

脉冲绿激光划切蓝宝石基片过程研究

谢小柱¹ 黄显东¹ 陈蔚芳^{2,3} 魏昕¹ 胡伟¹ 车荣泓¹

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

摘要 采用波长为 532 nm 的脉冲绿激光对蓝宝石基片进行划切加工。首先研究单脉冲激光烧蚀加工蓝宝石材料, 确定材料烧蚀阈值和产生裂纹阈值, 分析激光能量密度与烧蚀凹坑深度和直径之间的关系, 接着对纳秒绿激光烧蚀蓝宝石基片的热应力进行了分析, 最后进行脉冲激光划切蓝宝石的工艺实验。研究表明: 纳秒绿激光烧蚀蓝宝石材料主要是基于光热作用的机理。光热作用使得蓝宝石材料熔化、汽化, 为材料去除提供条件, 过大的热应力导致材料产生裂纹。综合考虑激光划切工艺参数(能量密度、扫描速度、扫描次数)以及材料表面处理方式等因素, 获得了切槽宽度为 20 μm , 深宽比为 7 的良好切槽。

关键词 激光技术; 激光划切; 蓝宝石; 光热效应; 532 nm

中图分类号 O436/TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.1203010

Study on Scribing of Sapphire Substrate by Pulsed Green Laser Irradiation

Xie Xiaozhu¹ Huang Xiandong¹ Chen Weifang^{2,3} Wei Xin¹ Hu Wei¹ Che Ronghong¹

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

Abstract A pulsed green laser with wavelength of 532 nm is employed to scribe the sapphire substrate. Firstly, sapphire surface ablated by single pulsed laser is observed. The ablation threshold and the cracks threshold of sapphire are identified. The relationship between the laser fluence and crater depth/diameter is analyzed. Then, the thermal stress of nanosecond green laser irradiating sapphire is analyzed. Finally, the parametric laser scribing of sapphire substrate is conducted. The results show that the formation of the craters and grooves in the laser ablation process is mainly due to the photothermal effect. The effect results in melting, vaporization, which is essential to the material removal. Meanwhile, micro-cracks are easily induced by the larger thermal stress. A narrow groove width of 20 μm , aspect ratio of 7 and better processing quality can be obtained simultaneously by considering laser processing parameters (laser fluence, scanning velocity and scanning times) and the treatment of the material surface.

Key words laser technique; laser scribing; sapphire; photothermal effect; 532 nm

OCIS codes 140.3390; 140.3430; 140.3840; 140.6810

1 引言

蓝宝石具有优良的光学性能、物理性能、化学性

能, 常用于制作光学元件和微机械设备^[1], 广泛应用于工业、国防、科研等多个领域, 特别是作为衬底材

收稿日期: 2013-06-18; 收到修改稿日期: 2013-07-29

基金项目: 国家自然科学基金(50805027, 50675038)、广东省自然科学基金项目(S2013010014070)、江苏省精密与微细制造技术重点实验室开放基金

作者简介: 谢小柱(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事激光加工方面的研究。E-mail: xiaozhuxiegdut@gmail.com (中国光学学会会员号: s040m617s)

料在 LED 产业中广泛运用^[2]。在 LED 的生产工序中,为了大幅度提高生产效率和降低成本,往往是在一个大的基片上沉积制备许多芯片,然后再把基片分割成各个单元,最后再进行封装。因此,蓝宝石基片划切技术对于提高元器件的成品率和封装效率有着重要影响。

传统的机械划片法存在划槽宽、易崩边、裂纹、刀具磨损等缺点;化学刻蚀法,其加工工序复杂,效率低,并且污染环境。相比之下激光划切技术具有高能量密度,无接触等特性,可以实现快速度、高效率、无刀具磨损地划切蓝宝石基片。Torrissi 等^[3]研究了不同激光波长对烧蚀阈值的影响,认为红外激光主要是光热作用实现材料去除,热作用区域较大;李长青等^[4]使用 Nd:YAG 长脉冲激光分别在 N_2 、 Ar_2 、 O_2 气体下划切蓝宝石,对断口进行研究,发现在保护气体 Ar 作用下,切割深度最大,断口平整,有金属光泽,但在 O_2 中加工时,断口表面粉化严重且切口深度较浅;Han 等^[5]使用 1064 nm 毫秒激光烧蚀蓝宝石凹坑,结果表明毫秒脉宽激光与蓝宝石作用机制主要是热熔化和坑内等离子体吸收作用;Patel 等^[6,7]使用 355 nm 紫外激光划切蓝宝石 LED 基片,研究了切槽尺寸与激光的能量密度、脉冲频率关系,优化激光加工工艺参数;杨立军等^[8]使用紫外激光进行了蓝宝石晶圆的划切试验,发现紫外激光划切蓝宝石晶圆能获得良好的微槽结构,不同的激光能量密度、脉冲重复频率和扫描速度对微槽的深度和宽度有不同的影响,晶圆表面粗糙度对微槽的划切质量影响很大;戴玉堂等^[9]研究了波长为 157 nm 的深紫外激光刻蚀蓝宝石的特点,当激光能量密度为 $3\sim 4\text{ J/cm}^2$ 时,最大的刻蚀速率能达到 400 nm/s ;Shamir 等^[1]详细研究了飞秒激光多次划切蓝宝石表面,最终获得深度为 $180\text{ }\mu\text{m}$,宽度为 1 mm ,长度为 15 mm 的切槽;Uteza 等^[10]通过实验

