

## 355 nm 全固态紫外纳秒激光加工蓝宝石通孔研究

马野<sup>1</sup>, 雷程<sup>1\*</sup>, 梁庭<sup>1\*\*</sup>, 冀鹏飞<sup>1</sup>, 刘雨桥<sup>1</sup>, 王丙寅<sup>2</sup>, 陈国锋<sup>2</sup><sup>1</sup>中北大学省部共建动态测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051;<sup>2</sup>内蒙古动力机械研究所, 内蒙古 呼和浩特 010010

**摘要** 采用 355 nm 全固态紫外纳秒脉冲激光器对蓝宝石( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )进行打孔实验。通过控制变量法,对蓝宝石样品进行了打孔加工,研究了激光能量密度、重复频率和扫描速度对蓝宝石通孔质量的影响。实验结果表明,通孔边缘熔融物堆积形成的重凝区随着激光单脉冲能量的升高而减小,但是激光能量过高时,通孔附近出现沉积物,影响通孔的质量;通孔边缘的重凝区随着激光重复频率的降低而减小;通孔附近的沉积物随着激光扫描速度的降低而减少,但是速度过低时,激光脉冲的重叠率过高,导致高斯激光外围孵化效应明显,且其能量不足以使材料气化,因此扫描速度过小时孔道边缘再次出现熔融物堆积形成的重凝区。研究结果表明,采用纳秒脉冲激光加工高质量蓝宝石微通孔是可行的。

**关键词** 激光技术; 蓝宝石通孔; 控制变量法; 全固态紫外纳秒激光; 激光烧蚀

中图分类号 TN305 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221348

## 1 引言

蓝宝石晶体在耐高温、电绝缘、耐磨蚀、导热性等各方面都有良好的表现,因此被广泛用于电子、航空航天和国防等领域,是制备高温压力传感器芯片的常用材料<sup>[1-3]</sup>。特别是在全蓝宝石光纤法布里-珀罗腔高温压力传感器的制造过程中,需要对蓝宝石基座进行打孔加工,且通孔的质量是保证光纤可以垂直插入实现光信号有效传输的重要因素<sup>[4]</sup>。

然而蓝宝石硬度高、脆性大,很难用传统的机械或化学方法进行加工<sup>[5-6]</sup>。激光加工技术具有非接触、无需掩模、工艺简单等特点,适用于硬脆性材料的微加工<sup>[7-9]</sup>。目前,激光烧蚀蓝宝石的方法主要包括超短脉冲激光加工<sup>[10]</sup>和短脉冲紫外激光加工<sup>[11]</sup>。超短脉冲激光的脉冲持续时间短,加工过程中热效应影响小,因此引起了研究人员的广泛关注<sup>[12-13]</sup>。Mishchik 等<sup>[14]</sup>利用波长为 1030 nm、脉冲时间为 300 fs 的超短脉冲激光,在 300  $\mu\text{m}$  厚的蓝宝石样品上进行打孔加工,通孔直径为 1 mm,且锥度小于 3°。Lott 等<sup>[15]</sup>利用波长为 1030 nm 和脉冲持续时间为 0.8 ps 的超短脉冲激光,在 430  $\mu\text{m}$  厚的蓝宝石上进行打孔加工,获得了锥度小于 5°、直径为 400  $\mu\text{m}$  的微通孔。然而,超短脉冲激光器的成本高,加工效率低,不适用于大规模工业生产<sup>[16-17]</sup>。短脉冲激光中的全固态紫外纳秒激光具有成本低、稳定性

好的特点,被广泛用于工业生产,但是已报道的关于紫外纳秒激光加工蓝宝石的研究主要集中在激光与材料的作用机理以及表面沟道的烧蚀方面<sup>[18]</sup>,目前关于利用 355 nm 全固态紫外纳秒激光在蓝宝石上成功打孔的研究鲜有报道。

为此,我们在紫外纳秒激光器的不同处理条件下,对蓝宝石进行打孔实验,并通过通孔的形貌对纳秒激光烧蚀蓝宝石的机理进行分析,实验采用波长为 355 nm 的紫外纳秒激光光源。本研究的目的是根据激光能量密度、激光重复频率、激光扫描速度来定义打孔的参数空间。其目标是在厚度为 500  $\mu\text{m}$  的蓝宝石上加工无缺口、无重凝物或其他损伤的通孔,其直径约为 200  $\mu\text{m}$ ,锥度小于 5°。研究结果为加工蓝宝石内部结构和切割蓝宝石提供了低成本、高效率的新途径。

## 2 实验设计

## 2.1 实验材料

本文所用蓝宝石晶圆直径为 5.08 cm,厚度为 500  $\mu\text{m}$ 。实验前将蓝宝石晶圆放入无水乙醇中超声清洗 5 min,以去除蓝宝石表面的杂质,避免对激光加工结果产生影响。取出后用去离子水冲洗并吹干,将其固定在三维位移平台上进行加工。

## 2.2 实验设备

实验采用苏州德龙激光公司生产的紫外精密加

收稿日期: 2022-10-21; 修回日期: 2022-11-07; 录用日期: 2022-11-15; 网络首发日期: 2022-11-21

基金项目: 山西省重点研发计划项目(202102030201001, 202102030201009)、中央引导地方科技发展资金(YDZX20201400001664)

通信作者: \*leicheng@nuc.edu.cn; \*\*liangtingnuc@nuc.edu.cn

工设备,包含全固态紫外纳秒激光器、光路系统、机械加工平台、影像系统、除尘及水冷等辅助装置,如图 1 所示。其中,系统核心装置全固态紫外纳秒激光器的主要技术参数如表 1 所示。从激光器中射出的激光经过扩束镜后,光束直径增大,光束的发散角减小,进而

