

355 nm 纳秒和 1064 nm 皮秒激光加工蓝宝石研究

边晓微 陈 檬 李 港

北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

摘要 利用波长 355 nm 的纳秒激光和 1064 nm 的皮秒激光对蓝宝石基片进行刻槽及切割实验,通过控制变量法研究了微槽深度、宽度及质量随工艺参数变化的情况,并进行对比分析。结果表明,355 nm 纳秒激光加工过程存在很大的热作用,而且刻蚀效率低,即使其峰值功率密度达到 10^9 W/cm² 也不能实现对蓝宝石毛坯片的图形切割;而 1064 nm 皮秒红外激光切割微槽的质量很高,几乎可实现完全的“冷加工”。最后,通过分析总结,认为激光峰值功率密度达到 10^{12} W/cm² 可实现对蓝宝石基片的图形切割,且利用平均功率 1 W、单脉冲能量 1 mJ、脉宽 15 ps 的 1064 nm 红外激光,实现了 0.55 mm 厚蓝宝石毛坯基片的高质量图形切割。

关键词 激光技术; 图形切割; 微槽加工; 蓝宝石基片; 纳秒紫外激光; 皮秒红外激光

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.051404

Study on Machining of Sapphire by 355 nm Nanosecond and 1064 nm Picosecond Laser

Bian Xiaowei Chen Meng Li Gang

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

Abstract The experimental research regarding grooving and cutting the sapphire substrate by nanosecond laser with wavelength of 355 nm and picosecond laser with wavelength of 1064 nm is presented. The influence of adjusted processing parameters on the depth, width and quality of grooves via controlling the variable method is studied. Furthermore, the comparative analysis shows that the thermal effect of 355 nm nanosecond laser processing is very big, and the etching efficiency is low, which cannot achieve graphs cutting of sapphire substrate even if its peak power density reaches 10^9 W/cm². However, 1064 nm picosecond infrared laser cutting quality of micro groove is very high, which can realize completely “cold” processing. Eventually, the results show that the graphs cutting on sapphire substrate can be realized with the laser peak power density of 10^{12} W/cm². The high-quality graphs cutting on the blank of sapphire substrate with 0.55 mm thickness is realized by 1064 nm infrared laser with average power 1 W, single pulse energy 1 mJ, and pulse width 15 ps.

Key words laser technique; graphs cutting; microgrooves machining; sapphire substrate; nanosecond ultraviolet laser; picosecond infrared laser

OCIS codes 140.3610; 140.3390; 160.1245; 320.7160

1 引言

蓝宝石晶体是一种集优良的光学、物理、化学和机械性能于一体的多功能氧化物,被广泛应用于工业、国防和科研等领域^[1],常用于制作光学元件、窗口材料和微机械设备等^[2-3],特别是在手机产品上的应用而再次备受关注。大多数应用要求蓝宝石必须有很高的加工质量,但由于蓝宝石的脆性大,传统的机械加工易产生

收稿日期: 2015-11-23; **收到修改稿日期:** 2015-12-23; **网络出版日期:** 2016-03-29

基金项目: 国家自然科学基金(61144007)、市教委项目(KZ201510005001)

作者简介: 边晓微(1989—),女,硕士研究生,主要从事材料激光加工方面的研究。E-mail: bianxiaowei0220@163.com

导师简介: 陈 檬(1963—),女,博士,副研究员,主要从事固体激光技术及其应用方面的研究。

E-mail: chenmeng@bjut.edu.cn(通信联系人)

崩边、裂纹及刀具磨损等问题,且由于其优越的化学稳定性,传统的化学刻蚀很难达到加工要求^[4-5],然而激光加工技术具有非接触、操作简单、灵活性高等特性,可以实现任意形状、快速高效的加工。

