

# 532 nm 皮秒激光加工石英玻璃的研究

胡 炎 季凌飞 李 健 鲍 勇 闫胤洲 蒋毅坚

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

**摘要** 采用皮秒激光对石英玻璃进行打孔实验, 探究了石英玻璃在 532 nm 皮秒激光作用下的损伤阈值, 同时通过控制变量法研究了激光能量密度、脉冲持续时间和激光重复频率等参数对石英玻璃加工孔径与深度的影响, 并对这种规律进行简要的分析。通过实验最终得出皮秒量级下石英玻璃的损伤阈值约为  $2.01 \text{ J/cm}^2$ , 并发现所加工石英玻璃的孔径与深度在一定范围内与激光能量密度和加工时间成正比, 但增速最终趋于平缓; 激光重复频率对小孔加工质量亦有重要影响。最后, 在得到的损伤阈值和加工规律基础上对加工参数进行了初步优化, 获得了无裂纹、表面形貌规整的小孔加工效果。

**关键词** 激光技术; 激光微加工; 损伤阈值; 532 nm 皮秒激光; 石英玻璃

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.s103009

## Investigation on 532 nm Picosecond Laser Processing of Quartz Glass

Hu Yan Ji Lingfei Li Jian Bao Yong Yan Yinzhou Jiang Yijian

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract** In this paper, picosecond laser drilling of quartz glass is studied. The 532 nm picosecond laser induced ablation threshold of quartz glass is explored and the basic parameters of the picosecond laser processing of glass, including the laser power, repetition rate and processing time, are investigated. From the study, the ablation threshold of quartz glass at picosecond pulse width is concluded to be around  $2.01 \text{ J/cm}^2$ . It is found that the diameter and depth of the holes drilled in quartz glass are proportional to the laser fluence and processing time, but the rate of increase levels off finally. Meanwhile the laser repetition rate also has an important influence on the machining quality. Picosecond laser crack-free processing of quartz glass is achieved by optimizing the laser parameters based on the ablation threshold and the processing rules obtained in our research.

**Key words** laser technology; laser micromachining; ablation threshold; 532 nm picosecond laser; quartz glass

**OCIS codes** 140.3390; 140.7090; 350.3390; 160.2750

## 1 引 言

石英玻璃具有硬度高、热膨胀系数低、抗损伤能力强、耐热、耐腐蚀及透光性好、化学性质稳定等优良性能, 因此在国防、化工、医疗、半导体和光电子等行业中都具有广泛的应用<sup>[1]</sup>。然而, 由于石英玻璃的硬脆性, 在加工过程中很容易在应力的作用下破裂, 使用传统的机械加工方式很难高效地对其进行

加工, 特别是石英玻璃的微孔加工。激光加工作为一种新型的“非接触”加工方法, 对于该类具有高硬脆性的难加工材料, 可以避免加工中机械应力的负面效应, 且光束尺寸能聚焦到几十微米的量级, 为高精度工件加工提供了基本条件<sup>[2-4]</sup>。目前, 用于玻璃加工的激光加工方法主要有激光熔融法和控制裂纹法<sup>[5-7]</sup>。由于熔融加工法需要对玻璃整体进行长

**收稿日期**: 2013-07-01; **收到修改稿日期**: 2013-09-30

**基金项目**: 国家自然科学基金(51275011)、新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0007)、北京市自然科学基金重点项目(3111002)、北京市教育委员会科技计划重点项目和北京市人才强教拔尖创新项目(05313999200601)

**作者简介**: 胡 炎(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事非金属材料激光加工技术方面的研究。

E-mail: huyan0508@emails.bjut.edu.cn

**导师简介**: 季凌飞(1971—), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光材料加工技术方面的研究。

E-mail: ncltji@bjut.edu.cn(通信联系人)