获得了纳秒、皮秒、飞秒激光加工蓝宝石的烧蚀阈值,比较后发现烧蚀阈值与蓝宝石的带隙有关,与波长关系不大。

蓝宝石对红外激光吸收率很低,要加工蓝宝石就需要提高激光能量,也就导致了激光热效应更为明显;若使用保护气体进行划切加工,需要配套供气系统。紫外波长和准分子激光器可以较好地作用于蓝宝石,但是激光器成本较高。飞秒激光加工热影响区域小,但材料去除率低,光子能量损失大,这也限制了其在工业中的广泛使用。纳秒级二倍频二极管抽运固体激光器(DPSS)输出激光稳定,能量损失小,短波长(532 nm)和窄脉宽($\sim 50\text{ ns}$)有利于材料吸收激光能量和减少热作用影响,可以用于蓝宝石基片的划切。

因此,采用 DPSS 脉冲绿激光对蓝宝石进行划切加工。研究单脉冲烧蚀蓝宝石表面凹坑的尺寸的形貌特征,确定蓝宝石的烧蚀阈值和裂纹阈值,分析激光能量密度和烧蚀凹坑深度/直径之间的关系;并对脉冲绿激光烧蚀蓝宝石基片的热力学过程进行了分析。以此为基础,考虑实际加工中对划切的要求,进行脉冲激光划切蓝宝石的工艺实验,得到良好质量和大深宽比的切槽。

2 实验材料和装置

实验装置如图 1 所示,激光依次经过能量调节器和扩束镜,由 45° 反射镜反射后通过聚焦镜,最终获得直径约为 $16\text{ }\mu\text{m}$ 的光斑;光斑位置通过同轴 CCD 摄像头来进行实时监测;移动平台能在 x, y, z 方向移动以及 xy 平面内的旋转运动。本实验所用激光器的脉宽为 45 ns 、波长为 532 nm 、重复频率为 $0\sim 50\text{ kHz}$ 、能量密度变化范围为 $0\sim 300\text{ J/cm}^2$ 、扫描速度变化范围为 $0\sim 50\text{ mm/s}$ 。

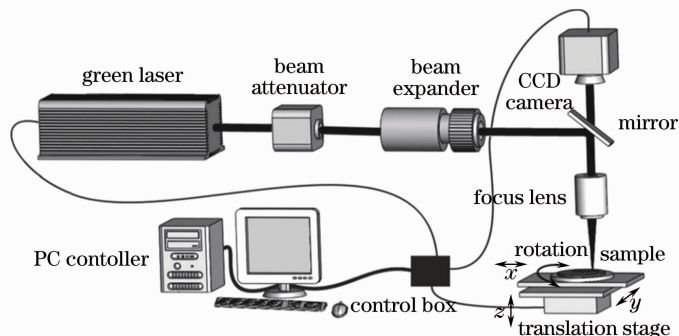


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

实验样件为光学级 c-面(0001)蓝宝石基片(重庆四联),其尺寸为 $432\ \mu\text{m} \times 5.08\ \text{cm}$ (厚度 \times 直径)。实验前,样件用去离子水超声波清洗一次,接着干燥处理,然后预置覆层;加工后,先用 $2\ \text{mol KOH}$ 溶液清洗,再依次用 Acetone、异丙醇(IPA)溶液、去离子水各清洗一次(清洗时间均为 $5\ \text{min}$ 每次),最后干燥处理。

激光烧蚀凹坑尺寸(直径和深度)及划槽尺寸(深度和宽度)都是通过光学显微镜(Zeiss AX10)测量,取 3 个不同位置的算术平均值。实验后样件的表面和断面微观形貌通过扫描电镜(Philips Nova NanoSEM 230)和光学显微镜(Zeiss AX10)进行观察。

3 结果与讨论

3.1 单脉冲激光烧蚀蓝宝石凹坑尺寸与形貌

图 2 显示的是单脉冲凹坑深度/直径与激光能

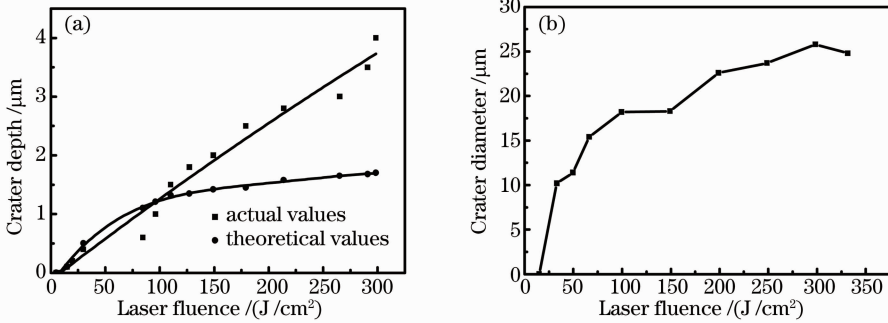


图 2 单脉冲烧蚀凹坑(a)深度和(b)直径与激光能量密度之间的关系

Fig. 2 Variation of crater (a) depth and (b) diameter with laser fluence

图 3 所示不同能量密度下单脉冲烧蚀凹坑微观形貌。图中可以看到烧蚀区域的中心明显凹陷形成凹坑,坑口略高于未加工表面;在图 3(b),(c)中凹坑内,辐射状分布着细小裂纹,裂纹长度约为 $5\ \mu\text{m}$;在坑口附近有大量的颗粒状的溅射物,这种现象在图 3(c)中更为明显。