激光与材料间的相互作用可分为光热作用和光化学作用,即“热加工”和“冷加工”。激光热加工是指利用激光的热作用使材料熔化蒸发达到去除的目的,“热加工”效应易引起熔凝残渣、应变裂纹等热影响,其限制了工件的加工质量和效率^[6],因此在蓝宝石加工中不予以采用。激光冷加工是指物质分子同时或接连吸收多个光子使材料中的化学键被打断或者晶格结构被破坏,从而达到去除的目的^[7-8],此方法更适用于对蓝宝石高质量低损耗的加工。激光冷加工一般采用短脉冲和短波长激光。研究表明,虽然 355 nm 紫外激光对蓝宝石是高透的,但由于其波长短、单光子能量高,且当激光峰值功率密度达到一定数值($\geq 10^6$ W/cm²)时,可通过多光子吸收打断材料化学键^[9-10],实现对材料的去除。有文献报道利用 355 nm 纳秒激光对蓝宝石材料进行浅层去除,可达到抛光的效果^[11-14],但对于深度(>0.1 mm)的切割,未见报道。而对于超短脉冲的皮秒激光,其峰值功率密度高、脉宽窄,可通过多光子电离^[15-17]实现对蓝宝石材料的高精度“冷加工”^[18]。因此认为利用 355 nm 的纳秒激光和 1064 nm 的皮秒激光对蓝宝石基片进行加工是可行的,本文研究了两种激光对蓝宝石基片的深度切割情况及可行性分析,期望可以为激光切割蓝宝石在工业中的应用提供理论依据。

2 实验材料及方法

实验样品为 0.55 mm 厚蓝宝石毛坯片,表面粗糙度为 1.16 μm ,且在加工前后都对其进行了超声清洗,清洗液为酒精及丙酮。所有实验均在室温条件下的空气中进行,激光微加工系统如图 1 所示。

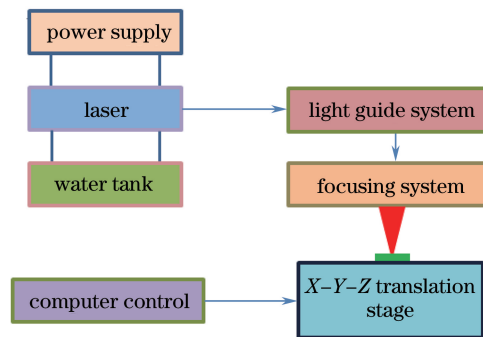


图 1 激光微加工系统

Fig. 1 Laser micro-machining system

实验所用激光器有波长为 355 nm 的纳秒激光器和波长为 1064 nm 的皮秒激光器,激光器技术参数如表 1 所示。其中皮秒激光器为自主研发的全固态皮秒激光器,采用半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模技术和再生放大技术相结合产生大能量皮秒激光输出^[19-20]。

表 1 激光器技术参数

Table 1 Technical parameters of laser

Technical parameters	Value	
Wavelength /nm	355	1064
Average power /W	5	1
Repeat frequency /kHz	30	1
Pulse duration	40 ns	15 ps
Focal spot diameter / μm	15	60

通过改变激光功率、扫描速度和扫描次数进行刻槽对比,利用激光扫描共聚焦显微镜(Olympus LEXT OLS3000)和扫描电子显微镜(SEM Hitachi TM-1000)检测微槽形貌及深度和宽度的变化,分析两种激光作用下的不同情况。随后,进一步优化参数,进行图形切割,并通过扫描电子显微镜观测切割形貌及质量。此外,在紫外激光加工蓝宝石基片实验中,由于热作用影响严重,因此在切割过程中增加了吹气系统进行冷却。

3 结果与讨论

3.1 刻槽实验对比

3.1.1 纳秒紫外激光刻槽实验

图 2 为 355 nm 纳秒紫外激光切割微槽的表面形貌,由图可以看出,微槽内部有大量的熔融物堆积,边缘烧蚀严重,且在蓝宝石表面有明显的喷溅物,改变激光功率[图(a)和(b)]、扫描速度[图(b)和(c)]及扫描次数[图(b)和(d)]对微槽的切割质量并没有改善,但微槽的宽度却明显增加,说明加工蓝宝石的过程存在很大的热效应。