高斯光束的聚焦效果得到改善,加工质量得到优化;放大的激光光束经过反射镜后改变传播路径,入射聚焦透镜,调整聚焦透镜可将光束聚焦于材料表面;通过三维精密位移平台可保持光束焦点一直保持在所加工材料的表面,并加工出所需图形结构。

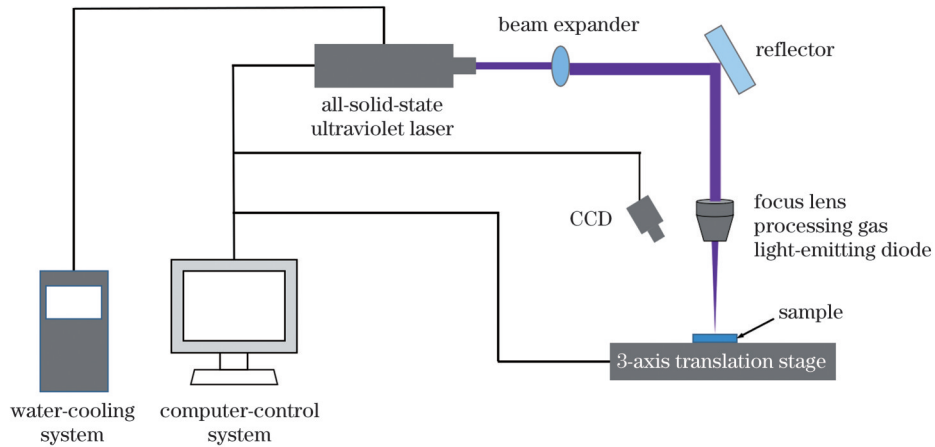


图 1 紫外微加工系统示意图  
Fig. 1 Schematic of ultraviolet micro machining system

表 1 紫外激光器主要技术参数  
Table 1 Main technical parameters of ultraviolet laser

Laser parameter	Value
Wavelength	355 nm
Pulse width	10–25 ns
Frequency	20–100 kHz
Power	0–300 $\mu$ J
Spot mode	TEM <sub>00</sub> (quality factor $M^2 < 1.3$ )

实验过程中使用的激光光斑直径为 30  $\mu$ m。实验完成后,本文使用激光共聚焦显微镜对刻蚀后的样品表面进行初步观察,直至得到表面形貌良好的微通孔。使用场发射扫描电子显微镜(SEM)表征不同参数条

件下刻蚀微通孔的表面形貌及截面形貌,并分析产生对应结果的机理。

### 2.3 实验方法

激光打孔通常分为冲击打孔、旋切打孔和螺旋打孔<sup>[19]</sup>。如图 2(a)所示,冲击打孔是使功率密度很高的短脉冲激光作用在材料的一点以实现微孔的加工。这种方法虽然可以加工更小的通孔,但是激光能量集中在一点容易对通孔侧壁产生损伤,且高压蒸气将熔融物挤压至孔壁,使通孔的锥度过大,这在微纳传感器的制造中是不可以接受的。图 2(b)所示的旋切打孔要先用冲击方式生成孔眼,然后激光在工件上方几个越来越大的环形轨道中移动,将初始孔扩大。在这个过程中,绝大部分的工件材料熔体从孔眼中向下推出,

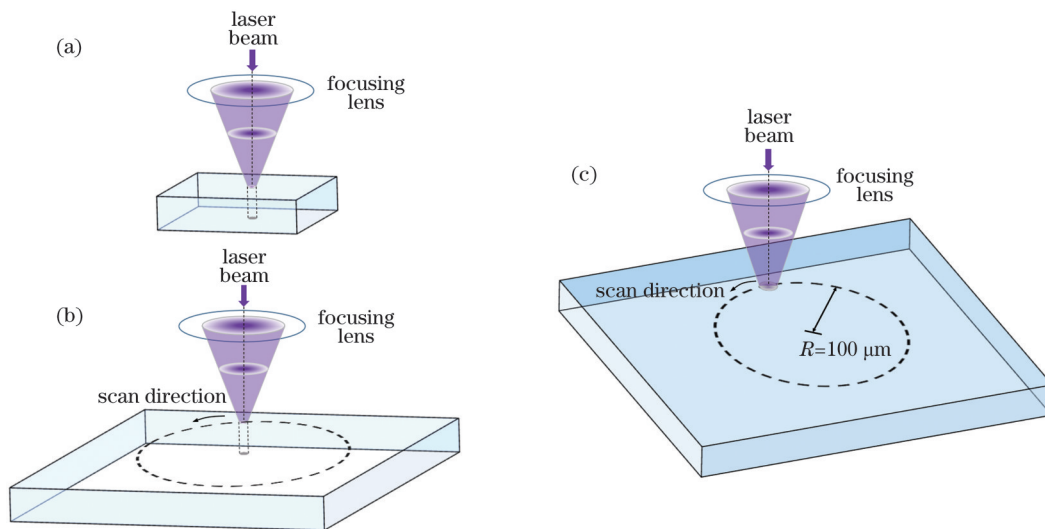


图 2 激光加工示意图。(a)冲击打孔;(b)旋切打孔;(c)螺旋打孔  
Fig. 2 Schematics of laser machining. (a) Shock drilling; (b) rotary cutting and drilling; (c) spiral drilling

可提高通孔质量。螺旋打孔不需要生成初始孔,如图 2(c)所示,激光在工件上方的环形轨道中移动,在这个过程中控制 Z 轴不断移动,使激光逐层去除材料,达到加工微孔的目的,因此所需的功率密度要小很多,形成的通孔的质量也更高。本实验中选择螺旋打孔的方式进行微孔加工,加工过程中会有蓝宝石颗粒附着在样品表面。为了不影响实验结果,将加工后的样品在无水乙醇中超声清洗 5 min,取出用去离子水冲洗并吹干,转移至表征区进行观测。通过控制变量法寻找激光能量密度、激光重复频率和激光扫描速度的最佳参数组合。

