

文章编号: 1001-3806(2010)05-0636-04

基于157nm深紫外激光的蓝宝石基片微加工

白帆, 戴玉堂*, 徐刚, 崔建磊

(武汉理工大学 光纤传感技术国家工程实验室, 武汉 430070)

摘要: 为了探索157nm深紫外激光对蓝宝石材料的微加工技术, 采用157nm激光微加工系统, 对蓝宝石基片进行了扫描刻蚀和打孔加工, 以研究激光工艺参量与刻蚀深度、表面形貌的关系, 分析了157nm深紫外激光对蓝宝石材料的作用机理, 并利用扫描刻蚀法在蓝宝石基片上加工了一个2维图形。由实验结果可知, 157nm深紫外激光作用于蓝宝石材料是一个光化学作用与光热作用并存的加工过程, 适合扫描刻蚀的加工参量为能量密度 $3.2\text{J}/\text{cm}^2$, 重复频率 $10\text{Hz} \sim 20\text{Hz}$, 扫描速率 $0.15\text{mm}/\text{min}$; 在能量密度 $2.5\text{J}/\text{cm}^2$ 下的刻蚀率为 $0.039\mu\text{m}/\text{pulse}$ 。结果表明, 通过对激光重复频率和扫描速度的控制可实现蓝宝石材料的精细微加工。

关键词: 激光技术; 157nm深紫外激光; 扫描刻蚀; 打孔; 微加工; 蓝宝石基片

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2010.05.016

Micromachining technology of sapphire substrate based on 157nm DUV laser

BAI Fan, DAI Yu-tang, XU Gang, CUI Jian-lei

(Key Laboratory of Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to probe micromachining technology of sapphire material, the ablation characteristics of 157nm deep ultraviolet laser were studied. The effect of laser process parameters on etching efficiency and surface quality was studied by scanning ablation and drilling on sapphire substrate. Moreover, the etching mechanism of 157nm laser on sapphire was analyzed. And then, a 2-D pattern was ablated onto the sapphire substrate by scanning approach. Both analysis and experimental results indicate that micromachining process that 157nm deep ultraviolet laser reacts on sapphire includes photochemical reactions and photothermolysis, and that a set of proper parameters about scanning etching were obtained, i. e., scanning velocity at $0.15\text{mm}/\text{min}$ with fluence of $3.2\text{J}/\text{cm}^2$, repetition frequency at $10\text{Hz} \sim 20\text{Hz}$; etching rate of drilling at $0.039\mu\text{m}/\text{pulse}$ with fluence of $2.5\text{J}/\text{cm}^2$. Precise micromachining could be realized under control of laser repetition rate and scanning velocity.

Key words: laser technique; 157nm deep ultraviolet laser; laser scanning ablation; drilling; micromachining; sapphire substrate

引言

蓝宝石($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)熔点高(2040°C)、硬度大、化学稳定性好,是一种集优良光学性能、物理性能和化学性能于一体的多功能氧化物晶体,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]。然而蓝宝石硬度高(莫氏9.5,仅次于莫氏10的金刚石)、脆性大,所以一般的化学加工和机械加工都十分困难。到目前为止,有关蓝宝石材料的刻蚀方法有很多种,例如反应离子刻蚀(reactive ion etching, RIE)、电子回旋共振离子刻蚀(electron cyclotron reso-

nance plasma etching, ECR)、诱导等离子体刻蚀(inductively coupled plasma, ICP)等都有研究报道。这些方法最大特点是加工图形两壁具有较好的垂直度,但是底部粗糙,且刻蚀效率较低^[2];而激光加工技术具有非接触、应用范围广、灵活度高等特点,适用于硬脆性材料的微加工。许多国内外学者对Nd:YAG激光和飞秒激光刻蚀蓝宝石材料进行过研究。Nd:YAG激光刻蚀蓝宝石,热效应较为明显;飞秒激光聚焦蓝宝石表面,进行多脉冲刻蚀,在作用区域周围形成无规则的纳米晶体形态和纳米裂纹,并在表面形成波纹^[3]。157nm深紫外激光光子能量高(约 7.9eV),可直接击断超硬半导体材料的原子结合键,且热效应小、精度高、刻蚀效率高,非常适合于硬脆材料的精细微加工^[4];目前,157nm激光应用研究在世界范围内才刚刚起步,有关157nm激光对蓝宝石材料的微加工技术还处于空白状态。本文中利用157nm激光加工平台,研究蓝宝石材料的微加工工艺,探索157nm激光与蓝宝