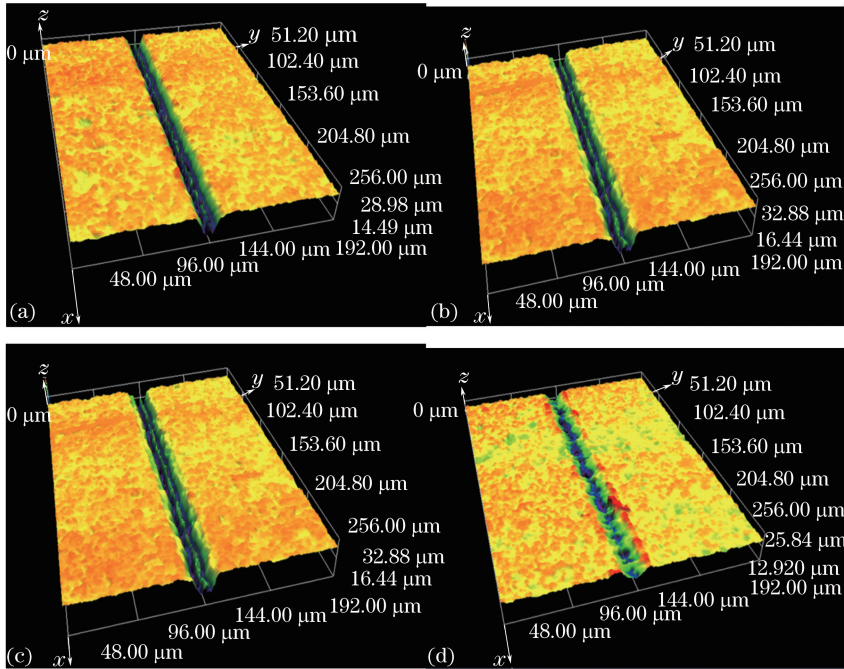


图 2 355 nm 纳秒激光加工微槽的共聚焦图像。(a) 1 W, 0.5 mm/s, 5 次; (b) 5 W, 0.5 mm/s, 5 次;
(c) 5 W, 1 mm/s, 5 次; (d) 5 W, 0.5 mm/s, 1 次

Fig. 2 Confocal images of microgroove after nanosecond laser cutting at 355 nm.

(a) 1 W, 0.5 mm/s, five times; (b) 5 W, 0.5 mm/s, five times;
(c) 5 W, 1 mm/s, five times; (d) 5 W, 0.5 mm/s, one time

考虑到微槽底部沉积的熔融物会影响激光共聚焦显微镜对槽深的检测,因此利用扫描电子显微镜对微槽断面进行测量,如图 3 所示,工艺参数的改变对微槽的刻蚀深度影响非常小,刻蚀深度的最大差值仅约为 20 μm ,而且由图 3 中的(b)和(c)可以看到,槽底部出现明显的裂纹,这是因为槽底部堆积了大量的熔融物,加工碎屑无法排出,激光能量聚集产生大量的热,导致蓝宝石基片炸裂,再一次证明了即使是紫外波段的激光,其加工蓝宝石的过程仍存在很大的热作用,因此分析认为 355 nm 纳秒紫外激光加工蓝宝石过程主要为光热作用过程,而热作用是限制其切割蓝宝石质量和深度的主要原因。

3.1.2 皮秒红外激光刻槽实验

图 4 为皮秒激光切割微槽的形貌,各图右上角数据为微槽的深度和宽度值,如图所示,槽底部比较光滑,几乎没有熔融残渣,边缘无裂纹及喷溅物,且改变激光功率[图(a)和(b)]、扫描速度[图(b)和(c)]和扫描次数[图(b)和(d)]可以增加微槽的刻蚀深度,但对微槽宽度无影响,因此证明皮秒激光加工过程几乎没有热效应,可以实现完全的“冷加工”,而所用 1064 nm 皮秒激光的峰值功率密度为 10^{12} W/cm^2 ,激光损伤以多光子电离过程为主,因此可以认为即使是红外波段的皮秒激光,其加工蓝宝石的过程只有光化学作用,可以实现对蓝宝石的高质量加工。

