

文章编号: 1001-3806(2014)05-0632-06

脉冲绿激光划切蓝宝石基片的工艺参量研究

谢小柱¹, 高勋银¹, 陈蔚芳^{2,3}, 魏昕¹, 胡伟¹

(1. 广东工业大学 机电工程学院, 广州 510006; 2. 南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016; 3. 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 南京 210016)

摘要: 为了提高划切蓝宝石的成品率和划切效率, 研究了脉冲绿激光(波长 532nm)的偏振性、脉冲激光能量、激光焦点位置、扫描速率、扫描次数等工艺参量对蓝宝石基片划切质量的影响。结果表明, 脉冲绿激光划切蓝宝石基片时, 扫描方向平行于入射面线偏振方向, 焦点位置为负离焦 50 μm , 可以获得良好的微划槽; 脉冲激光能量增加, 划槽深度和宽度增加; 扫描速率增加, 切槽深度减小, 划槽宽度先增加后减小; 扫描次数增加, 划槽深度和宽度增加。这些结果对合理选择激光划切蓝宝石基片工艺参量以获得较好质量的刻槽有一定帮助。

关键词: 激光技术; 激光划切; 蓝宝石; 532nm 激光; 工艺参量研究

中图分类号: TN249

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.05.012

Study on scribing parameters of sapphire substrate with pulse green laser

XIE Xiaozhu¹, GAO Xunyin¹, CHEN Weifang^{2,3}, WEI Xin¹, HU Wei¹

(1. School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. College of Mechanical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-manufacturing Technology, Nanjing 210016, China)

Abstract: To improve the yield rate and scribing efficiency of sapphire substrate, the effect of polarization direction, laser power, focus position, cutting speed, scanning times on the scribing quality of sapphire substrate with pulse green laser ($\lambda = 532\text{nm}$) was studied. The results show that narrow and deep grooves can be obtained when the polarization direction is parallel to the incidence plane and the laser focus position is negative defocus 50 μm when scribing sapphire substrate with pulse green laser. The groove depth and width increase while the pulse laser power increases. The groove depth decreases and the groove width increases at first and then decreases with the increase of the scanning speed. The groove depth and width increase with the increase of the scanning times. The results are helpful for selection of reasonable laser scribing technical parameters to achieve optimal groove performance.

Key words: laser technique; laser scribing; sapphire; 532nm laser; process parameters study

引言

蓝宝石具有高耐磨性、高硬度、热传导性和电绝缘性优良、化学稳定等优异的物理、化学特点, 是重要的光学元件和半导体衬底材料, 广泛应用于工业、国防和科研等领域^[1]。由于蓝宝石是硬脆材料, 传统的机械加工存在易产生裂纹、碎片、分层、崩边、边

缘破裂和刀具易磨损等缺陷, 又由于蓝宝石化学稳定性较好, 使得传统的化学加工方法对其难以加工。然而激光划切技术是一种高速度、高质量的划切方法, 对蓝宝石晶片进行划切, 不仅具有加工速度快、窄切槽、断面光滑、切口平行度好、表面粗糙度小, 而且可以对任意图形进行划切, 具有自动化程度高、容易实现自动化、非接触加工、高材料适用性等特点。通常用于蓝宝石基片划切的激光器主要有紫外波长和准分子激光器, 但此类激光器成本较高; 超短脉冲激光的光子能量损失大, 目前所能提供的频率也就只有几千赫兹, 故总体上其效率较低; 且在加工区域周围形成无规则的纳米晶体形态和纳米裂纹^[2]和在作用区域表面形成波纹^[3-4]; 由于蓝宝石对 1064nm YAG 基频激光的吸收率较低, 故很难加工

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50805027); 广东省自然科学基金资助项目(S2013010014070); 江苏省精密与微细制造技术重点实验室开放基金资助项目