时间加热以使玻璃达到适当的温度,因此加工效率很难提高,而且加热装置的大小限制了加工玻璃的尺寸。而裂纹控制法则要求对裂纹进行严格控制且加工尺寸和加工自由度均受到很大限制。另外,这两种方法加工玻璃都会产生较大的热影响区,处理不当会在加工区域周围产生熔凝区和裂纹损伤,影响玻璃加工质量。

由于超短脉冲激光具有单脉冲能量高、作用时间短等优点,可以在材料未被熔化的情况下瞬间将材料爆轰去除,产生冷去除的加工效果,从而避免加工时产生不必要的热效应<sup>[8-9]</sup>。皮秒激光和飞秒激光加工效果相似,对材料的加工基本属于“冷加工”。在微纳米尺度下,具有极高峰值功率的激光脉冲通过库仑爆炸等机制对材料进行破坏,通常情况下,材料基本无热效应,被烧蚀部分观察不到热影响区,边缘光滑<sup>[10-12]</sup>。而且皮秒激光器价格相对便宜,加工效率高,具有较大的工业应用前景。利用皮秒激光进行微加工的另一个显著优点是皮秒激光光斑可以通过光学透镜聚焦到几十微米甚至几微米的量级,适用于微细精密加工<sup>[13-14]</sup>。因此,研究皮秒激光器各参数对石英玻璃加工影响的基本规律显得尤为重要。Raciukaitis 等<sup>[15]</sup>利用紫外皮秒激光对玻璃进行打孔实验研究,分别探究了激光脉冲数对加工深度的影响及材料剥除速率与深度的关系,但研究中并未涉及到玻璃的损伤阈值问题和激光的功率密度、重复频率等对玻璃加工造成的影响。本文针对皮秒激光对石英玻璃加工的优势,通过控制变量法探究了皮秒激光器的激光能量密度、脉冲持续时间和激光重复频率等参数对石英玻璃加工作用的基本规律,得出在 532 nm 波长皮秒激光作用下石英玻璃的损伤阈值。最后,在获得的实验规律基础上,通过优化加工参数实现了石英玻璃的无裂纹高质量表面形貌打孔,达到了“冷加工”的效果。

## 2 实验条件及方法

实验中采用德国 Edgewave 公司生产的 PX 系列皮秒激光器,波长为 532 nm,脉冲持续时间小于等于 20 ps,其输出光束经聚焦后光斑大小为 40~50  $\mu\text{m}$ 。实验中,在研究小孔的加工直径和深度与激光能量密度关系时,将激光器重复频率设置为 100 kHz,固定加工时间不变,其输出功率从 4 W 到 7 W 连续变化;在研究脉冲持续时间对小孔加工的影响时,激光器的重复频率与输出功率分别被设为 100 kHz 和 7 W,加工时间变化区间为 0.1~5 s;在

研究激光器重复频率对加工的影响时,加工时间被设置为 2 s,重复频率被依次设定为 100、200、400、500、800、1000、2000 kHz 等数值。

实验中使用的材料是尺寸为 2 cm  $\times$  2 cm  $\times$  0.3 mm 的石英玻璃片。实验中,样品被固定在  $x$ - $y$  位移平台上,利用聚焦镜将出射激光聚焦在样品表面上进行定点加工,并通过控制变量法,研究不同参数对石英玻璃小孔加工的影响。采用 OLYMPUS-3100 系列激光扫描共聚焦显微镜观察小孔的表面形貌和三维结构,并对其直径和深度进行测量。根据测量图片以及得出的数据,得到小孔的加工质量随激光参数变化的具体规律,并以此推算出石英玻璃在皮秒激光作用下的损伤阈值。最后,在已获得的实验规律基础上,对石英玻璃样品进行优化加工。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 小孔特征与激光能量密度的关系

#### 3.1.1 小孔直径与能量密度关系

实验中,脉冲激光的重复频率被设定为 100 kHz,加工时间固定为 1 s,在不改变激光聚焦光斑尺寸的前提下,通过改变激光器的输出功率,在激光共聚焦显微镜下观察并比较小孔形貌,实验结果如图 1 所示。