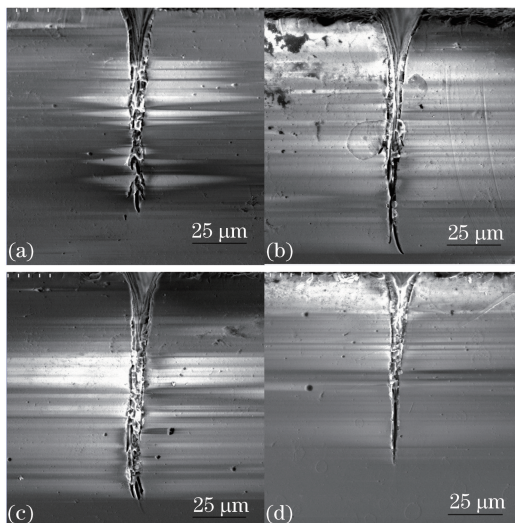


图3 355 nm 纳秒激光加工微槽的 SEM 图像。(a) 1 W,0.5 mm/s,5 次;(b) 5 W,0.5 mm/s,5 次;
(c) 5 W,1 mm/s,5 次;(d) 5 W,0.5 mm/s,1 次

Fig. 3 SEM images of microgroove section after nanosecond laser cutting at 355 nm.

- (a) 1 W, 0.5 mm/s, five times; (b) 5 W, 0.5 mm/s, five times;
(c) 5 W, 1 mm/s, five times; (d) 5 W, 0.5 mm/s, one time

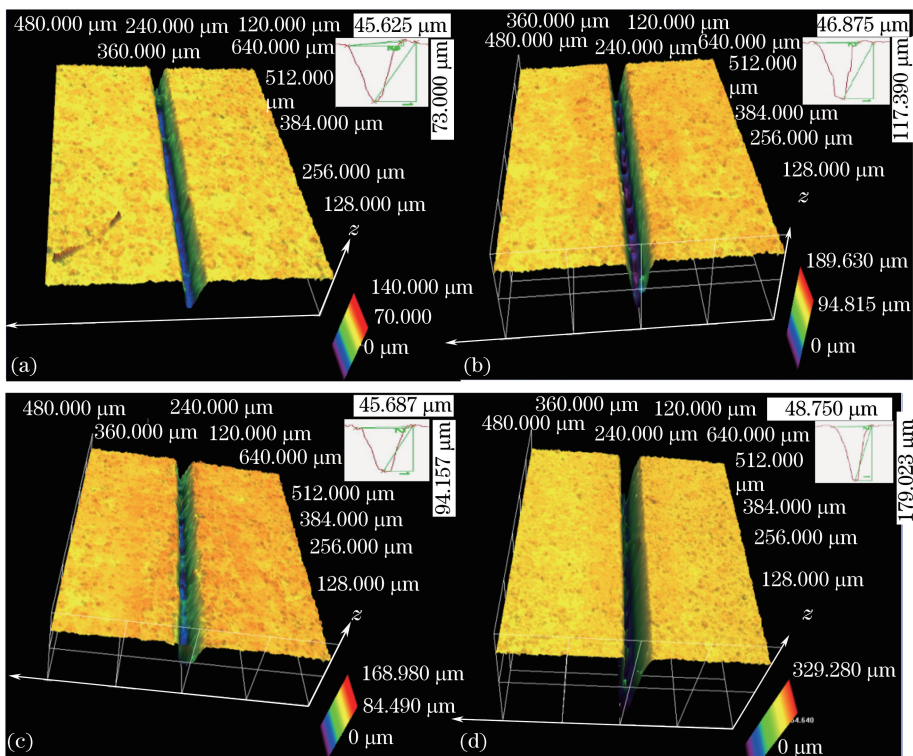


图4 1064 nm 皮秒激光加工微槽的共聚焦图像。(a) 0.5 W,0.5 mm/s,5 次;(b) 1 W,0.5 mm/s,5 次;
(c) 1 W,1 mm/s,5 次;(d) 1 W,0.5 mm/s,10 次

Fig. 4 Confocal images of microgroove after picosecond laser cutting at 1064 nm.