作者简介: 谢小柱(1975-), 男, 副教授, 博士, 主要从事激光加工、精密加工技术等方面的研究。

E-mail: xiaozhuxie@gdut.edu.cn

收稿日期: 2013-10-11; 收到修改稿日期: 2013-10-31

又存在热效应明显,重凝严重现象^[5-6];激光功率更大的 CO₂ 激光对蓝宝石基片热应力破坏较为严重,不适于加工蓝宝石。激光划切主要考虑划切效率和划切质量,划切过程产生的溅射熔凝物、热影响区和裂纹都影响到划切质量。技术成熟的 Nd:YAG 二倍频调 Q 脉冲激光器具有输出波长短、输出稳定和能量损失小等特点,更有利于聚焦、材料吸收和光纤传输。调 Q 脉冲具有高峰值功率、窄脉冲和高重复频率等特点,可以微米级去除表面材料,高效获得蓝宝石基片微细切槽和精确的控制断裂,在蓝宝石基片划切行业应用前景广阔。故本文中利用脉冲 532nm 激光加工平台,对蓝宝石基片的划切工艺规律进行研究。

1 实验材料与方法

1.1 试验材料

蓝宝石样件为重庆四联公司生产的光学级 c-面(0001)蓝宝石基片,其尺寸为 50.8mm × 430μm(直径 × 厚度),抛光面的表面粗糙度为 0.1nm 及擦痕/麻点比为 60:40。

1.2 试验方法

本实验的加工装置如图 1 所示,实验中采用的激光器是 Lightwave 公司的 Series 210G 绿光激光

器,激光先后经过能量调节器和扩束镜(1 倍 ~ 8 倍可调)来分别调节脉冲能量和扩大输出激光光斑直径。随后被 45° 反射镜反射后的激光通过焦距为 50mm 的聚焦镜来获得束腰直径约为 16μm 的聚焦光斑,激光光斑位置通过一同轴 CCD 摄像头来进行实时监测和可视化。脉冲快门开关、移动平台在 x, y 和 z(用于调整焦点位置)3 个方向上的位移和在 x-y 平面内的旋转运动都由电脑 PC 控制器控制,其主要技术参量见表 1。

Table 1 The main technical parameters of the laser

technical parameters	value
wavelength λ	532nm
pulse duration τ	45ns
repeat frequency f	(0 ~ 50) kHz
focalspot diameter D	16mm
average power P	1.8W
scanning velocity v	(0 ~ 100) mm/s

由于附着在表面的污染物会影响蓝宝石对激光的吸收率,造成实验结果不准确;并且划切后的划槽周围沉积有重凝层和碎屑,不利于划槽微结构的观测与尺寸的测量。因此,实验前对样件依次进行丙酮超声波清洗和去离子水清洗和无尘环境下烘干环节的处理;实验后则需要更加严格的清洗:KOH 溶液超声清洗 5min → 丙酮溶液超声清洗 5min → 酒精溶液超声清洗 5min → 去离子水超声清洗 5min → 无尘环境下烘干。划槽表面和断面的微观形貌通过光学显微镜(Zxiss AX10)进行观察。

2 试验结果与讨论

2.1 偏振性对划槽的影响

在激光划切过程中,偏振性不仅影响蓝宝石对激光的吸收率^[7],而且影响划槽的断面形状^[8]。因此,试验采用沿着平行于入射面和垂直于入射面方向分别对蓝宝石进行划切。图 2 为不同偏振性对激光划切沟槽尺寸的影响曲线。

从图中可知,当脉冲激光能量为 150μJ、扫描速率小于 4mm/s 时,扫描方向平行于入射面线偏振方向。相比垂直于入射面线偏振方向的划槽,宽度较窄、深度较深;当速率大于 4mm/s 的时候,平行于入射面线偏振方向仍然产生划槽,但垂直于入射面线偏振方向没有划槽痕迹。平行于入射面线偏振方向的吸收率要大于垂直于入射面线偏振光的吸收率^[7],且当平行于入射面偏振方向时,划切前沿中