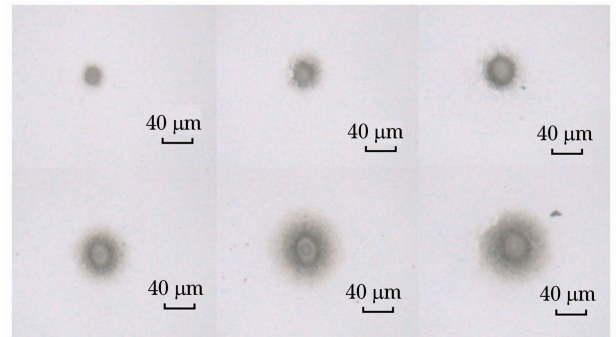


图 1 不同激光能量密度下小孔表面形貌图

Fig. 1 Surface topographies of holes drilled by different fluences

从图 1 可以发现,随着激光能量密度的不断增加,小孔直径也不断增大,显现出一种由小到大的可控趋势,同时小孔周围的热影响区域也有所扩大。在共聚焦显微镜下测出小孔孔径大小,得出小孔直径与激光能量密度关系如图 2 所示。

结合图 2 观察到,当小孔直径增加到 45  $\mu\text{m}$  以上时,增加趋势变缓。产生这种现象的主要原因是激光束为高斯光束,中心能量密度最高,因此当激光功率较小时,只有高斯光束中心光斑的能量密度达

到石英玻璃的损伤阈值,能对玻璃进行刻蚀加工,因此小孔孔径较小。然而,随着激光功率的增加,更大区域内的激光能量密度也达到玻璃损伤阈值,所以小孔孔径随之增大。但所加工的孔径受到聚焦后的激光光斑尺寸限制,所以达到一定值后增速变缓。此外,当激光功率过高时需注意小孔周围的热影响区以及微裂纹的产生,故需对激光功率适当地控制。

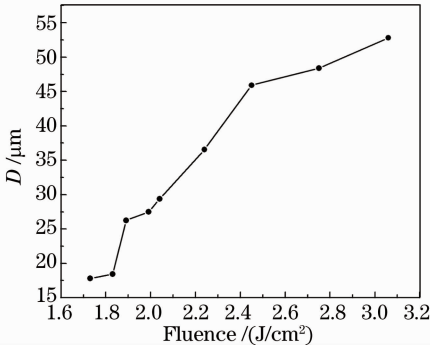


图 2 小孔直径与激光能量密度关系

Fig. 2 Relationship of the ablated diameter and fluence

### 3.1.2 小孔深度与能量密度关系

在将激光脉冲重复频率设定为 100 kHz,并控制加工时间不变的前提下,通过改变激光输出功率对石英玻璃进行打孔实验。通过共聚焦显微镜分别测量各个小孔深度,可以作出小孔深度随激光功率对数变化的关系曲线图,如图 3 所示。

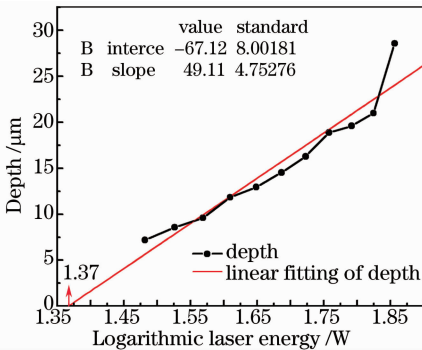


图 3 小孔深度与激光功率对数关系图

Fig. 3 Relationship of the depth and the logarithmic laser energy

从图 3 中可以得出,在一定功率范围内小孔深度与激光功率的对数近似符合线性关系,且小孔深度随能量密度的增加而不断增加。但当玻璃被剥除一定深度后,激光焦点不再聚焦在被加工玻璃表面,产生正离焦的效果<sup>[16]</sup>。同时会产生一种深孔效应,即在激光加工过程中,随着小孔深度的不断增加,激光进入小孔后被孔壁不断反射消耗,以及伴随着散射的增强,激光能量无法再集中在一点对玻璃进行