- (a) 0.5 W, 0.5 mm/s, five times; (b) 1 W, 0.5 mm/s, five times;
(c) 1 W, 1 mm/s, five times; (d) 1 W, 0.5 mm/s, ten times

3.2 切割实验对比

3.2.1 纳秒紫外激光切割实验

图5为355 nm 纳秒激光切割蓝宝石的形貌图,圆形半径为100 μm,加工过程装有吹气系统进行冷却,

但仍存在很大的热效应,且无论改变激光功率、加工速度和加工次数以及焦点位置等工艺参数,都没有达到将蓝宝石切透的目的,其切割的最大深度为 $131.320\ \mu\text{m}$,说明即使是峰值功率密度为 $10^9\ \text{W}/\text{cm}^2$ 的 $355\ \text{nm}$ 纳秒紫外激光也不能实现对蓝宝石的图形切割。工艺参数为激光平均功率 $5\ \text{W}$ 、扫描速度 $0.5\ \text{mm}/\text{s}$ 、焦点即 Z 轴移动步长为 $0.005\ \text{mm}$ 。

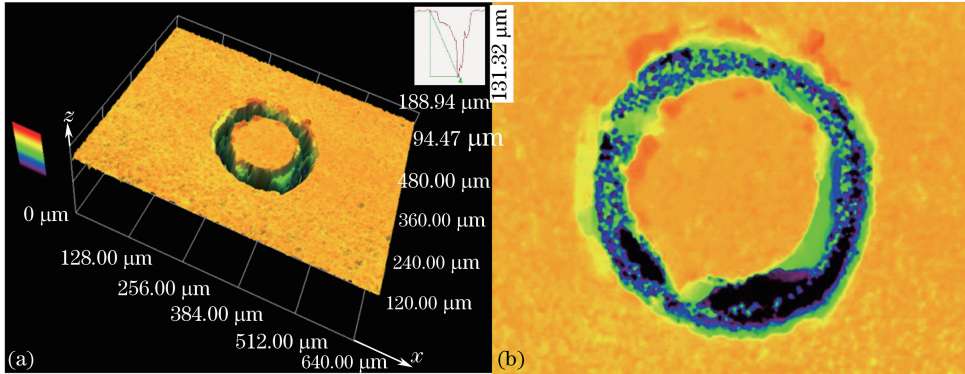


图5 微孔形貌的共聚焦图。(a) 三维图像; (b) 二维图像

Fig. 5 Confocal image of microporous morphology. (a) Three-dimensional image; (b) two-dimensional image

3.2.2 皮秒红外激光切割实验

图6为 $1064\ \text{nm}$ 皮秒激光切割蓝宝石图,图6(a)为半径为 $100\ \mu\text{m}$ 的微孔图,由图可知,微孔边缘很干净,热效应非常小,图6(b)为半径为 $2\ \text{mm}$ 的切割圆片边缘局部放大图,图中左侧上下图片分别为圆片的(c)侧壁局部放大图和(d)全貌图,可以看到,圆形边缘非常光滑,没有崩边及裂纹现象,且上下边缘也很整齐,内壁几乎没有熔融物质,因此证明皮秒红外激光可以实现对蓝宝石基片的高质量切割,其最佳工艺参数为激光平均功率为 $1\ \text{W}$ 、扫描速度为 $0.5\ \text{mm}/\text{s}$ 、焦点即 Z 轴移动步长为 $0.005\ \text{mm}$ 、扫描次数 50 次。