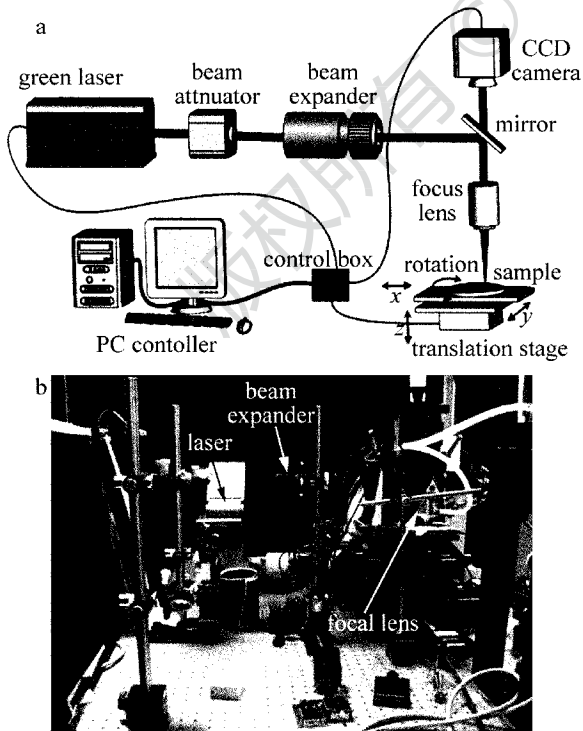


Fig. 1 a—schematic diagram of processing system b—experimental set-up

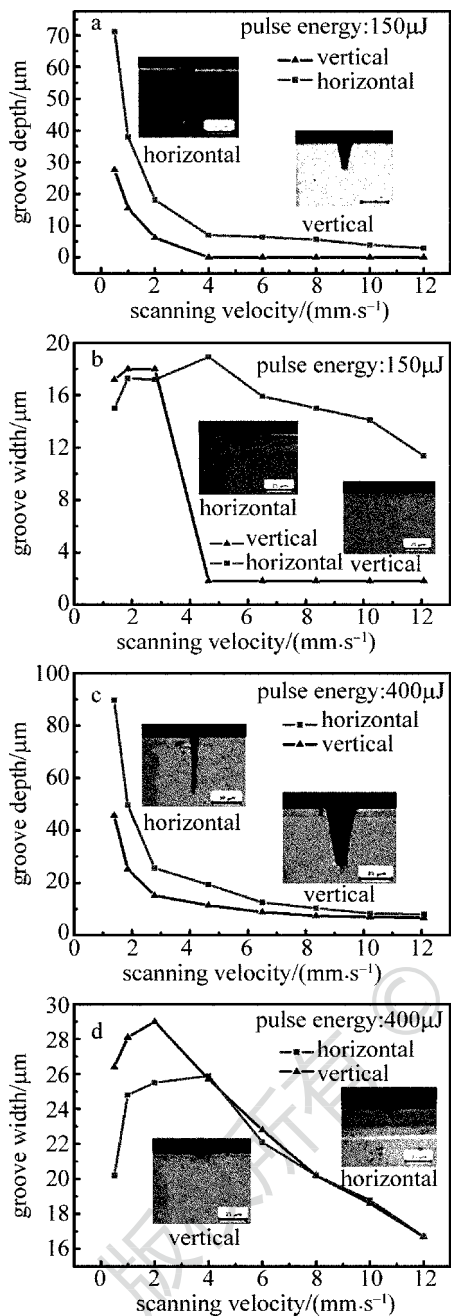


Fig. 2 Polarization versus groove size (scanning time 1)

心处的吸收率最大,而垂直时划切前沿的边缘吸收率最大^[9],这是由于在V型槽形成以后,p波(电矢量平行于光束速度矢量)吸收区域消失,s波(电矢量垂直于光束速度矢量)占优势,则限制了切割深度,因而产生平行于入射面偏振方向比垂直于入射面偏振方向的划槽窄而深的现象。但是当速率变大的时候,脉冲重叠率减小,输入激光能量减小,再加上吸收率不高,垂直于入射方向没有材料去除。当脉冲能量增加到400 μJ的时候,其变化规律仍然一致,但由于激光能量入射较大,垂直于入射方向即使

当速率大于4mm/s的时候仍有材料去除。

2.2 脉冲激光能量对划槽的影响

图3是脉冲能量对划槽的尺寸的影响关系图和扫描速率为1mm/s、扫描次数为1、不同脉冲能量的切划槽剖面光学显微镜图。从图3可以看出,在相同扫描速率下,划槽深度与脉冲能量之间存在近似线性关系;划槽宽度同样随着脉冲能量增加而增大,但增加的趋势逐渐变缓,这是由于随着单脉冲能量的增加,激光与材料作用时的有效热输入增加。同时看出,不同扫描速率时的加工效果不同,这是由于扫描速率影响了激光材料间作用时间(有效脉冲