剥除,导致加工无法进一步进行下去。因此,小孔的深度不会随着激光能量密度的增加而一直增大。在实验当中小孔深度增加到 30 μm 左右时增速不断减缓,如果再单纯地增加激光功率,小孔周围将由于热量输入过多而出现微裂纹。

如图 3 所示,对曲线进行线性拟合,可以得到直线斜率为 49.11,其与横轴交点处横坐标为  $x_0 = 1.37$ 。通过(1)和(2)式,可计算出在皮秒量级条件下,直线与横轴交点处对应的激光功率为 3.95 W,由此计算出的石英玻璃的损伤阈值大概为 2.01 J/cm²。

$$p = e^x, \quad (1)$$

$$F_{th} = \frac{p}{f\pi r^2}, \quad (2)$$

式中  $p$  为激光器功率,  $x$  为曲线与横轴交点,  $F_{th}$  为玻璃损伤阈值,  $f$  为激光重复频率,  $r$  为聚焦后光斑半径。

### 3.2 小孔深度与加工时间关系

激光脉冲数也是影响小孔深度的重要因素之一。这里通过控制激光器的开关时间来设定激光脉冲数,观察对比加工效果。在重复频率为 100 kHz 的条件下,将激光功率固定为 7 W 不变,通过改变加工时间  $T$ ,对石英玻璃进行打孔实验。在测得小孔深度具体数值后,可以作出其随加工时间变化的关系曲线图,如图 4 所示。

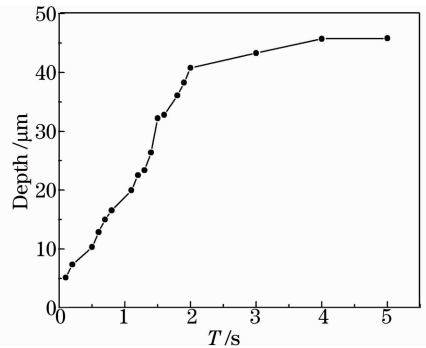


图 4 小孔深度随加工时间变化规律

Fig. 4 Relationship between the depth and machining time

从图 4 中可以看出在小孔深度达到 40 μm 以前,小孔深度与脉冲数基本呈正比关系。小孔深度在一定范围内,随着加工时间的累积即脉冲数的不断增加而增加,但当增加到一定数值后,增长速度开始减慢并最终趋于固定值不再增加。这说明在研究小孔深度与脉冲数的关系时,光斑离焦和深孔效应依然会对孔深有很大影响。

### 3.3 小孔特征与激光重复频率关系

激光重复频率也是影响激光加工质量的一个重

要因素。在本研究中,脉冲激光重复频率分别被设置为 100、200、400、500、800、1000、2000 kHz 等数值,通过选择合适的激光功率,并把加工时间设定为 2 s,观察玻璃表面加工形貌。由于激光器在不同重复频率下的输出功率的限制,发现只有在 100、200、

1000 kHz 三种频率条件下才能在玻璃表面加工出一定深度的小孔。因此,在上述三种重复频率条件下,将激光功率分别设定为 6.6、11.8、50 W 来进行打孔实验,具体加工结果如图 5 所示。

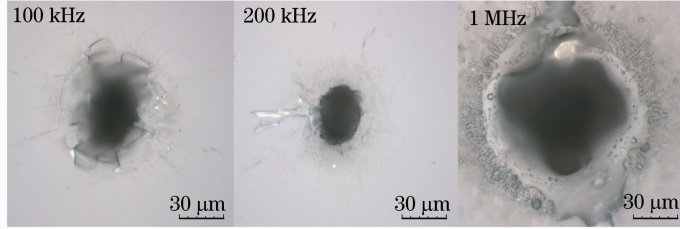


图 5 不同重复频率下小孔表面形貌图

Fig. 5 Topographies of holes drilled by different repetition frequencies

从图 5 可以看到,在脉冲重复频率为 200 kHz 时,由于单脉冲能量过高,小孔周围出现部分飞溅物,但小孔的表面形貌相对另外两种重复频率下更光洁,孔直径也更小。当脉冲重复频率为 100 kHz 时小孔周围出现微裂纹,边缘质量也较差;而当重复

