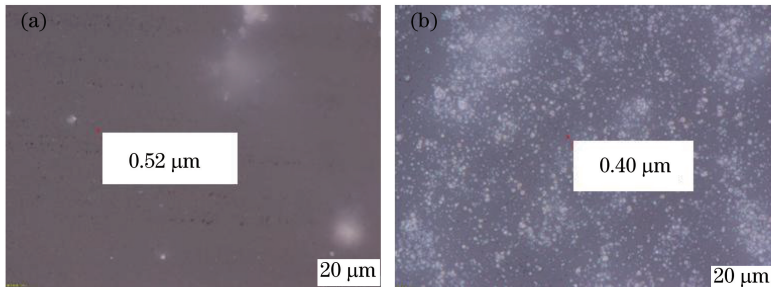


图 10 采用皮秒和纳秒激光以 bottom-up 方式加工玻璃时产生的碎渣。(a)皮秒激光;(b)纳秒激光

Fig. 10 Chippings generated when glass is processed by picosecond and nanosecond laser with bottom-up method.

(a) Picosecond laser; (b) nanosecond laser

## 4 结 论

本文研究了透明材料采用 bottom-up 方式钻孔时的特性,并基于不同脉宽激光加工时的数据,进一步研究该加工方式在应用上的特别之处和优劣势:纳秒激光适合采用 bottom-up 加工方式,且纳秒激光相较于超快激光更容易实现零锥度的钻孔。采用 bottom-up 方式加工透明材料时,脉宽区间不存在“死亡谷”。脉宽为 2 ns~50 ps 的激光的切割效率高于超快激光,且玻璃的崩边尺寸小于 50 μm。

致谢 本文得到了深圳市海外高层次人才团队项目及广东省创新创业团队项目支持。

## 参 考 文 献

- [1] Du K M. Ready to work: solid state slab laser[J]. Laser Technik Journal, 2010, 7(1): 39-43.
- [2] Du K M, Shi P. Subsurface precision machining of glass substrates by innovative lasers [J]. Glass Science and Technology, 2003, 76(2): 95-98.
- [3] Karimelahi S, Abolghasemi L, Herman P R. Rapid micromachining of high aspect ratio holes in fused silica glass by high repetition rate picosecond laser [J]. Applied Physics A, 2014, 114(1): 91-111.
- [4] Lott G, Falletto N, Devilder P J, et al. Optimizing the processing of sapphire with ultrashort laser pulses [J]. Journal of Laser Applications, 2016, 28(2): 022206.