当激光照射蓝宝石表面时,蓝宝石表面吸收激

量密度之间的关系。随着脉冲能量密度增加,凹坑深度增加,近似呈线性关系。这是因为单位脉冲时间里,激光辐射在蓝宝石表面时,表面材料吸收能量,温度升高达到熔点开始熔化、形成熔池;随着激光能量密度的增加,蓝宝石吸收激光的能量增加,从而使得凹坑的深度相应增加。

当脉冲激光能量密度增加,凹坑直径先迅速增加,而后缓慢增加,最后趋于饱和。这是因为当脉冲能量密度大于烧蚀阈值后,由于能量密度的增加,表面凹坑直径逐渐接近光斑直径 $16\ \mu\text{m}$;能量密度继续增强,凹坑内的部分蓝宝石液体转变为高温的蒸汽或等离子体并不断地烧蚀凹坑边缘,使得凹坑直径持续增加,但在单个脉冲周期里,这种作用受到作用时间、热扩散、周围的空气对流等因素影响,故凹坑直径最后趋于饱和,饱和值为 $25\ \mu\text{m}$ 。

光能量发生熔化,形成微小熔池。由于激光光强呈高斯分布,使得熔池表面光斑区中心温度高,边缘低,液体表面存在表面张力梯度,产生表面张力;并且光斑中心极高的温度易使蓝宝石发生汽化现象,产生的蒸气使得材料内出现反冲压力。在表面张力和反冲压力共同作用下,熔融物被迫从中心先向坑口流动,从而形成凹坑,当熔融物到达坑口附近时,

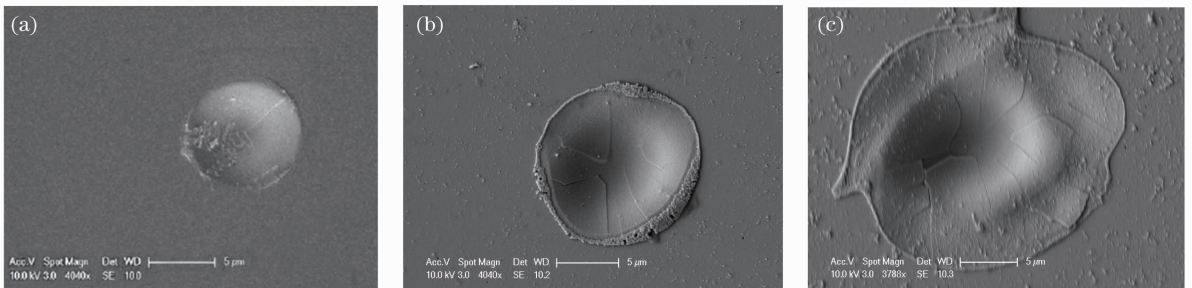


图 3 不同能量密度下单脉冲烧蚀凹坑表面形貌照片。(a) $15\ \text{J}/\text{cm}^2$; (b) $84\ \text{J}/\text{cm}^2$; (c) $198\ \text{J}/\text{cm}^2$

Fig. 3 Surface micro-morphology of crater ablated by single pulse at different laser fluences. (a) $15\ \text{J}/\text{cm}^2$;

(b) $84\ \text{J}/\text{cm}^2$; (c) $198\ \text{J}/\text{cm}^2$

温度降低发生重凝现象^[11-12]并堆积在坑口附近,从而导致坑口略高于未加工的蓝宝石表面,形成“火山口”形貌。由于熔池表面光斑区中心压强高,边缘低,且中心压强远大于大气压,熔融物被迫沿着熔池边缘向外高速喷溅出来,激光能量密度越大,溅射越多;在脉冲激光的辐照区域内,蓝宝石表面温度快速上升和下降,产生巨大的热应力,当热应力大于一定值后,就会在凹坑内产生细小裂纹,正如图 3(c)所示,随着激光能量密度增加,裂纹数量也增加。

3.2 机理分析

激光与材料相互作用机理可以分为光热、光化学和光物理作用。当激发能转换为热的速度比激发速度快,则可以认为其是光热作用;光化学作用是指激光通过物质的分子结合键断裂来去除材料,且热作用较小,故称之为非热作用;当光化学和光热作用都对总加工速率具有显著性作用时,则称之为光物理作用。

蓝宝石属于 Al_2O_3 离子晶体,分子间依靠离子键结合,其禁带宽度 E_g 约为 8.8 eV ^[5],Al-O 键的键能约 585 kJ/mol ,即 6.063 eV ,而波长为 532 nm 脉冲绿激光的光子能量只有 2.6 eV ,光子能量低于禁带宽度,很难通过单光子吸收直接破坏化学键。其次,激光脉宽 $\tau = 45 \text{ ns}$,其功率密度不能达到 10^6 W/cm^2 ,不能发生明显的多光子吸收,不存在光化学作用。所以脉冲绿激光烧蚀蓝宝石的作用机理基本上属于光热作用范畴:当脉冲激光辐照在蓝宝石表面,激光能量在表面快速沉积,引起蓝宝石表面温度急剧上升,使得材料熔化或者汽化,同时在光斑作用区域内形成高温高压的气体,这种气体向外膨胀的效应有助于去除材料,如图 3(c)所示,可以清

晰地看出在单脉冲烧蚀过程中材料的熔化、重凝、飞溅现象;而脉冲激光结束后,温度的迅速下降使得蓝宝石表面产生巨大的应力,从而导致裂纹出现。裂纹的产生可以使得部分材料从基体上剥离,有助于材料去除,但影响加工质量。