频率为 1 MHz 时,孔周围显现出严重的熔融区,过多的热效应也使得加工尺寸变得不可控。通过共聚焦显微镜观测三个小孔的截面形状并测得它们的最大深度分别为 21.06、50.02、21.45  $\mu\text{m}$ ,如图 6 所示。

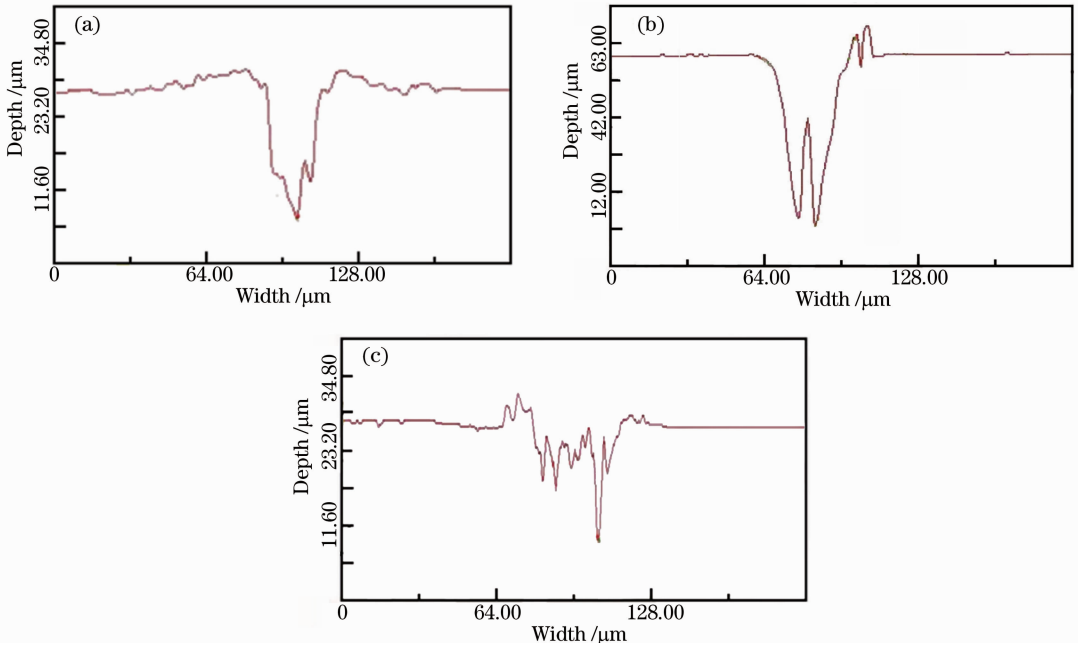


图 6 不同重复频率下小孔截面深度。(a) 100 kHz; (b) 200 kHz; (c) 1 MHz

Fig. 6 Depth of holes drilled by different repetition frequencies. (a) 100 kHz; (b) 200 kHz; (c) 1 MHz

下面对上述加工效果的成因进行一定的分析。在激光单脉冲能量基本一致的情况下,相对于重复频率为 200 kHz 而言,100 kHz 的激光脉冲能量积累不够,相同时间内的脉冲数不足以将损伤区域的石英材料完全迅速去除,因此导致形貌与小孔深度都有不及 200 kHz 时的情况。而 1 MHz 的激光脉冲由于重复频率过高,类似于连续激光加工的效果:激光功率高达 50 W,在加工过程中能量过于积累,