### 3 分析与讨论

实验采用控制变量法研究激光能量密度、重复频率和扫描速度对蓝宝石通孔质量的影响。实验前,应该调整光路确定聚焦条件,确定焦点位置。确定好聚焦条件后,就可以调整加工系统的参数,分析不同条件对实验结果的影响。

加工后,将样品清洗吹干,评估刻蚀质量。我们注意的是孔表面的形貌和孔的锥度。锥度表达式为

$$\omega = \arctan\left[\frac{d_{\text{top}} - d_{\text{bottom}}}{2t}\right], \quad (1)$$

式中: $\omega$ 为通孔直径; $d_{\text{top}}$ 为通孔上表面直径; $d_{\text{bottom}}$ 为通

孔下表面直径; $t$ 为样品的厚度。我们在保持聚焦条件相同的条件下,通过控制变量法对蓝宝石样品进行了处理,并确定了获得高质量微通孔的参数范围。

#### 3.1 激光能量密度对通孔质量的影响

在控制重复频率为 30 kHz 和扫描速度为 0.6 mm/s 的条件下,改变激光的能量,使激光的聚焦光斑从蓝宝石样品的上表面开始沿设定好的圆形路径扫描。当加工开始时,聚焦光斑沿着 Z 轴以恒定的进给距离向下平移,单次进给距离在样品材料厚度一定的情况下与扫描的次数有关。当聚焦光斑到达蓝宝石样片的下表面时,沿着 Z 轴的运动就停止了。如果此时尚未完成打孔,可换位置增加扫描次数重新打孔,直至完成打孔。

图 3(a)显示了通孔表面的 SEM 图像,可以清晰看到通孔侧壁熔融物形成的重凝区及在烧蚀过程中溅射形成的沉积区。为了更直观区分各区的特征,我们通过激光共聚焦显微镜对通孔进行了三维扫描。图 3(b)为通孔整体的 3D 图像,重凝区的高度非常突出,进而我们对孔壁及外围区域进行了扫描,如图 3(c)所示,重凝区和沉积区的高度差十分明显。图 3(d)显示了局部沉积区的 3D 图像,沉积物密集且整体高度均匀。通孔的 3D 图像证明了 SEM 图像中重凝区和沉积区对应的明暗关系。

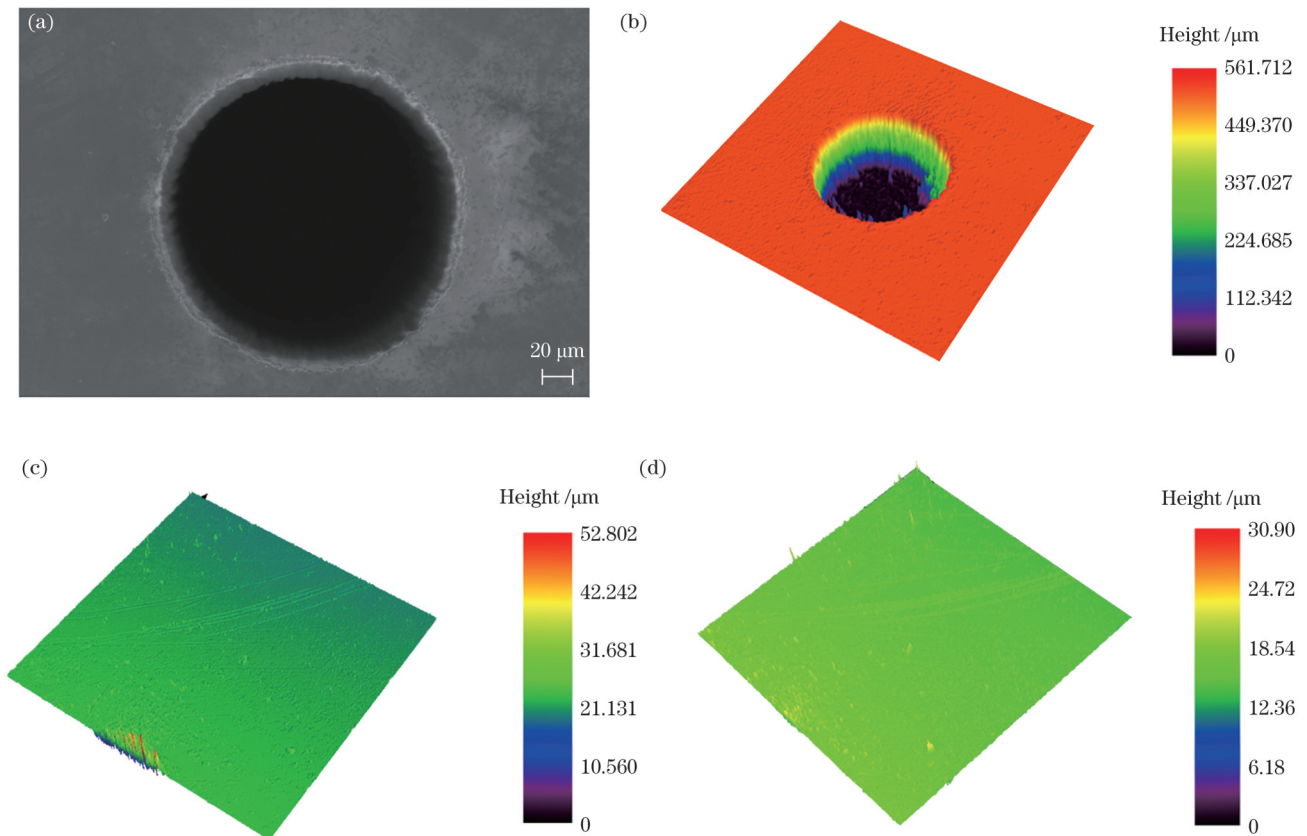


图 3 通孔 SEM 和 3D 图像。(a)通孔表面的 SEM 图像;(b)通孔表面、(c)重凝区和(d)沉积区的 3D 图像  
Fig. 3 SEM and 3D images of through-hole. (a) SEM image of through-hole surface; 3D images of (b) through-hole surface, (c) re-solidifying zone, and (d) sedimentary area