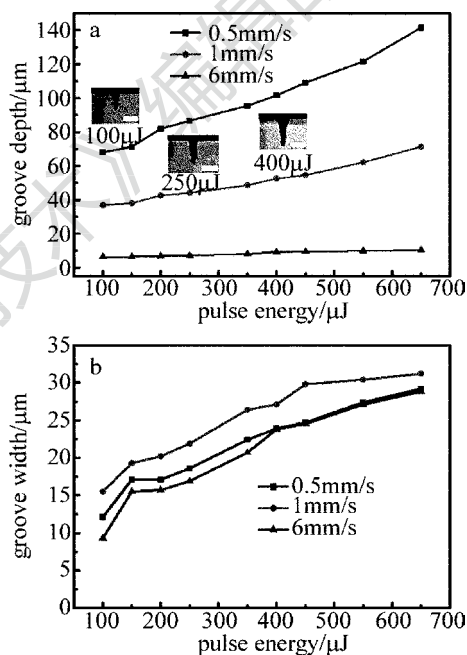


Fig. 3 Pulse energy versus groove size

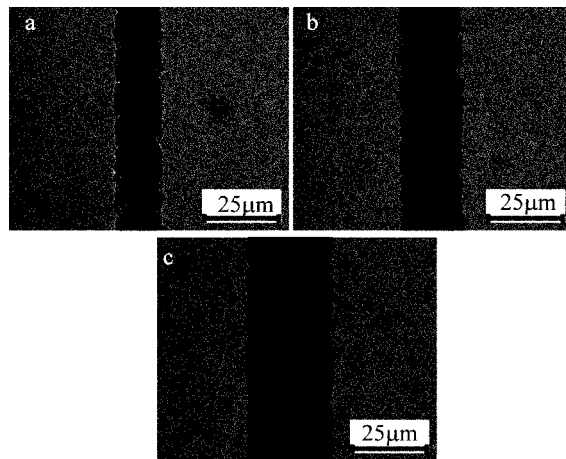


Fig. 4 Surface micro-morphology versus pulse energy (scanning time 1, scanning velocity 1mm/s)
a—pulse energy 100 μJ b—pulse energy 250 μJ c—pulse energy 450 μJ

数),且扫描速率越小,造成的热积累效应越明显,脉冲能量变化对槽深的影响也就越明显。脉冲能量增加,材料去除率增加,同时热扩散距离越大,造成划槽宽度和深度都增加。本实验中采用的纳秒激光的峰值能量密度较小,未能达到饱和值,所以试验中并没有出现传统理论上的划槽深度饱和现象^[10]。

图4为不同激光密度对划槽表面质量的影响,可以看出槽宽随着脉冲能量增加而有所增加,且表面质量更好。这是由于高能量提供了更多能量给熔化材料,以便其蒸发去除,而不沉积在槽表面。

2.3 离焦量对划槽尺寸的影响

离焦量不仅影响到作用在蓝宝石的光斑直径和能量密度,而且影响到材料的去除速率。图5是焦点位置对划槽尺寸的影响。焦平面在工件上表面上方称为正离焦,焦平面在工件上表面下方称为负离焦。当激光为正离焦时,随着焦平面与蓝宝石上表面间距的增加,光斑直径变大,激光能量减小,因此划槽深度减小,划槽宽度缓慢增加;反之,光斑直径变小,脉冲激光能量密度大,所得切槽窄而深。焦点位于加工表面下方时,上下范围都在焦深范围之内,更有利于材料去除,所以切槽最窄最深的位置位于焦平面以下即负离焦的加工效果优于正离焦。但如果负离焦的离焦量过大,则会降低材料的去除^[11],负离焦同样存在光斑直径变大造成槽宽增大的现象。从图5可以看出,随着离焦量从负离焦到正离焦变化的过程中,槽深急剧增加,在离焦量为-50 μm 时,槽深达到最大后又急剧减小。因此,取得合理的离焦量可以得到较高的加工效率和理想的划槽质量。