无法快速扩散开来,过多的能量转化为热影响在孔径周围产生了熔融物与重凝区,导致加工质量下降,也阻碍了加工的进一步进行。因此,在保持单脉冲能量不变的情况下,采用重复频率为 200 kHz 的激光脉冲能获得更好的加工结果。

### 3.4 优化参数下无损打孔实验

从上面的实验结果发现,通过控制激光的能量密度可以得出不同功率下的小孔刻蚀形貌与深度;通过



测量进而推出小孔的损伤阈值,同时得到不同加工时间和不同激光重复频率下小孔加工的变化规律。

通过对比发现在重复频率为 200 kHz,能量密度为  $2.7 \text{ J/cm}^2$  的条件下,能够按要求加工出比较

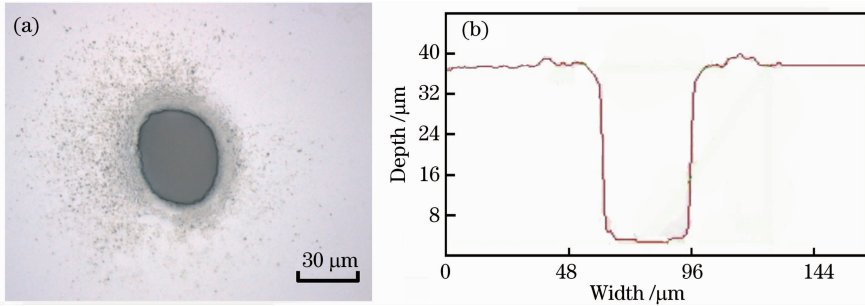


图 7 优化参数下小孔加工形貌图。(a) 表面形貌图; (b) 截面与深度图

Fig. 7 Topographies of the hole drilled by optimization parameters. (a) Surface topography; (b) section and depth topography

从图 7(a)中观察发现小孔表面整洁,无裂纹产生,也没有纳秒激光加工中的重凝层与熔融物产生,达到了皮秒冷加工的效果。小孔周围散落的由于加工过程产生的碎屑可以采用压缩气体吹除或超声清洗的办法去除。从图 7(b)中可观察到加工出的孔径为圆柱型结构,相比图 5 和图 6 中优化前的小孔孔径有了较大的提高,内径形状规则均匀,孔径深度为  $35 \mu\text{m}$  左右,小孔直径约为  $40 \mu\text{m}$ 。由于激光器产生的是线偏光,导致图 7(a)中小孔表面形貌圆度不够,在后续实验中可进一步优化处理。

## 4 结 论

采用脉宽为皮秒量级的 532 nm 激光器,就激光器参数对石英玻璃小孔加工质量产生影响的规律进行了探索研究。通过实验,得到石英玻璃的损伤阈值为  $2.01 \text{ J/cm}^2$ 。并且发现小孔的直径受激光能量密度的影响,在一定范围内随能量密度的增加而增加,同时受激光光斑大小的限制。还发现皮秒激光加工小孔深度受激光能量密度和脉冲数影响较大,一定范围内小孔深度与激光能量密度和脉冲数呈正比关系,随激光能量密度的增加而增加。但由于离焦效应和深孔效应的限制,小孔深度并不会一直增加下去,因此选择合适的能量密度是提高加工速度与精度的关键。激光重复频率也是影响小孔加工质量的一个重要因素,相比之下当激光重复频率为 200 kHz 时有助于得到更好的加工效果。根据研究得到的石英玻璃损伤阈值以及激光参数影响小孔加工质量的规律,以重复频率为 200 kHz 的脉冲激光作为加工光源,并把其输出能量密度控制在