图 4(a)~(b)分别显示了激光能量密度为 27.68、29.57、31.12、32.59 J/cm<sup>2</sup>时,加工的蓝宝石微通孔表面形貌 SEM 图。当激光扫描能量密度为 27.68 J/cm<sup>2</sup>时,微通孔边缘形成了明显的重凝区,如图 4(a)所示。此时,激光能量密度相对较低,烧蚀过程以热作用为主<sup>[20]</sup>。在加工过程中,激光将光子能量传递给电子,电子的能量耦合给晶格,光子能转化为热能,导致激光辐射位置的温度迅速升高,局部高温使得扫描路径上的材料以熔化和气化喷射的方式被去除。但是,较低的激光的能量密度导致大部分蓝宝石材料熔化,而蓝宝石材料气化的量相对较少,蓝宝石蒸气将熔融态的蓝宝石材料挤压至通孔边缘排出。随着激光在扫描路径上逐层地去除材料,熔融态的蓝宝石材料最终在微通孔的边缘形成了明显的重凝区。

由图 4(b)可以发现,微通孔边缘固化的熔融物基本消失。同时,在微通孔边缘附近出现了小面积的沉积层。随着激光能量密度的增加,热作用加剧,

大量的蓝宝石材料被气化,然而此时蓝宝石蒸气的压力还不够大,在重力的作用下一部分溅射物来不及被压缩空气吹除便在通孔附近形成了沉积。随着气化加剧,局部的压强增加,高压携带的熔融物沉积物在压缩空气的作用下形成的沉积区更大,如图 4(c)所示,微通孔边缘的重凝区完全消失,而通孔边缘一侧是原始区,另一侧便是在压缩空气的作用下形成的沉积区。随着激光能量继续升高,激光作用在材料表面的区域会出现高温液体。如果这种高温液态材料被高能激光照射,它将变得极不稳定。此时,液态蓝宝石内部开始大量成核,进而导致激光照射区压力突然升高,引起液相爆炸,蓝宝石材料会以液态和蒸气的形式喷射出孔外<sup>[21]</sup>。如图 4(d)所示,喷射出的蓝宝石材料在孔道边缘附近降温重新凝聚,形成 SEM 图像中更大的沉积区。为了得到表面质量良好的微通孔,能量密度选择 31.12 J/cm<sup>2</sup>,并通过优化其他工艺参数进一步提高蓝宝石微通孔的质量。

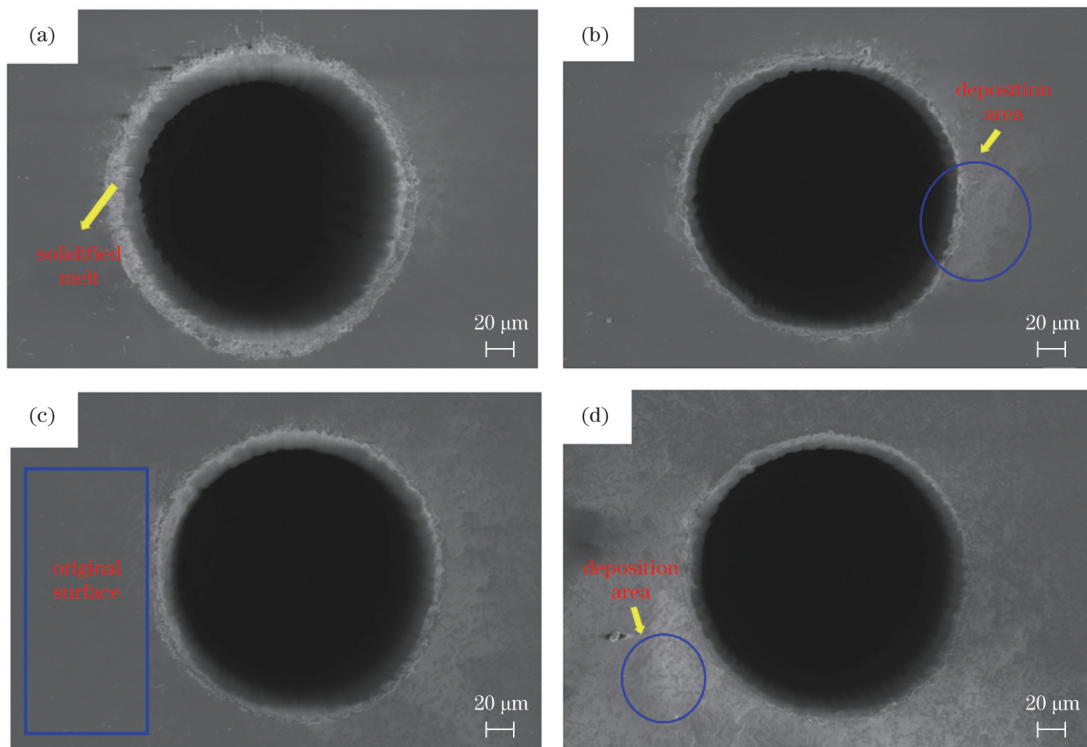


图 4 不同能量密度下加工的通孔 SEM 图。(a)27.68 J/cm<sup>2</sup>; (b)29.57 J/cm<sup>2</sup>; (c)31.12 J/cm<sup>2</sup>; (d)32.59 J/cm<sup>2</sup>