基于光热作用,忽略单脉冲激光产生的等离子屏蔽作用,对单脉冲绿激光烧蚀蓝宝石表面凹坑形貌和尺寸进行研究,建立温度和应力模型,分析其温度和应力的分布,获得蓝宝石的烧蚀阈值和裂纹阈值,进而解释蓝宝石材料的去除机理并为加工质量的改进提供理论指导。

3.2.1 单脉冲烧蚀蓝宝石热效应分析

激光辐照能量被表层区域材料所吸收,并转换为热而成为热源,热量向材料内扩散,形成不均匀温度场。热扩散深度为^[13]

$$L = \sqrt{4D\tau} = 2\sqrt{\kappa\tau/(\rho c_p)}, \quad (1)$$

式中 D 为热扩散系数,热导率 $\kappa = 0.40 \text{ W/cm} \cdot \text{K}$ ^[14],比热容 $c_p = 0.85 \text{ J/g} \cdot \text{K}$ ^[14],密度 $\rho = 3.98 \text{ g/cm}^3$ ^[14],代入(1)式求得热扩散深度约为 $1.46 \mu\text{m}$,远小于束腰直径 $16 \mu\text{m}$ 。

为了简化蓝宝石材料加热过程的理论分析,热模型进行了以下假设:1) 蓝宝石是均匀且热物理性质各向同性的材料;2) 蓝宝石的光学和热力学参数与温度无关;3) 忽略传热过程中的辐射和对流,只考虑材料表面向内的热传导;得到激光加热和冷却阶段的温度场分布,即加热阶段:

$$T(z, t)_{0 < t < \tau} = T_0 + \frac{AF}{\kappa\tau} (4Dt)^{1/2} \text{ierfc}\left[\frac{z}{(4Dt)^{1/2}}\right], \quad (2)$$

冷却阶段:

$$T(z, t)_{t > \tau} = T_0 + \frac{2AFD^{1/2}}{\kappa\tau} \left\{ t^{1/2} \text{ierfc}\left[\frac{z}{(4Dt)^{1/2}}\right] - (t - \tau)^{1/2} \text{ierfc}\left[\frac{z}{[4D(t - \tau)]^{1/2}}\right] \right\}, \quad (3)$$

式中吸收率 $A = 0.03$, T_0 为环境温度 (300 K), F 为激光能量密度 (J/cm^2), t 为时间 (s), z 为深度 (μm), T 为温度 (K)。

图 4(a) 为不同能量密度下的蓝宝石表面的温度随加热时间变化的规律。可以看出,当激光辐射蓝宝石表面时,随着辐射时间的增加,表面温度迅速升高;当 $t = \tau$ 时,表面温度达到最大,然后温度逐渐冷却至室温;激光能量密度越大,表面温度能达到的最高温度越高。如图 4(a) 所示,当激光能量密度为 15 J/cm^2 , $t = 45 \text{ ns}$ 时,温度 T 为 2315 K ,接近蓝宝

石的熔点 $T_M = 2323 \text{ K}$ ^[11],可以认为是蓝宝石的烧蚀阈值。在这个温度以上,蓝宝石表面开始熔化为液态,液态的蓝宝石继续吸收激光能量变为超热液体,当温度达到 $0.9 T_C$ (T_C 为热力学临界温度)时,就会发生相爆炸^[15-16]。当脉冲的能量密度为 30 J/cm^2 时,表面的最高温度为 4840 K ,已经超过 $0.9 T_C$ (蓝宝石的 T_C 为 5335 K ^[17]) 从而产生相爆炸,使得液态的蓝宝石向外激烈地喷溅,随着激光能量密度的增大,这种现象越明显,在图 3(c) 中可以清楚地看到大量的喷溅颗粒分布在凹坑的周围。

图 4(b)能量密度为 15 J/cm^2 时,在上表面以下不同 z 处的温度与时间关系。可以看出距离表面不同位置达到最大温度的时间滞后于脉宽 ($t > \tau$),位置越深,时间越滞后。显然,这与实验是相符合的,

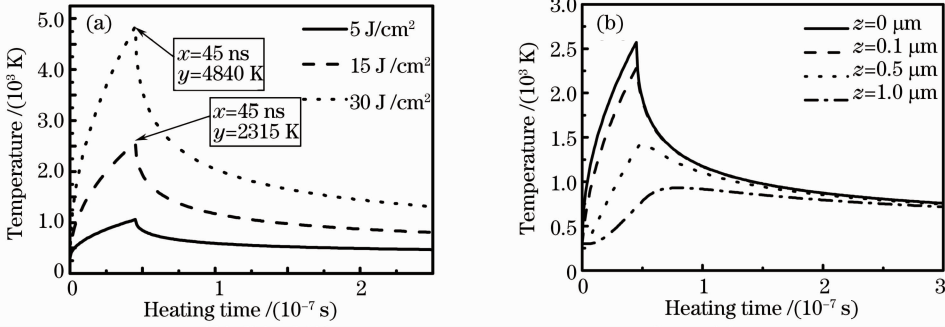


图 4 (a) 不同能量密度和(b) 不同深度 z 处温度与加热时间的关系

Fig. 4 Variation of calculated temperature with heating time with (a) different laser fluences and (b) various depths

从图 5 可以看出温度随着深度 z 的增加而减小,给定蓝宝石熔点 $T_M = 2323 \text{ K}$,可以确定达到固液界面的位置,即凹坑深度,激光能量密度越大,则凹坑深度越大,取不同激光能量密度下的凹坑深度,即可理论计算得到凹坑深度和激光能量密度之间的关系,如图 2(a) 所示,其中方点和圆点分别为实验值和理论值,比较发现,当激光能量密度小于 110 J/cm^2 时,理论计算值和实验值接近;当激光能量密度大于 110 J/cm^2 时,实验值大于理论计算值,