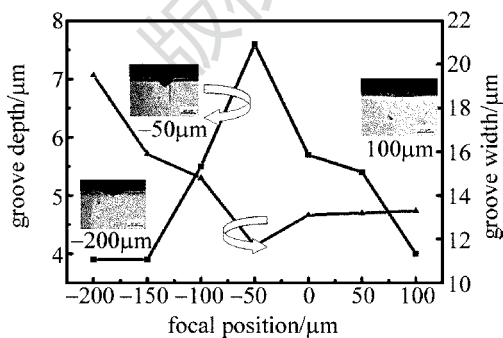


Fig. 5 Focus location versus groove size

从图6可以看出,随着样品与焦平面间距增加,划槽表面质量有所提高。这是由于离焦的划槽更宽熔,化材料更易移除划槽,而不容易粘连在槽内/槽壁。负聚焦类似于隐形划切技术,将激光聚焦在样

件内部并在聚焦位置形成带状隐性切割层(多晶层/高位错密度层和微裂纹/孔洞)^[12]。由图6可知,负离焦时划槽边缘有较为明显熔化材料重凝,即材料去除机理不同,这可能是由于激光器和材料的特性不同。

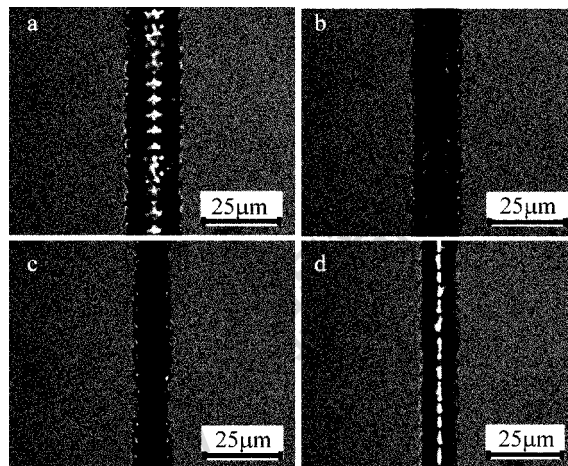


Fig. 6 Surface micro-morphology versus focus location (pulse energy 150 μJ ; scanning velocity 6mm/s; scanning time 1) a—focus position 200 μm b—focus position 150 μm c—focus position 50 μm d—focus position 100 μm

2.4 扫描速率对划槽的影响

图7是不同扫描速率对激光划切沟槽尺寸的影响曲线。随着速率增加,单位时间内输入的激光能量减小,材料去除量减小,槽深和槽宽总体上都会减小;划槽宽度却是随着扫描速率的增加先增加后减小,转折点是4mm/s附近。从图7a中划槽的剖面

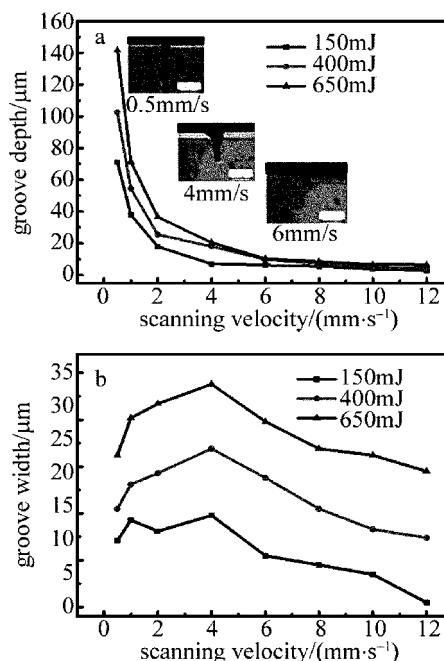


Fig. 7 Scanning velocity versus groove size

的观测得知,低速时的划槽更深,熔化材料也更多,这要求蒸发或者以反冲压致液体移除形式去除所需要的能量更多,所以这些材料更多的沉积于槽底,不是沉积于划槽边缘;当速率增大时,单位时间输入能量降低,材料溅射力不足,会有大量的熔凝物沉积在划槽周围,这样增加划槽宽度尺寸,故产生与图 7b 中扫描速率为 4mm/s 时的槽宽增加现象。扫描速率提高,切割宽度略有减小,这是因为随着扫描速率的提高,激光束与材料交互作用时间变短,实际输入的激光能量减少,使得热传导与扩散效应变小,因而切缝宽度减小。同时发现,光斑叠加比越高,划槽边缘越整齐。因此,低扫描速率时可以获得深划槽和更好划切质量。但划切速率决定了生产效率,在保证划切质量的前提下,尽量提高划切速率,从而提高生产率,降低加工成本。