Fig. 4 SEM images of through-holes processed under different energy densities. (a) 27.68 J/cm<sup>2</sup>; (b) 29.57 J/cm<sup>2</sup>; (c) 31.12 J/cm<sup>2</sup>; (d) 32.59 J/cm<sup>2</sup>

### 3.2 激光频率对通孔质量的影响

在激光的扫描速度为 0.6 mm/s 的条件下,设置不同的激光能量密度和激光重复频率进行打孔实验,如图 5 所示。每一列通孔的能量密度相同,激光的重复频率从上到下增加。每一列通孔随着激光频率的增加,其边缘堆积的重凝的熔融态蓝宝石材料增加。当激光能量密度为固定值,激光重复频率增大到一定范围时,

打孔过程将无法完成。激光的脉宽与重复频率的对应关系如表 2 所示。当激光的能量密度固定时,随着激光重复频率的增加,激光的单脉冲脉宽增加。激光脉宽的增加导致激光峰值功率降低<sup>[22]</sup>。此时激光的能量主要用于熔化和气化蓝宝石材料,熔融物在压力的作用下被挤压至通孔边缘形成了重凝区。随着激光重复频率继续增加,激光的峰值功率进一步减小。如图 6 所

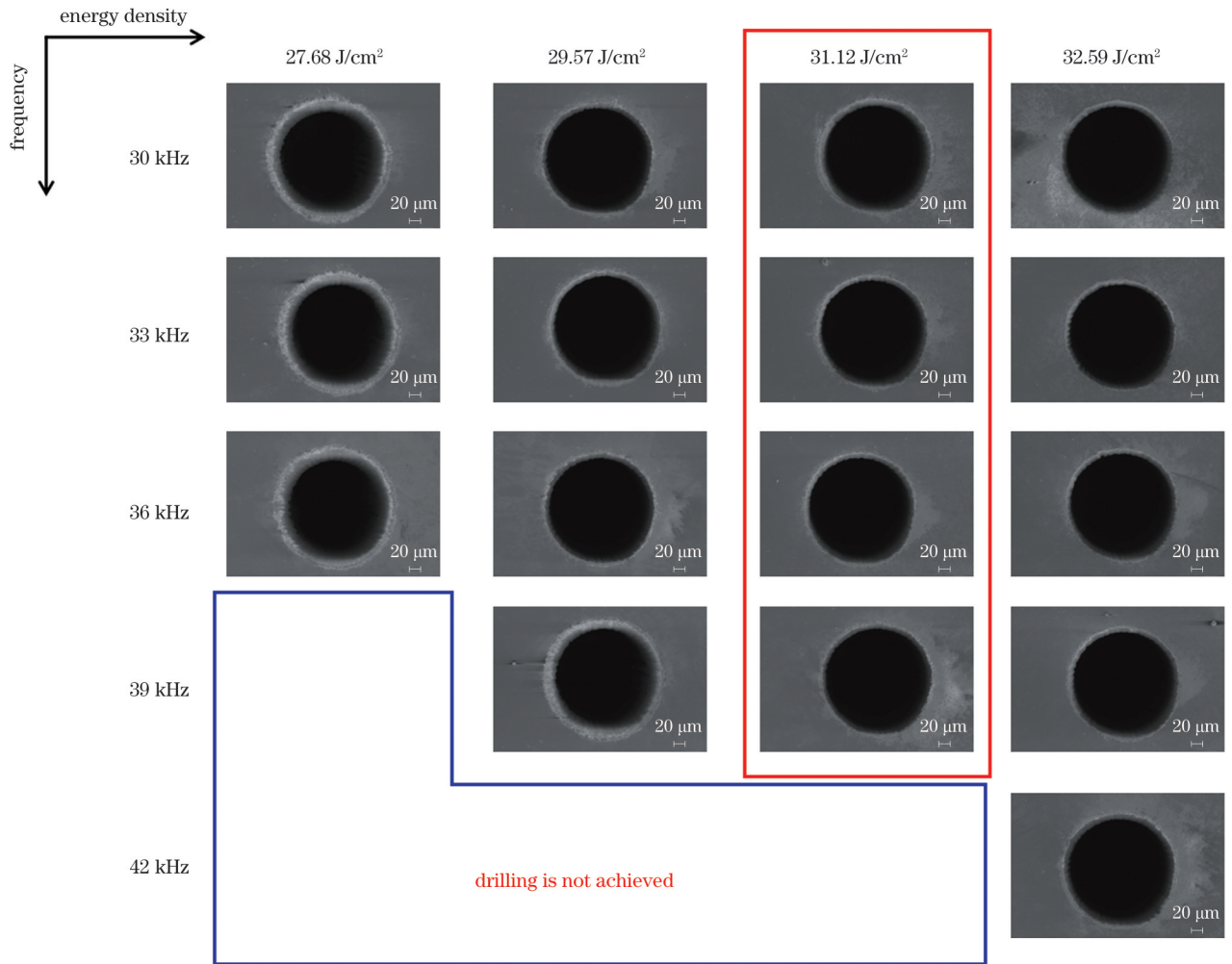


图 5 不同激光重复频率下加工的蓝宝石微通孔形貌

Fig. 5 Morphologies of sapphire through-holes processed under different laser repetition frequencies

表 2 激光脉宽与激光重复频率间的关系

Table 2 Relationship between laser pulse width and repetition frequency

Laser pulse width /ns	Laser repetition frequency /kHz
11	30
13	40
15	50
17	60
19	70

示,当激光的峰值功率接近甚至低于蓝宝石材料的烧蚀阈值时,激光的能量基本上都用于熔化蓝宝石材料。熔融态的蓝宝石材料在烧蚀槽中难以去除,阻碍了激光对深层材料的烧蚀,导致打孔失败。基于以上分析,加工蓝宝石的激光重复频率确定为 30 kHz。