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50775169; 60537050)

作者简介:白帆(1985-),男,硕士研究生,主要从事157nm激光与蓝宝石材料作用的研究。

*通讯联系人。E-mail: daiyt68@163.com

收稿日期:2009-08-15;收到修改稿日期:2009-09-10

石材料的作用机理。

1 实验

本实验中采用的设备是英国 Exitech 生产的 M2000 双激光(355nm 和 157nm)微加工系统,157nm 激光器是由德国 Tui Laser 公司生产,型号为 M-100。157nm 激光器的输出功率为 1.5W,单脉冲能量达 25mJ,脉宽约 20ns,重复频率范围 1Hz ~ 100Hz,到达工作台表面的能量密度约 3J/cm² ~ 5J/cm²。矩形光斑的大小由光阑控制,最小为 1μm × 1μm,最大为 150μm × 150μm,另外,可以安放掩模板。

1.1 扫描刻蚀

本研究中采用的是 157nm 激光微加工系统,在蓝宝石基片上扫描 4 × 3 阵列的微槽,用体积分数为 0.02 的 HF 酸溶液在超声波清洗机中清洗后,用扫描电镜观察图形形貌,再用台阶仪测量槽的刻蚀深度。目的是探讨在能量密度一定的扫描刻蚀下,激光参量对蓝宝石刻蚀深度和图形形貌的影响。加工参量如下:激光脉宽 20ns,能量密度约 3.2 J/cm²,光斑 20μm × 20μm,重复频率为 5Hz ~ 30Hz,扫描速率为 0.05mm/min ~ 0.2mm/min;扫描长度为 110μm。

图 1 为 157nm 激光在蓝宝石基片上扫描的微槽,

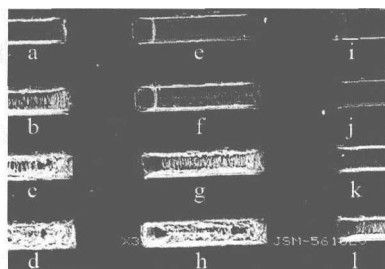


Fig. 1 Image of channel array on sapphire substrate

a ~ d—v = 0.05mm/min, f = 5Hz ~ 30Hz e ~ h—v = 0.1mm/min, f = 5Hz ~ 30Hz i ~ l—v = 0.2mm/min, f = 5Hz ~ 30Hz

观察图形形貌可知,激光的重复频率和扫描速率对蓝宝石的图形形貌有很大的影响,其中重复频率的影响尤为明显。以图 1e ~ 图 1h 为例,在扫描速率 0.1mm/min 下刻蚀的 4 条微槽,随着重复频率增大,呈现出来的加工表面越来越粗糙。在扫描速率 0.05mm/min 和 0.2mm/min 得到的结果也是如此。这是因为重复频率的增大,使蓝宝石在单位时间内与 157nm 激光作用的次数增多,从而形成更多的加工残骸,导致加工表面更粗糙。

图 2 中描述了加工参量与刻蚀深度的关系。结合图 1 和图 2 可知,重复频率越大,扫描速率越低,刻蚀深度就越大,加工图形越粗糙;反之,重复频率越小,扫描速率越高,刻蚀深度就越小,加工图形越平滑。从曲线趋势上看,在 5Hz ~ 10Hz 阶段,扫描速率 0.05mm/min

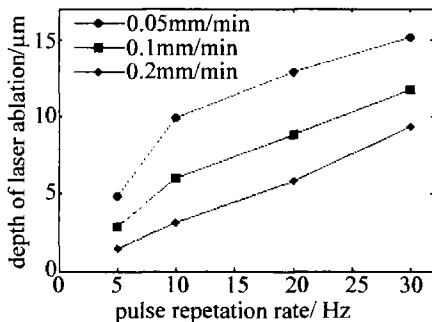


Fig. 2 Relation between pulse repetition rate and etching depth

的刻蚀深度变化较大,去除效果明显;另外,随着扫描速率的增大,刻蚀深度的变化减小。这是由于光斑的重叠率减小造成的。当速率增大到一定值后,相邻脉冲分离,脉冲间的影响微小到可以忽略不计^[5]。在 10Hz ~ 30Hz 阶段,脉冲频率与扫描刻蚀深度保持较好的线性关系。