脉冲激光划槽可以简单地看为一系列脉冲孔的叠加,如果相邻的两个脉冲孔相互链接则可以形成槽。由图 8 可知,脉冲的重叠程度越高,划槽边缘的质量越好。脉冲的重叠程度可由下式^[13]表示:

$$\alpha = \left(1 - \frac{v}{2rf}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中, v 为扫描速率, r 为切缝宽度的一半, f 为重复频率。

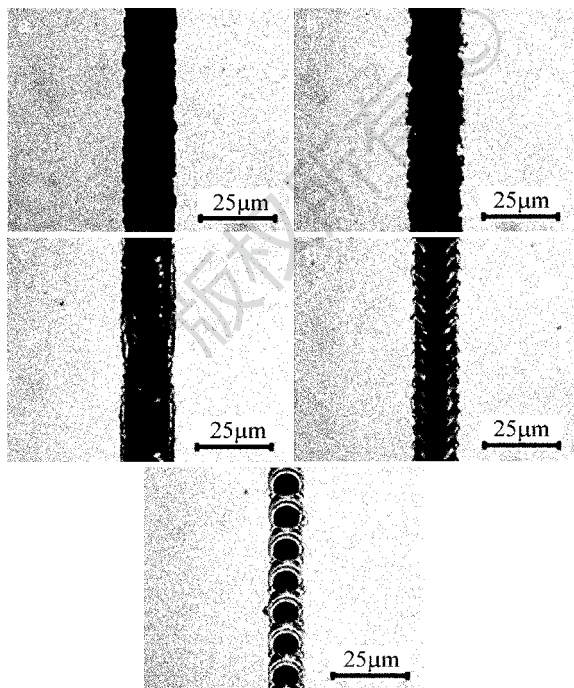


Fig. 8 Surface micro-morphology versus scanning velocity (scanning time 1; pulse energy 350 μJ)
a— $v = 0.5$ mm/s b— $v = 1$ mm/s c— $v = 4$ mm/s d— $v = 6$ mm/s e— $v = 12$ mm/s

由(1)式可知,当重复频率 f 和切缝宽度 r 不变,扫描速率 v 越低,越接近 100%,重叠度越高,切缝越平直(如图 8a 所示);反之,切缝不连续(如图 8e 所示)。

2.5 扫描次数对划槽的影响

扫描次数对划槽尺寸的影响如图 9 所示,可以看出槽宽和槽深都随着扫描次数增加而增加。这是由于单脉冲能量远远大于烧蚀阈值,每一次扫描都会去除一定材料,所以槽宽和槽深都有一定程度增加,并且前续系列脉冲使材料产生热累积和热致缺陷降低了材料的烧蚀阈值,导致了划槽的深度随扫描次数的增加而增加。划槽深度的增加,正离焦量也随之增加,激光能量密度就会越来越小,所以深度不会无限增加,而是趋近饱和^[14]。宽度的增加是由于熔凝物沉积造成的,低扫描次数时的划槽较浅,熔化材料较为容易通过蒸发形式去除,而反冲压排出液体的去除形式不那么明显,故重凝较少。扫描次数的增加使得槽深变深,熔化材料蒸发去除所需要的能量更多;同时由于能量在槽内传播时的衰减(槽壁吸收及离焦等),槽底熔化材料实际接收的能量被减少,使得熔化材料不能及时被蒸发,在反冲压的作用下流动至划槽边缘,从而出现较多重凝。