当激光辐射在蓝宝石表面时,材料表面温度升高的同时向内导热,故表面先达到最高温度,深度越深,温度达到最大值的时刻越滞后。

这是因为激光能量密度较小的时候,理论计算吸收率和实际吸收率相差不大,而激光能量密度大的时候,已经形成凹坑,凹坑曲面形貌对激光有增强吸收的作用,所以实际材料对激光的吸收率会显著增加,大于理论计算的吸收率,所以表现为理论计算的烧蚀凹坑深度偏小;温度的升高,材料对激光的吸收率也会相应的增加,而计算模型忽略温度对吸收率的影响,也导致了理论计算的深度小于实际加工的深度。

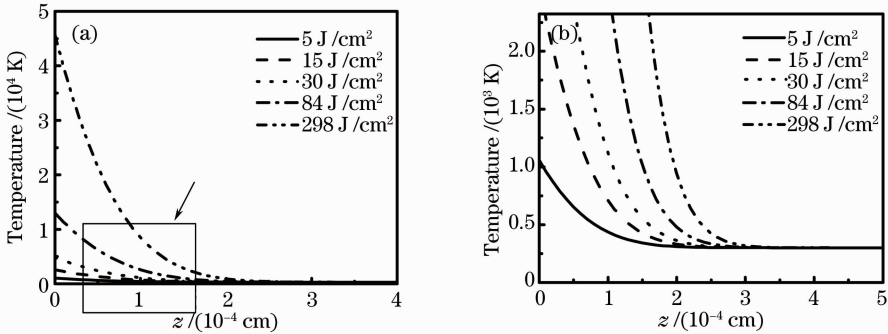


图 5 (a) 激光烧蚀加工蓝宝石温度和深度 z 之间的关系及(b) 局部放大图

Fig. 5 (a) Variation of temperature with depth at different laser fluences and (b) its local enlarged chart

3.2.2 单脉冲激光烧蚀蓝宝石热应力分析

当激光辐射在蓝宝石表面上时,其表面及内部产生非均匀温度场,从而使得材料不均匀地膨胀,故存在热应力。当热应力超过蓝宝石的应力极限值后,蓝宝石就会产生裂纹。在激光划切过程中,裂纹朝着深度方向扩展,有利于裂片;朝着切槽横向扩展容易产生崩边,造成断口的不平整。因此,研究裂纹产生阈值就显得尤为重要,也为如何合理地选择工艺参数提供参考。

热应力 σ_H 与温差 ΔT 之间的关系满足^[18]

$$\delta_H = -\frac{G\gamma\Delta T}{1-\nu}, \quad (4)$$

将(2)式和(3)式代入(4)式中,即可以得到加热和冷却时的热应力分布,即

加热阶段:

$$\delta_{H_{0 < t < \tau}} = -\frac{2AFG\gamma D^{1/2}}{\kappa\tau(1-\nu)} \text{ierfc}\left[\frac{z}{(4Dt)^{1/2}}\right], \quad (5)$$

冷却阶段:

$$\delta_{H_{>\tau}} = \frac{2AFG\gamma D^{1/2}}{\kappa\tau(1-\nu)} \left\{ t^{1/2} \operatorname{ierfc} \left[\frac{z}{(4Dt)^{1/2}} \right] - (t-\tau)^{1/2} \operatorname{ierfc} \left\{ \frac{z}{[4D(t-\tau)]^{1/2}} \right\} \right\}, \quad (6)$$

式中 G 为弹性模量 (Pa), γ 为热膨胀系数 (K^{-1}), ν 为泊松比。根据(5)式和(6)式, 带入 $G = 3.45 \times 10^{11}$ Pa, $\gamma = 4.3 \times 10^{-6}$ K^{-1} , $\nu = 0.18$, 计算得到激光烧蚀材料表面的热应力分布如图 6 所示。在刚开始加热阶段, 温度快速升高, 蓝宝石表面承受压应力, 而在冷却阶段承受拉应力; 热应力随着激光作用时间的增加先增加后减小, 在 $t = \tau$ 处达到最大; 激光能量密度越大, 蓝宝石内部产生温度变化越剧烈、热应力越大。

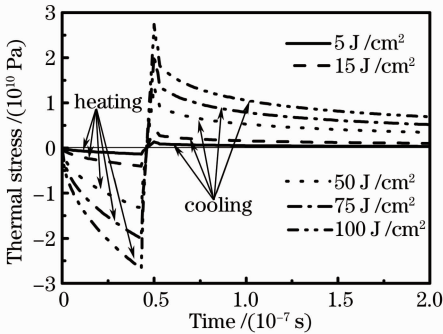


图 6 加热/冷却时间对表面热应力的影响
Fig. 6 Influence of surface thermal stress on heating/cooling time

对于脆性材料裂纹的产生和扩展符合最大切向力准则

$$\delta_{H_{\max}} \geq \delta_1 = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r_c}}. \quad (7)$$

根据裂纹盈利强度因子 $K_1 = 70 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 脆断的裂纹长度 $r_c = 2 \mu\text{m}$ 计算得 $\delta_1 = 1.97 \times 10^{10}$ Pa。如图 6 所示, 在激光能量密度为 75 J/cm^2 时, $\delta_{H_{\max}}$ 略大于 δ_1 , 则可以认为蓝宝石理论裂纹阈值约为 75 J/cm^2 。