在 157nm 激光对蓝宝石基片的扫描刻蚀中,为了保证扫描表面的平滑,同时又兼顾刻蚀效率,在能量密度约 3.2J/cm² 的情况下,可以把重复频率控制在 10Hz ~ 20Hz,扫描速率为 0.15mm/min。

1.2 打孔

为了探讨能量密度一定时脉冲数与刻蚀深度的关系,利用 157nm 准分子激光,在蓝宝石基片上刻蚀了一系列微孔。加工参量设定为:能量密度约 2.5J/cm²,光斑 50μm × 50μm,脉冲频率 1Hz,脉冲数范围 5 ~ 150。刻蚀完成后,用 HF 酸溶液(体积分数约为 0.02)在超声波清洗器中进行 8min 清洗,再用台阶仪测量了孔的刻蚀深度。加工得到的刻蚀深度数据见图 3。

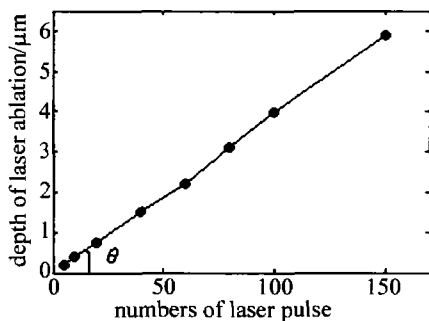


Fig. 3 The relation between number of laser pulses and etching depth

BRANNON 等人从光化学过程的角度出发,在光吸收和材料刻蚀的基础上,运用比尔法则得到了刻蚀率计算公式:

$$F = (1/\alpha) \ln(E/E_0) \tag{1}$$

式中, F 为刻蚀率; α 为材料的有效吸收系数; E 为激光能量密度, E₀ 为材料在相应激光波长下的刻蚀阈值^[6]。对于实验中使用的蓝宝石材料,在 157nm 激光下刻蚀的有关参量为:有效吸收系数 α ≈ 1.1 ×

10^5 cm^{-1} , 刻蚀阈值 $E_0 \approx 1.5 \text{ J/cm}^2$ 。通过计算, 在能量密度为 2.5 J/cm^2 时, 每个脉冲的刻蚀深度约 46 nm 。

从图 3 中可以看出, 脉冲数与刻蚀深度保持较好的线性关系, 拟合直线方程为:

$$D = 0.039 \times N; \tan\theta \approx 0.039 \quad (2)$$

式中, D 表示刻蚀深度, 单位为 nm , N 表示脉冲数, 斜率 $\tan\theta$ 就是对应于能量密度 2.5 J/cm^2 情况下的刻蚀速率, 约 $0.039 \mu\text{m/pulse}$, 与(1)式计算的理论值较为接近。

2 蓝宝石基片图形加工

对于在 100 nm 级的激光加工中, 157 nm 激光的波长是非常受关注的, 并且扩展到作为下一代低于 100 nm 级半导体的光刻工具。F₂-Laser 能刻蚀深度精确至 10 nm 的平滑表面, 且不会像长波长激光作用产生微裂纹^[7]。如图 4 所示, 157 nm 激光在蓝宝石基片

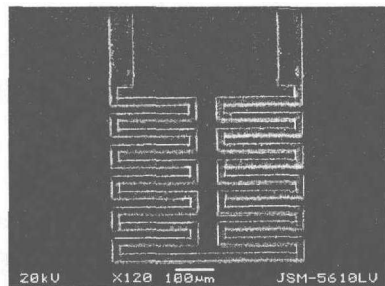


Fig. 4 2-D image ablated by 157 nm laser

上扫描了一个 2 维图形, 图形的线条规则, 棱角清晰, 无微裂纹。加工参量如下: 能量密度约 2.1 J/cm^2 , 光斑 $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$, 重复率 16 Hz , 扫描速率 0.15 mm/min 。图 4 表明, 157 nm 深紫外激光相比其它紫外激光而言, 具有更好的图形刻蚀能力。因此, 157 nm 深紫外激光微加工技术有望得到更广泛的应用, 如目前微光器件的结构、光学衍射元件、平面或 3 维的微电路等。