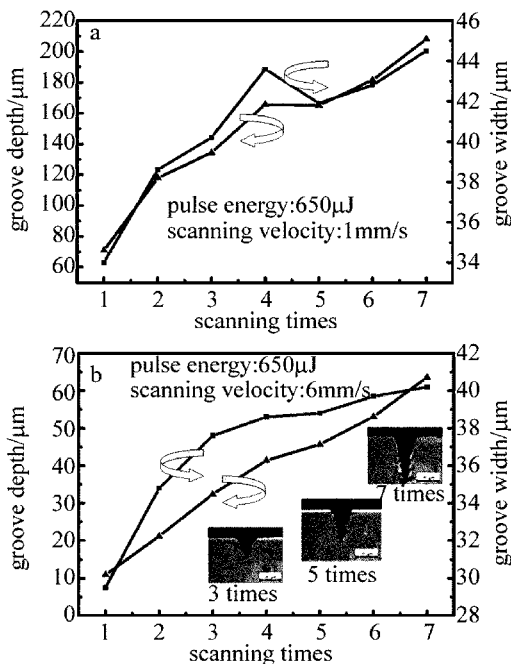


Fig. 9 Scanning times versus groove size

3 结 论

(1) 划槽在偏振性平行于入射面时和负离焦于 50 μm 时可以获得较深的划槽,但是离焦后光斑直

径变大,划槽稍宽于处于焦平面位置。

(2)槽深随着脉冲能量和扫描次数增加而近似线性增加;扫描次数转为有效脉冲数后,有效脉冲数与划槽深度都先迅速增加,而后增加趋势减缓;随着扫描速率增加而槽深近似反比例减少,并且扫描速率通过影响脉冲的重叠比来影响划槽的表面质量。

(3)扫描速率与脉冲能量对划槽的槽壁质量有重要影响,而扫描次数主要对划槽尺寸有影响;高脉冲能量可以获得更深划槽,但可能会导致槽边缘重凝过多;低扫描速率可以获得较好质量,但降低了划切效率。

故三者只有通过合理搭配才能获得较好的尺寸及质量。

参 考 文 献

- [1] REA E C, Jr. Scribing of thin sapphire substrates with a 266nm Q-switched solid-state laser [J]. Proceedings of the SPIE, 2004, 5339:231-240.
- [2] JUODKAZIS S, NISHIMURA K, MISAWA H. In-bulk and surface structuring of sapphire by femtosecond pulses [J]. Applied Surface Science, 2007, 253(15):6539-6544.
- [3] QI L, NISHII K, YASUI M, *et al.* Femtosecond laser ablation of sapphire on different crystallographic facet planes by single and multiple laser pulses irradiation [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(10):1000-1007.
- [4] ASHKENASI D, ROSENFELD A, VAREL H, *et al.* Laser processing of sapphire with picosecond and sub-picosecond pulses [J]. Applied Surface Science, 1997, 120(1/2):65-80.
- [5] HAN J, LI C, ZHANG M, *et al.* An investigation of long pulsed laser induced damage in sapphire [J]. Optics & Laser Technology, 2009, 41(3):339-344.
- [6] CHANG Q L, LIANG W W, HONG B Z, *et al.* Analysis of fracture surface for sapphire cut by long pulse laser [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2010, 39(4):996-1001.
- [7] HE G T, WEI X, XIE X Zh, *et al.* Experimental measurement of absorptivity of sapphire at 532nm laser radiation [J]. Laser Technology, 2011, 35(1):54-57 (in Chinese).
- [8] XIE X Zh, WEI X, HU W. Effect of linear polarized CO₂ lasers on cut kerfs of nonmetallic material [J]. Laser Technology, 2008, 32(4):399-401 (in Chinese).
- [9] READY J F. LIA handbook of laser materials processing [M]. New York, USA: Springer-Verlag, 2001:425-470.
- [10] BOVATSEK J M, PATEL R S. Highest-speed dicing of thin silicon wafers with nanosecond-pulse 355nm q-switched laser source using line-focus fluence optimization technique [J]. Proceedings of the SPIE, 2010, 7585:75850.
- [11] XIE X Zh, LIL J, WEI X, *et al.* Evaporative front of laser cutting PMMA [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(6):924-930 (in Chinese).
- [12] HUANG F M, XIE X Zh, WEI X H, *et al.* Newly developed techniques for laser dicing wafer [J]. Laser Technology, 2012, 36(3):293-297 (in Chinese).
- [13] LI X Y, ZENG X Y, LIU Y, *et al.* Study of YAG laser cutting process with stainless steel sheet [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, A28(12):1125-1129 (in Chinese).
- [14] IWAI Y, MIZUNO T, ARAI T, *et al.* Scribing characteristics of ceramics with Nd:YLF laser [J]. Proceedings of the SPIE, 2003, 5063:509-513.