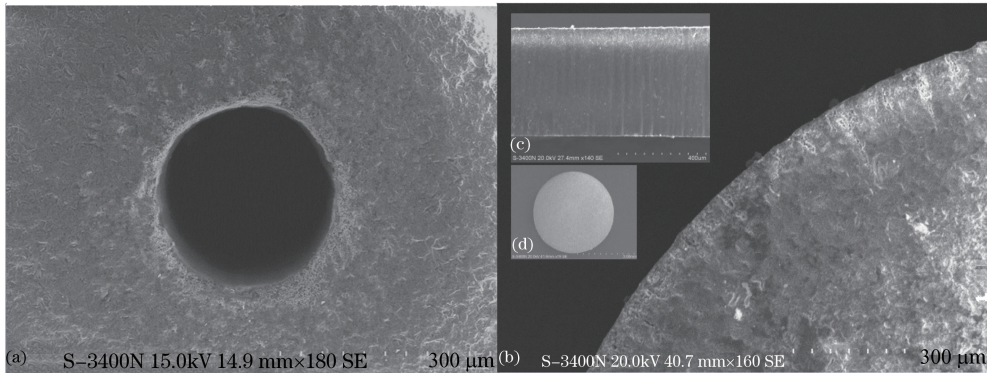


图6 SEM图片。(a) 半径 $100\ \mu\text{m}$ 的微孔; (b) 半径 $2\ \text{mm}$ 的圆片边缘局部放大图;
(c) 圆片侧壁局部放大图; (d) 圆片全貌图

Fig. 6 SEM images. (a) Microporous $R=100\ \mu\text{m}$; (b) locally enlarged circular edge of the wafer $R=2\ \text{mm}$;
(c) side wall partial enlarged image of the wafer; (d) panorama of the wafer

4 结 论

通过以上实验的分析比较,认为激光峰值功率密度达到 $10^{12}\ \text{W}/\text{cm}^2$ 可实现对蓝宝石的图形切割,而对于纳秒激光很难实现这个量级的峰值功率,此外,即使采用 $355\ \text{nm}$ 纳秒紫外激光其加工蓝宝石的过程仍有明显的热效应,不可实现对蓝宝石的图形切割;而皮秒激光由于峰值功率高,红外波段即可实现对蓝宝石的切割,减少了倍频和频转换到紫外波段的能量损耗,且小于 $15\ \text{ps}$ 激光加工蓝宝石基本属于“冷加工”,其切割质量高,没有崩边和微裂纹,因此在加工蓝宝石上存在一定的优势。