3 机理分析

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 $E_g \approx 8.8 \text{ eV}$ (相当于波长等于 302 nm 的激光辐射)^[8], $\text{Al}-\text{O}$ 键的键能约 585 kJ/mol , 即 6.063 eV 。据文献报道, 对于波长 $193 \text{ nm} \sim 355 \text{ nm}$ 的激光, 蓝宝石的破坏阈值较低^[9-11]。和 $193 \text{ nm} \sim 355 \text{ nm}$ 的激光相比, 157 nm 激光波长更短, 单光子能量更高, 更容易刻蚀蓝宝石材料。从图 1 中看出, 刻蚀深度较浅的槽, 底部光滑平整, 槽壁垂直度好, 几乎没有热影响的区域。所以 157 nm 激光作用于蓝宝石材料, 在刻蚀深度较浅的情况下, 主要损伤机理是 157 nm 激光直接击断蓝宝石晶体的化学键, 产生光化学反应。其反应过程见图 5。

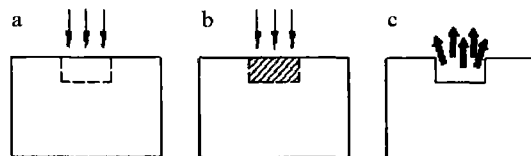


Fig. 5 a—photo absorption b—break the chemical bonds c—particles sputtering

首先蓝宝石在激光作用区域内吸收激光能量, 见图 5a; 其次在脉宽 (20 ns) 内该区域的化学键断裂, 有气态物质和较小的固态微粒生成, 见图 5b; 最后由于体积急剧膨胀导致微粒和气态物质喷出, 见图 5c。

但是随着刻蚀深度的增加, 底部变得越来越粗糙, 槽壁出现明显的锥度, 观察槽的边缘和底部, 熔融的痕迹越来越明显, 这说明随着刻蚀深度的增加, 光热作用逐渐占据了主导地位。

分析认为, 在 157 nm 激光与蓝宝石材料作用的过程中, 蓝宝石吸收激光的光子能量, 一部分光子被吸收后直接打断蓝宝石的化学键, 一部分以热能形式沉积, 这两种吸收能量的过程同时存在。在刚开始加工的时候, 光化学过程起到主导作用, 这还与热量积累不多及浅表面相对散热较快有关; 随着刻蚀深度的增大, 由于离焦量的变化和飞溅的、底部沉积的碎屑对能量的吸收, 导致到达加工位置的能量减小, 当能量不足以破坏蓝宝石的化学键时, 能量就以热能的形式在槽壁和底部沉积, 此时的损伤主要是由材料被加热熔融直至气化引起的, 即蓝宝石吸收 157 nm 光子后, 也将引起电子向高能级的跃迁, 但由于跃迁没有达到蓝宝石的解离阈值, 跃迁电子将经历某些中间状态而返回, 最后重新终止于基态, 在这一过程中尽管也有可能使物质分解, 但大多数并无化学反应, 所以光热过程起到主导作用。

此外, 激光作用时的高温蒸气会急剧膨胀而产生巨大的压力, 此时, 如果刻蚀位置附近还有熔融状态的蓝宝石材料没有蒸发, 在强大的蒸气压力下熔融蓝宝石材料会向四处飞溅从而形成加工残骸和缺陷, 所以导致加工区域的凹凸不平^[12]。另外, 刻蚀较深的槽内和四壁出现白亮的物质, 作者分析这种物质可能是光解后的铝单质。

4 结论

通过 157 nm 激光对蓝宝石材料的扫描刻蚀和打孔实验, 提出这是一个光化学作用与光热作用并存的加工过程。在刻蚀深度较浅的范围内, 损伤机理主要以光化学作用起主导地位; 随着刻蚀深度的增加, 损伤机理以光热作用起主导地位。

(1) 157 nm 激光对蓝宝石基片的扫描刻蚀, 在激

光能量密度 $3.2\text{J}/\text{cm}^2$ 的情况下,研究了重复频率和扫描速度对刻蚀深度的影响,并得到一组适合扫描加工的参量范围:重复率 $10\text{Hz} \sim 20\text{Hz}$,扫描速率 $0.15\text{mm}/\text{min}$ 。为 157nm 激光对蓝宝石材料的2维和3维图形微加工提供了技术支持。

(2) 157nm 激光对蓝宝石基片打孔,在激光能量密度 $2.5\text{J}/\text{cm}^2$ 的情况下,150个脉冲内,脉冲数与刻蚀深度保持较好的线性关系,且刻蚀速率约 $0.039\mu\text{m}/\text{pulse}$ 。