理想的小孔,孔径仅约  $40 \mu\text{m}$ ,加工效果如图 7 所示。图 7(a)为小孔表面加工形貌,图 7(b)为小孔的截面与深度图。

$2.7 \text{ J/cm}^2$  左右,进行打孔实验,最终加工得到直径约  $40 \mu\text{m}$  的精细小孔。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Yufen, Liu Liancheng. Quartz Glass [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.  
王玉芬,刘连城. 石英玻璃[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- 2 Zhang Yongkang. Laser Processing Technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. 12-289.  
张永康. 激光加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 12-289.
- 3 Ji Lingfei, Yan Yinzhou, Bao Yong, *et al.*. Research and consideration on laser cutting technique of ceramics[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(11): 1686-1692.  
季凌飞, 闫胤洲, 鲍 勇, 等. 陶瓷激光切割技术的研究现状与思考[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1686-1692.
- 4 Born M, Wolf E. Principles of Optics [M]. Yang Jiasun, Transl. Beijing: Science Press, 1978. 179-266.  
玻 恩, 沃尔夫. 光学原理(上)[M]. 杨葭荪, 译. 北京: 科学出版社, 1978. 179-266.
- 5 Yan Yinzhou, Ji Lingfei, Bao Yong, *et al.*. Theory analysis and experiment verification on crack characters during laser processing ceramics[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(9): 1401-1408.  
闫胤洲, 季凌飞, 鲍 勇, 等. 激光加工陶瓷裂纹行为的理论分析及实验验证[J]. 中国激光, 2008, 35(9): 1401-1408.
- 6 Yuan Mingquan, Ling Hongzhi, Peng Bo. Precision laser cutting technique for thin quartz glass plates [J]. Laser Technology, 2006, 30(4): 406-408.  
袁明权, 凌宏芝, 彭 勃. 石英玻璃薄板激光精密切割技术[J]. 激光技术, 2006, 30(4): 406-408.
- 7 Jiao Junke, Wang Xinbing, Li Youping. Research progress on glass cutting by laser[J]. Glass, 2007, 34(4): 8-12.  
焦俊科, 王新兵, 李又平. 激光切割玻璃的研究进展[J]. 玻璃, 2007, 34(4): 8-12.
- 8 Bernhard Klimt. Micromachining with industrial picosecond lasers[J]. Laser Technik Journal, 2007, 4(1): 40-43.
- 9 Zhou Guangfu, Hu Huadong, Niu Xiaodong, *et al.*. Investigation on etching parameter of fused silica based on femtosecond laser[J]. Applied Laser, 2012, 32(1): 45-48.  
周广福, 胡华东, 牛晓东, 等. 基于飞秒激光的石英刻蚀参数探讨[J]. 应用激光, 2012, 32(1): 45-48.
- 10 D Ashkenasi, A Lemke. Exploiting internal material reactions in

- glass using ultra short laser pulses[J]. *The Laser User*, 2009, 55: 26–28.
- 11 D Breitling, A Ruf, F Dausinger. Fundamental aspects in machining of metals with short and ultra-short laser pulses[C]. SPIE, 2004, 5339: 49–36.
- 12 Li Donghai. Short-Pulse Laser Action on the Material and Research of the Destructive Mechanism[D]. Sichuan: Chinese Academy of Engineering Physics, 2010.  
李东海. 短脉冲激光对材料的作用及破坏机理研究[D]. 四川: 中国工程物理研究院, 2010.
- 13 Duan Jinpeng. Research on Pico-Second Laser and Micro-Drilling Technology [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012.  
段金鹏. 皮秒激光加工系统与精细钻孔工艺的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2012.
- 14 Mingying Sun, Urs Eppelt, Simone Russ, *et al.*. Laser ablation mechanism of transparent dielectrics with picosecond laser pulses [C]. SPIE, 2012, 8530: 853007.
- 15 Gediminas Raciukaitis, Marijus Brikas. Micro-machining of silicon and glass with picosecond lasers[C]. SPIE, 2004, 5662: 717–721.
- 16 Tadatake Sato, Ryozo Kurosaki, Aiko Narazaki, *et al.*. Flexible fabrication of deep microstructures by laser-induced backside wet etching[C]. SPIE, 2010, 7584: 758408.

栏目编辑:李志兰