参 考 文 献

- 1 Zhang Kecong, Zhang Lehui. Crystal growth of science and technology[M]. Beijing: Science Press, 2003: 370.
张克从, 张乐惠. 晶体生长科学与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 370.
- 2 Yong Seok Choi, Seong Jin Kim. Sapphire substrate-transferred nitride-based light-emitting diode fabricated by sapphire wet etching technique[J]. Solid-State Electronics, 2006, 50(9): 1522-1528.
- 3 Liu Yang, Xu Wendong, Zhao Chengqiang, *et al.*. A detecting system of sapphire internal defects based on laser light scattering tomography[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0902007.
刘 洋, 徐文东, 赵成强, 等. 基于激光光散射层貌术的蓝宝石内部缺陷检测系统[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0902007.
- 4 Y P Hsu, S J Chang, Y K Su, *et al.*. ICP etching of sapphire substrates[J]. Optical Materials, 2005, 27: 1171-1174.
- 5 Xie Xiaozhu, Che Ronghong, Wei Xin, *et al.*. Study on the technological rule of laser-induced backside wet etching sapphire substrates[J]. Applied Laser Technology, 2015, 35(2): 236-241.
谢小柱, 车荣泓, 魏 昕, 等. 红外脉冲激光诱导背面湿式刻蚀加工蓝宝石的工艺规律研究[J]. 应用激光, 2015, 35(2): 236-241.
- 6 Ji Lingfei, Ling Chen, Li Qiurui, *et al.*. Research progress and development of industrial application of picosecond laser processing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(5): 115-126.
季凌飞, 凌 晨, 李秋瑞, 等. 皮秒激光工程应用研究现状与发展分析[J]. 机械工程学报, 2014, 50(5): 115-126.
- 7 Zhao Fanghai, Wang Qingya, Ren Linfu. Ablation of diamond thin film by excimer laser [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Jilinensis, 1994, (2): 79-80.
赵方海, 王庆亚, 任林福. 准分子激光剥离金刚石薄膜[J]. 吉林大学自然科学学报, 1994(2): 79-80.
- 8 Jiang Chao, Wang Youqing, Hu Shaoliu. Development and expectation of laser polishing technology [J]. Laser Technology, 2002, 26(6): 421-424.
江 超, 王又青, 胡少六. 激光抛光技术的发展与展望[J]. 激光技术, 2002, 26(6): 421-424.
- 9 Xiang Shibiao, Xiang Xu, Feng Changgen. Analysis on action characteristic of laser upon energetic materials[J]. Laser & Infrared, 2002, 32(4): 233-236.
项仕标, 项 项, 冯长根. 激光对含能材料作用特性分析[J]. 激光与红外, 2002, 32(4): 233-236.
- 10 Hua Xiangang, Wei Xin, Zhou Min, *et al.*. Experimental study on mechanism of 355 nm ultraviolet laser polishing of Al₂O₃ ceramics[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1203002.
华显刚, 魏 昕, 周 敏, 等. 355 nm 紫外激光抛光 Al₂O₃ 陶瓷作用机理的实验研究[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1203002.
- 11 Horisawa H, Emura H, Yasunaga N. Surface machining characteristics of sapphire with fifth harmonic YAG laser pulses [J]. Vacuum, 2004, 73(s 3-4): 661-664.
- 12 Stoian R, Rosenfled A, Ashkenasi D, *et al.*. Surface charging and impulsive ion ejection during ultrashort pulsed laser ablation[J]. Physics Review Letters, 2002, 88(9): 097603.
- 13 Tam A, Brand J, Cheng D, *et al.*. Picosecond laser sputtering of sapphire at 266 nm[J]. Applied Physics Letters, 1989, 55(20): 2045-2047.
- 14 Huang Jiafu, Wei Xin, Xie Xiaozhu, *et al.*. Research on influences of condition parameters on laser polishing process[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(12): 20-24.
黄加福, 魏 昕, 谢小柱, 等. 影响激光抛光效果的因素分析[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(12): 20-24.
- 15 Yang Jianjun. Femtosecond laser "cold" micro-machining and its advanced applications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2004, 41(3): 42-52.
杨建军. 飞秒激光超精细"冷"加工技术及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(3): 42-52.
- 16 Cao Wenshen, Zhao Yan, Wu Yan, *et al.*. Super-hydrophobic surface of polytetrafluoroethylene fabricated by picosecond laser and phenomenon of total internal reflection underwater[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0903008.
曹文深, 赵 艳, 吴 燕, 等. 皮秒激光制备超疏水聚四氟乙烯表面及其水下全反射研究[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0903008.
- 17 Liu Shuang, Liu Xin, Tang Wenlong, *et al.*. Study of Ti:Sapphire double waveguide written by femtosecond laser[J].

- Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0203001.
- 刘 爽, 刘 欣, 唐文龙, 等. 飞秒激光在钛蓝宝石晶体中刻写双线型波导的研究[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0203001.
- 18 Chen Sumei, Zhao Peide, Zhang Yong, *et al.*. Nonlinear transmittance based on transient behavior of an ultra-short pulse laser[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0232001.
- 陈素梅, 赵培德, 张 勇, 等. 基于超快激光脉冲瞬态特征的非线性透射率[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0232001.
- 19 Chang Liang, Chen Meng, Li Gang, *et al.*. Thermal characteristic analysis of laser diode side-pumped regenerative amplifier for kHz picosecond laser[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(3): 873-876.
- 常 亮, 陈 檬, 李 港, 等. 激光二极管侧面抽运千赫兹皮秒激光再生放大器的热特性[J]. 中国激光, 2010, 37(3): 873-876.
- 20 Zhang Bingyuan, Li Gang, Chen Meng. Passive mode-locking of a diode-end-pumped Nd: GdVO₄ laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. Optics Letters, 2003, 28(19): 1829-1831.