参 考 文 献

- [1] ZHANG K C, ZHANG L. Science and technique of crystal growing [M]. Beijing: Science Press, 2003:370(in Chinese).
- [2] HSU Y P, CHANG S J, SU Y K, *et al.* ICP etching of sapphire substrates [J]. Optical Materials, 2005, 27(6): 1171-1174.
- [3] JUODKAZIS S, NISHIMURA K, MISAWAW H, *et al.* In-bulk and surfaces structuring of sapphire by femtosecond pulses [J]. Applied Surface Science, 2007, 253(15): 6539-6544.
- [4] DAI Y T, XU G, LI W L, *et al.* Laser micromachining of wide band-gap materials[J]. Advanced Materials Research, 2009, 69/70: 118-122.
- [5] GU E, JEON C W, CHOI H W, *et al.* Micromachining and dicing of

sapphire, gallium nitride and micro LED devices with UV copper vapour laser[J]. Thin Solid Films, 2004, 453/454: 462-466.

- [6] ZUO T C. Advanted produce-laser technique and engineering [M]. Beijing: Science Press, 2007: 370-371(in Chinese).
- [7] HERMAN P R, BECKLEY K, POTYRAILO R A. VUV holographic gratings etched by a single F_2 laser pulse[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics. Anaheim, CA: Optical Society of America, 1994: CF12.
- [8] UTEZA O, BUSSIERE B, CANOVA F, *et al.* Laser-induced damage threshold of sapphire in nanosecond, picosecond and femtosecond regimes[J]. Applied Surface Science, 2007, 254(4): 799-803.
- [9] KIM K, BENTE E. Femtosecond laser micromachining of sapphire [C]//Laser and Electro-Optics Society, 2001. The 14th Annual Meeting of the IEEE. San Diego, CA: IEEE, 2001: 762-763.
- [10] HORISAWA H, EMURA H, YASUNAGA N, *et al.* Surface machining characteristics of sapphire with fifth harmonic YAG laser pulses [J]. Vacuum, 2004, 73(3/4): 661-666.
- [11] DYER P E, JAEKSON S R, KEY P H, *et al.* Excimer laser ablation and film deposition of Ti:sapphire [J]. Applied Surface Science, 1996, 96/98: 849-854.
- [12] DENG H Y, RAO Y J, RAND Z L, *et al.* Photonic crystal fiber based Fabry-Pérot sensor fabricated by using 157nm laser micromachining[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(2): 255-258(in Chinese).

(上接第635页)

接率、功率密度和激光脉宽,不但表面残余压应力增加,而且残余压应力层深度 L_p 也随着增加,但当脉宽增加到一定值时,搭接区表面残余压应力达到最大值,继续增加会导致搭接区表面残余压应力的降低,搭接率增加到一定程度时,继续增加会导致残余压应力层深度的降低。

参 考 文 献

- [1] ZHANG W W, YAO Y L. Micro scale laser shock processing of metallic components[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2002, 124(2): 369-378.
- [2] YU Z L, GAO Ch Y, ZENG D Y, *et al.* Study of the surface qualities of laser shock processing zones using an artificial neural network[J]. Laser Technology, 2001, 25(1): 1-6(in Chinese).
- [3] WANG F, YAO Zh Q. Experimental research of laser shock processing brass[J]. Laser Technology, 2006, 30(5): 511-513(in Chinese).
- [4] LEI C S C, DAVIS A, LEE E W. Effect of BSTOA and mill anneal on the mechanical properties of Ti_6Al_4V castings[J]. Advanced Ma-

terials & Processes, 2000, 157(5): 75-77.

- [5] ZHANG G M, YU C, SHI R C, *et al.* Experimental study on the milling of thin parts of titanium alloy(TC4)[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 138(1/3): 489-493.
- [6] ZHANG Y K, GE T, LU J Z. Experimental study of laser shock processing on critical section of flying hammer[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2005, 26(5): 369-371(in Chinese).
- [7] HU Y X. Research on the numerical simulation and impact effects of laser shock processing[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008: 84-89(in Chinese).
- [8] FAN Y, WANG Y, VUKELIC S, *et al.* Wave-solid interactions in laser-shock-induced deformation processes [J]. Journal of Applied Physics, 2005, 98(10): 104904-104915.
- [9] CHEN R F, SANG Y, WU J W, *et al.* Experiment and numerical simulation of laser shock processing in 7050 aluminum alloy [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2009, 30(2): 113-117(in Chinese).
- [10] PEYRE P, FABBRO R. Laser shock processing: a review of the physics and applications[J]. Opt & Quant Electron, 1995, 27(12): 1213-1229.