实验选定激光脉冲频率为 1 kHz , 仅改变激光的能量密度, 对蓝宝石表面进行单脉冲烧蚀实验, 观测其烧蚀后的微观形貌。结果发现: 当激光能量密度增加到 84 J/cm^2 时, 蓝宝石表面产生裂纹如图 3 (b) 所示, 综合考虑认为蓝宝石实际裂纹阈值约为 84 J/cm^2 附近。如果激光能量密度继续增加可能导致裂纹扩展或者产生更多的裂纹。为了避免产生裂纹, 能量密度选择范围应该介于烧蚀阈值和裂纹阈值之间。在激光划切蓝宝石过程中, 只要断裂或裂纹的方向仅仅向槽底扩展而不向划槽边缘横向或斜向扩展, 为保证加工效率, 采用接近或者稍大于裂纹阈值的能量密度进行加工是可行的。

3.3 激光划切加工蓝宝石工艺参数选择

激光划切蓝宝石, 加工尺寸和质量体现为: 窄而深的切槽、小的热影响区, 少或无熔凝物和裂纹。由于蓝宝石为硬脆材料的物理特性和激光光热作用的影响, 会出现裂纹、碎片、重凝等质量问题。为了解决这些问题, 需要考虑激光能量密度、扫描速度、扫描次数、材料表面处理方式等因素的影响。

1) 激光能量密度。根据烧蚀阈值 ($\sim 15 \text{ J/cm}^2$) 和裂纹阈值 ($\sim 84 \text{ J/cm}^2$) 确定激光烧蚀能量密度, 以减少划切过程中产生的重凝和裂纹; 考虑加工效率, 在加工尺寸允许的范围内, 可以使用接近裂纹阈值或者稍大于裂纹阈值的能量密度对蓝宝石进行划切。图 7 所示为使用激光能量密度为 75 J/cm^2 , 扫描速度为 5 mm/s , 扫描次数为 1 次加工蓝宝石后其切槽底部照片。在图中槽底位置有些微裂纹, 其单条长度为 $6 \mu\text{m}$ 不等, 呈相互交叉状, 无切槽侧边横向或斜向扩展裂纹。这种出现在槽底的微裂纹是可以接受的, 但需要控制好激光能量密度, 以确保加工质量。

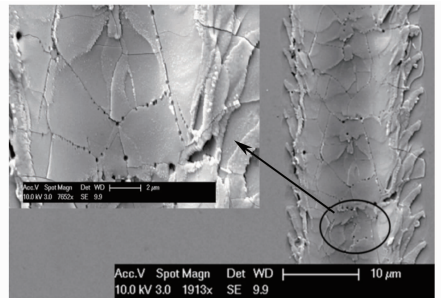


图 7 切槽底部照片

Fig. 7 Photo of the bottom of the groove

2) 扫描速度。如图 8 所示, 切槽深度随着扫描速度的增加而减小, 这是因为随着速度增加, 单位时间内输入的激光能量减小, 材料去除量减小, 切槽深度减小; 切槽宽度随着扫描速度的增加先增加后减小, 转折点在 2 mm/s 附近。当扫描速度很小 ($\sim 0.5 \text{ mm/s}$) 时, 脉冲叠加率很大 (97%), 单位时间作用面积上的能量大, 多数材料能够气化形式去除, 由于材料溅射力不够, 大部分的熔凝物会沉积在切槽底, 所以切槽的宽度较小; 而当扫描速度逐渐增加到 2 mm/s 时, 脉冲叠加率减小 (87%), 单位时间作用面积上的能量也会减小, 气化形式去除的材料减小, 熔凝物增加, 但材料的溅射力增强, 使得大量的熔凝物沉积在切槽周围, 这样使得切槽宽度反而

增加;当扫描速度为 6 mm/s(大于 2 mm/s 后时),脉冲叠加率继续减小(64%),单位时间作用面积上的能量继续减小,切槽宽度减小。由于大的深宽比,有利于裂片和控制成本,故激光的扫描速度应该小于 2 mm/s。

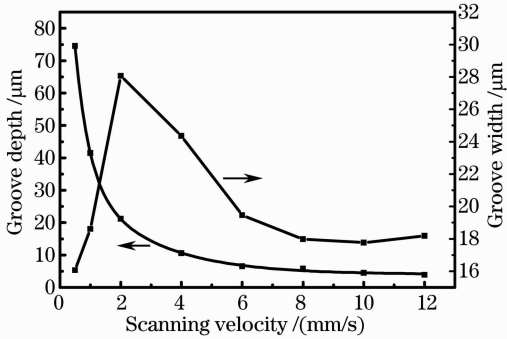


图 8 切槽尺寸与激光扫描速度的关系
(激光能量密度为 75 J/cm²)

Fig. 8 Variation of groove size with scanning velocity at laser fluence of 75 J/cm²

3) 扫描次数。图 9 是激光能量密度为 75 J/cm²、扫描速度为 1 mm/s 时,扫描次数与切槽深度和宽度之间的变化趋势:随着激光扫描的次数增加,切槽深度和宽度先快速增加后减缓最后趋近饱和。经过激光划切后的蓝宝石表面形成细小切槽且材料发生微细变化,使得蓝宝石对激光的吸收率加强,导致加工深度和宽度快速增加;但受到焦深、热扩散、对流散热等因素的影响,这种加强的效果逐渐被削弱,最后使得切槽深度和宽度趋近于饱和值。