### 3.3 激光扫描速度对通孔质量的影响

在激光能量密度为 31.12 J/cm<sup>2</sup> 和重复频率为 30 kHz 的条件下,分别设置扫描速度为 0.1、0.3、0.5、

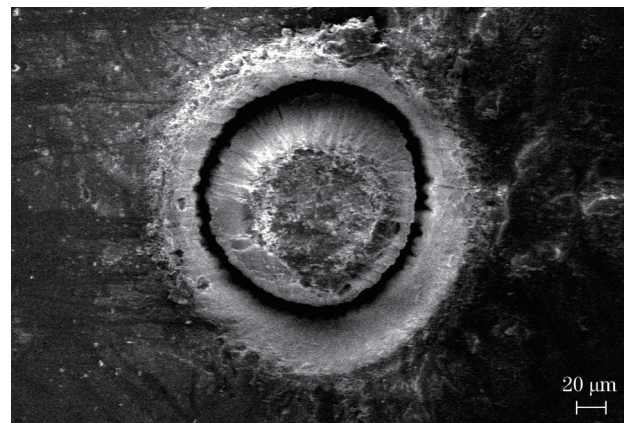


图 6 激光能量密度和重复频率分别为 32.59 J/cm<sup>2</sup> 和 45 kHz 时打孔失败的 SEM 图

Fig. 6 SEM image of drilling failure when energy density and repetition frequency of laser is 32.59 J/cm<sup>2</sup> and 45 kHz, respectively

0.7、0.9 mm/s,对蓝宝石进行打孔实验,蓝宝石微通孔表面形貌如图 7 所示。当扫描速度为 0.1 mm/s 时,孔边缘出现了明显的熔融重凝物;当扫描速度增加至 0.5 mm/s 时,得到了表面形貌良好的微通孔;随着激

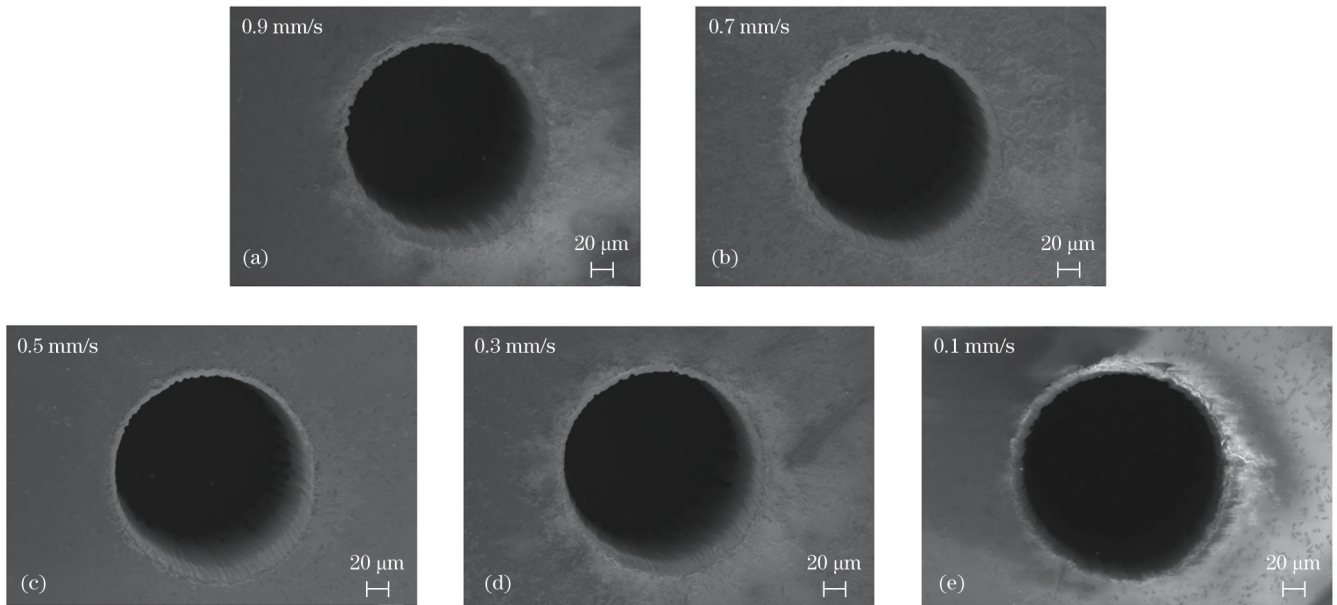


图 7 不同激光扫描速度下加工的蓝宝石微通孔的表面形貌

Fig. 7 Surface morphologies of sapphire micro through-holes processed under different laser scanning speeds

光扫描速度继续增加,微通孔表面再次出现熔融重凝物。

当激光的重复频率一定时,其扫描速度决定了激光脉冲的重叠率。激光脉冲重叠率 $\eta$ 的表达式为

$$\eta = \left( 1 - \frac{v_s}{d \times f_{\text{REP}}} \right) \times 100\%, \quad (2)$$

式中: $d$ 为激光光斑直径; $f_{\text{REP}}$ 为激光重复频率; $v_s$ 为激光扫描速度。激光光斑直径和激光重复频率为定值。由式(2)可知,激光脉冲重叠率与扫描速度成反比关系。当激光扫描速度为0.1 mm/s时,激光脉冲重叠率最大,如表3所示。此时孵化效应在激光脉冲烧蚀材料过程中起着重要作用,导致热作用增强,微通孔边缘区域出现额外的熔融区。熔融物被高压蒸气喷射至通孔边缘附近,并形成了熔融物重凝,降低了通孔表面质量。当激光扫描速度增加至0.5 mm/s时,激光脉冲的重叠率降低,孵化效应不再明显,此时激光烧蚀蓝宝石的机理以熔化、气化和光化学反应去除材料为主,此时材料的去除过程相对温和,因此微通孔边缘几乎没有重凝区和沉积区,微通孔的质量得到了提升。随着激光扫描速度的继续增加,激光脉冲的重叠率进一步降低,激光作用于材料的有效脉冲数减少,传递到蓝宝石内部的能量降低,导致蓝宝石蒸气的压力降低,进而喷射出的熔融物来不及被压缩空气吹开便沉积在通孔周围,形成了熔融物的沉积区。图8显示了不同扫描速度时蓝宝石微通孔截面的SEM图像,在扫描速度为0.5 mm/s时得到了锥度为 $2^\circ$ 的微通孔,且孔内几乎没有残留的颗粒。