4) 表面处理方式。在蓝宝石表面预置厚度约为 500 nm 水溶性覆层,可以有助于减小沟槽的熔凝层沉积。如图 10 所示,采用的脉冲能量密度为

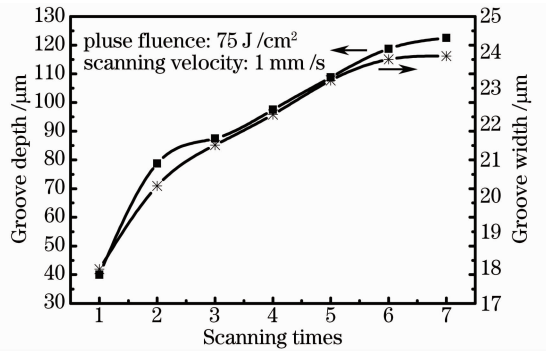


图 9 激光扫描次数对切槽尺寸的影响
(激光能量密度 75 J/cm²,扫描速度 1 mm/s)

Fig. 9 Influence of groove size with scanning times at laser fluence of 75 J/cm², scanning velocity of 1 mm/s
75 J/cm²、频率为 1 kHz,扫描次数均为 1 次,在不同的扫描速度下,水溶性覆层对切槽尺寸的影响。在图 10(a)中,有水溶性覆层的沟槽宽度显著小于无覆层,沟槽深度略小于无覆层。这是因为:覆层主要成分为聚乙烯或聚丙烯类聚合物,其对波长为 532 nm 激光吸收率很低,不会过多地吸收激光的能量,所以对切槽的深度影响不大;但在切槽宽度方向,激光烧蚀过程中产生的熔凝物会沉积在覆层上面,而覆层在后续清洗过程易溶解于丙酮或 IPA 溶液,这就使得熔凝物很容易清洗掉,故切槽宽度会显著减小。图 10(b)与(c)为扫描速度 6 mm/s 时,加工后蓝宝石切槽正面光学显微镜照片。可以清晰地看到,无水溶性覆层的烧蚀和重凝都比有水溶性覆层的严重,这主要是由于水溶性覆层对激光能量的吸收作用,减少了蓝宝石对激光能量的吸收,其热作用减小,使得蓝宝石重凝现象减小,从而提高了切槽的质量。

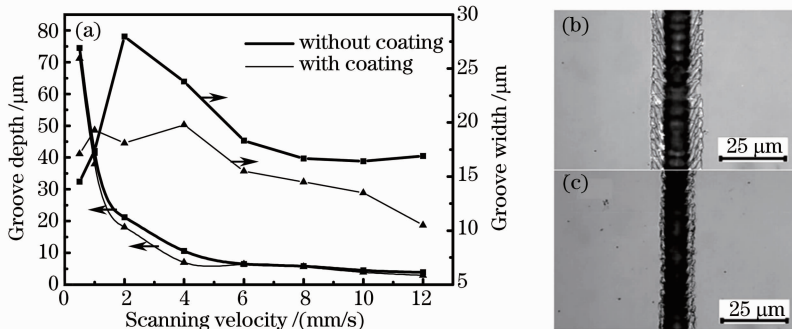


图 10 (a) 覆层对切槽尺寸的影响;(b) 无覆层切槽正面照片;(c) 有覆层切槽正面照片
Fig. 10 (a) Effects of coating on groove size; (b) front surface of groove without coating;
(c) front surface of groove with coating

综上所述,激光划切蓝宝石的过程需要综合考虑以上多个因素的影响,采用实验设计方法,对参数

进行优化,其激光划切工艺参数:激光脉冲能量为 75 J/cm²,扫描速度为 0.6 mm/s,扫描次数为 3 次,

预置水溶性覆层厚度约为 500 nm,加工效果如图 11 所示。图 11(a)中槽宽为 20 μm ,划切深度为 141 μm ,切槽表面边缘无裂纹;图 11(b)是沿着切槽方向裂片后的断面图,可以将整个断面由上到下分为 3 个区域,即位于划槽上边缘的划片区域 A、位于划槽槽底的划片区域 B 和裂片区域 C,对应的表面粗糙度 R_a 分别为 0.13 μm 、0.27 μm 、15.4 nm;划

片区域 B 形成了“针孔”形状的条纹,这是由于脉冲激光划切过程中,相邻两个脉冲叠加作用,烧蚀前沿沿着朝扫描速度的反方向倾斜,深宽比大越大,烧蚀前沿弯曲的角度就越大,从而在烧蚀前沿的根部之间存在很小的间隙,所以划片区域 B 表面粗糙度 R_a 要比区域 A 要大些;裂片区域 C 的粗糙度很小,与原始表面相差无几。

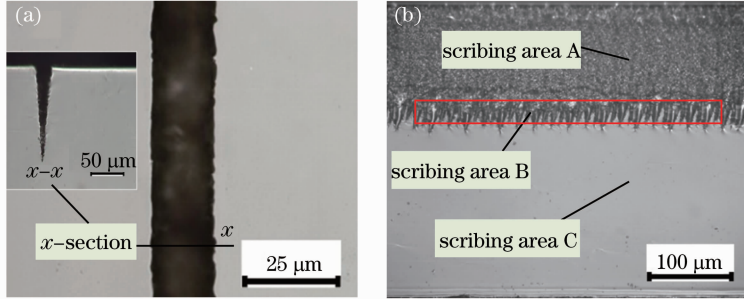


图 11 优化激光划切参数后切槽的(a)正面和(b)断面照片

Fig. 11 (a) Front surface and (b) section of groove ablated by optimized laser parameters