表 3 激光脉冲重叠率与扫描速度间的关系

Table 3 Relationship between laser pulse overlap rate and scanning speed

$d / \mu\text{m}$	$f_{\text{REP}} / \text{kHz}$	$v_s / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$\eta / \%$
30	30	0.1	99.99
30	30	0.3	99.97
30	30	0.5	99.94
30	30	0.7	99.92
30	30	0.9	99.90

最终,通过实验分析得到了355 nm紫外纳秒激光加工蓝宝石通孔的最佳参数组合,激光能量密度为 $31.12 \text{ J/cm}^2$ ,激光频率为30 kHz,激光扫描速度为0.5 mm/s。该条件下的蓝宝石通孔表面SEM图如图9(a)所示,孔边缘最大缺口宽度为 $5.74 \mu\text{m}$ ,三维形貌如图9(b)所示,孔边缘比周围表面略高,且孔附近区域相对平坦。如果考虑激光共聚焦显微镜扫描透明蓝宝石表面时的噪声干扰,实际表面形貌将比观测到的结果更好。

表4总结了使用紫外纳秒激光加工蓝宝石微通孔的实验结果,并与超短脉冲激光打孔技术进行了对比。最大的区别在于,我们基于成本更低的纳秒激光来完成蓝宝石材料的打孔过程。通过调整实验参数,在纳秒范围内,我们在蓝宝石材料表面形成了无裂纹的高质量微通孔。更重要的是,我们加工的蓝宝石样品厚度值比文献[23]中提到的大16%,但是加工的通孔具有相当的甚至更小的直径和锥度。

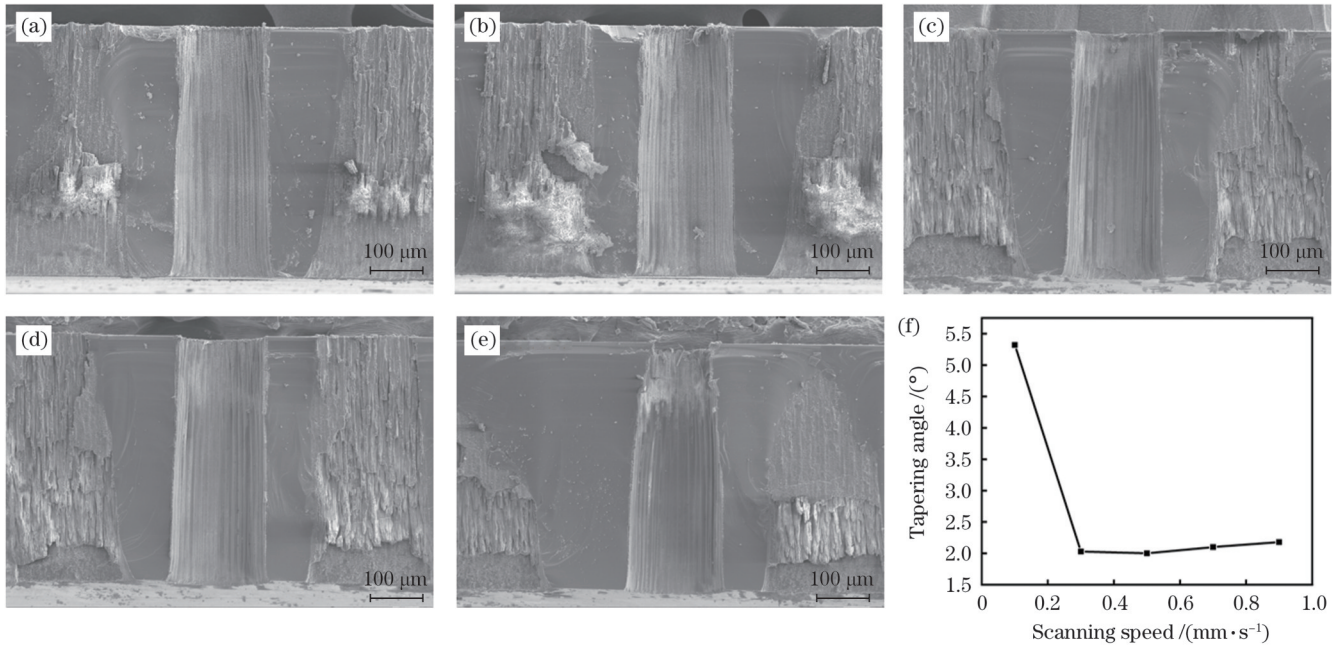


图 8 不同扫描速度下加工的蓝宝石通孔截面的 SEM 图和通孔锥度。(a) 0.9 mm/s; (b) 0.7 mm/s; (c) 0.5 mm/s; (d) 0.3 mm/s; (e) 0.1 mm/s; (f) 通孔锥度与激光扫描速度的关系

Fig. 8 Cross-section SEM images and tapering angles of sapphire micro through-holes processed under different laser scanning speeds. (a) 0.9 mm/s; (b) 0.7 mm/s; (c) 0.5 mm/s; (d) 0.3 mm/s; (e) 0.1 mm/s; (f) through-hole tapering angle versus laser scanning speed