4 结 论

使用波长为 532 nm 脉冲绿激光烧蚀、划切蓝宝石,研究加工后的特征尺寸和微观形貌,分析其加工机理和热作用机制,得出以下结论。

1) 单脉冲绿激光烧蚀蓝宝石的机理,主要是光热作用,包括吸热,熔化,蒸发,重凝,喷溅等过程,形成典型的“火山口”形貌。

2) 单脉冲绿激光与蓝宝石相互作用时,蓝宝石表面温度随着辐射时间的增加而升高;表面在加热阶段承受压应力,冷却阶段承受拉应力;激光能量密度越大,内部温度变化越快,热应力越大。当 $t = \tau$ 时,蓝宝石表面温度和表面热应力达到最大;综合考虑理论和实验结果,确定蓝宝石的烧蚀阈值约为 15 J/cm^2 ,裂纹阈值约为 84 J/cm^2 。

3) 根据蓝宝石烧蚀阈值和裂纹阈值,选择激光能量密度位于 15~84 J/cm^2 之间进行划切工艺实验。结果表明:脉冲绿激光在划切蓝宝石,切槽深度随着扫描速度的增加而减小,切槽宽度随着扫描速度的增加先增加后减小;随着激光扫描的次数增加,切槽深度和宽度先快速增加后减缓最后趋近饱和;使用水溶性覆层可以有效的减小重凝层,从而减小切槽宽度和激光的热作用区域,提高了划切质量。

4) 采用优化激光划切工艺参数:激光脉冲能量密度为 75 J/cm^2 ,扫描速度 0.6 mm/s,扫描次数 3 次,预置水溶性覆层划切蓝宝石基片,获得深度为 141 μm ,宽度为 20 μm ,深宽比约为 7 的良好切槽。

参 考 文 献

- 1 A Shamir, A A Ishaaya. Large volume ablation of sapphire with ultra-short laser pulses[J]. Applied Surface Science, 2013, 270: 763-766.
- 2 Gao Huiying. The trends and the state of China's LED substrate [J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2011, 40 (7): 1-6.
高慧莹. 国内 LED 衬底材料的应用现状及发展趋势[J]. 电子工业专用设备, 2011, 40(7): 1-6.
- 3 L Torrisi, A Borrielli, D Margarone. Study on the ablation threshold induced by pulsed lasers at different wavelengths[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2007, 255(2): 373-379.
- 4 Li Changqing, Wu Wanliang, Zuo Hongbo, et al.. Analysis of fracture surface for sapphire cut by long pulse laser[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2010, (4): 997-1001.
李长青, 武万良, 左洪波, 等. 长脉冲激光切割蓝宝石的断口分析[J]. 人工晶体学报, 2010, (4): 997-1001.
- 5 J Han, C Li, M Zhang, et al.. An investigation of long pulsed laser induced damage in sapphire [J]. Optics & Laser Technology, 2009, 41(3): 339-344.
- 6 R S Patel, A Tamhankar, T Edwards. Diode-pumped solid-state UV lasers improve LED sapphire wafer scribing[J]. Photonics Spectra, 2010, 44(10): 46-48
- 7 A Tamhankar, R Patel. Optimization of UV laser scribing process for light emitting diode sapphire wafers[J]. Journal of Laser Applications, 2011, 23(3): 032001.
- 8 Huang Huan, Yang Lijun, Wang Maolu, et al.. The experimental research of sapphire dicing by a UV laser [J]. Electromachining & Mould, 2009, (5): 35-38.
黄欢, 杨立军, 王懋露, 等. 紫外激光划切蓝宝石晶圆的试验研究[J]. 电加工与模具, 2009, (5): 35-38.
- 9 Y Dai, G Xu, J Cui, et al.. Laser micro-structuring of sapphire wafer and fiber[C]. SPIE, 2010, 7590: 75900.
- 10 O Uteza, B Bussière, F Canova, et al.. Laser-induced damage threshold of sapphire in nanosecond, picosecond and femtosecond

- regimes[J]. *Applied Surface Science*, 2007, 254(4): 799–803.
- 11 Yang Huan, Huang Shan, Duan Jun, *et al.*. Contrastive study on laser ablation of single-crystal silicon by 1030 nm femtosecond laser and 355 nm nanosecond laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0103003.
杨 焯, 黄 珊, 段 军, 等. 飞秒与纳秒激光刻蚀单晶硅对比研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0103003.
- 12 M V Allmen, A Blatter. *Laser-Beam Interactions with Materials* [M]. Berlin: Springer, 1995.
- 13 H S Carslaw, J C Jaeger. *Conduction of Heat in Solids* [M]. Oxford: Oxford University Press, 1959.
- 14 Rothenberg Joshua E, Koren Gad. Laser produced plasma in crystalline α - Al_2O_3 and aluminum metal[J]. *Appl Phys Lett*, 1984, 44(7): 664–666.
- 15 D M Zhang, X Y Tan, Z H Li, *et al.*. Thermal regime and effect studying on the ablation process of thin films prepared by nanosecond pulsed laser[J]. *Physica B*, 2005, 357(3): 348–55.
- 16 Q M Lu, S Mao, X Mao. Delayed phase explosion during high power nanosecond laser ablation of silicon[J]. *Appl Phys Lett*, 2001, 80(17): 3072–3074.
- 17 D Ashkenasi, A Rosenfeld, H Varel, *et al.*. Laser processing of sapphire with picosecond and sub-picosecond pulses [J]. *Appl Surf Sci*, 1997, 120(1-2): 65–80.
- 18 Li Weite, Huang Baohai. *Theoretical Analysis and Application of Thermal Stress* [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004. 64–65.
李维特, 黄保海. *热应力理论分析及应用* [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004. 64–65.

栏目编辑: 宋梅梅