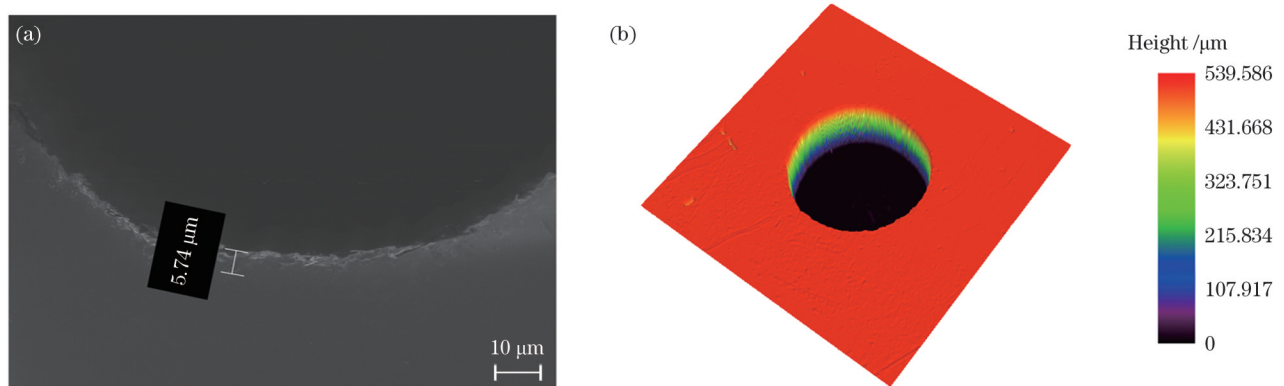


图 9 最优参数条件时蓝宝石通孔的形貌图像。(a) 通孔边缘 SEM 放大图像; (b) 通孔形貌三维图像

Fig. 9 Morphology image of sapphire through-hole under optimal parameter conditions. (a) SEM amplification image of through-hole edge; (b) three-dimensional image of through-hole morphology

表 4 紫外纳秒激光加工蓝宝石通孔与文献结果的比较

Table 4 Comparisons of sapphire through-holes processed by ultraviolet nanosecond laser with results in literatures

Parameter	Present work	Ref. [23]	Ref. [14]	Ref. [15]
Material	Monocrystalline sapphire (c-cut)	Monocrystalline sapphire (c-cut)	Monocrystalline sapphire (c-cut)	Monocrystalline sapphire (c-cut)
Beam style	Gaussian	Bessel	Gaussian	Gaussian
Pulse duration	Nanosecond (11–19 ns)	Picosecond (6 ps)	Picosecond (0.8 ps)	Femtosecond (300–500 fs)
Sample thickness	500 μm	430 μm	300 μm	430 μm
Hole diameter	~200 μm	~100 μm	~1 mm	~400 μm
Machining technique	Up-bottom ablation with spiraling	Trepanning with polyimide tape	Bottom-up ablation with spiraling	Bottom-up ablation with spiraling
Tapering angle	2°	<5°	<3°	<2°–<5°
Z-axis translation	Yes	No	Yes	Yes

## 4 结 论

证明了全固态紫外纳秒激光打孔技术的适用性,可以以更低的成本加工出整体质量更好的蓝宝石通孔。适宜的激光能量密度可以以熔化和气化的方式去除材料,这可减少熔融物的飞溅,提高通孔表面的质量。激光的重复频率越高,对应的脉冲宽度越长,激光的热效应也随之增强。由于热作用的影响,在加工区周围会产生飞溅物,影响通孔表面的粗糙度。激光扫描速度直接影响脉冲重叠率,合适的脉冲重叠率可以有效去除材料,同时对减小通孔锥度起着重要的作用。通过共聚焦显微镜和 SEM 的结果,证实可以在 500  $\mu\text{m}$  厚的蓝宝石中获得直径为 200  $\mu\text{m}$  的通孔,最终重凝区和沉积区可以忽略不计,具有非常低的锥度且内壁光滑。

### 参 考 文 献

- [1] Liu H G, Li Y, Lin W X, et al. High-aspect-ratio crack-free microstructures fabrication on sapphire by femtosecond laser ablation[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 132: 106472.
- [2] Wang Q W, Zhang Q L, Zhang Z, et al. Material removal and surface formation mechanism of C-plane sapphire in multipass ablation by a nanosecond UV laser[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(13): 21461-21470.
- [3] 边晓微. 超短激光加工蓝宝石研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.  
Bian X W. Study on machining of sapphire by ultrashort laser[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016.
- [4] 李旺旺. 蓝宝石高温压力传感器关键技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2019.  
Li W W. Research on key technology of sapphire high temperature pressure sensor[D]. Taiyuan: North University of China, 2019.
- [5] Liu M Y, Hu Y W, Sun X Y, et al. Chemical etching mechanism and properties of microstructures in sapphire modified by femtosecond laser[J]. *Applied Physics A*, 2017, 123(1): 99.
- [6] Xu J Y, Hu H, Zhuang C H, et al. Controllable laser thermal cleavage of sapphire wafers[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 102: 26-33.
- [7] 赵万芹, 梅雪松, 杨子轩. 激光加工电子陶瓷基板孔的形貌特征及其工艺调控综述[J]. *中国激光*, 2022, 49(10): 1002403.  
Zhao W Q, Mei X S, Yang Z X. Review on morphological features and process control of holes drilled by pulsed laser on surface of electronic ceramic substrates[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(10): 1002403.
- [8] Chang C W, Chen C Y, Chang T L, et al. Sapphire surface patterning using femtosecond laser micromachining[J]. *Applied Physics A*, 2012, 109(2): 441-448.
- [9] 李奇思, 梁庭, 雷程, 等. 355 nm 全固态紫外激光直写刻蚀硼硅玻璃微通道[J]. *中国激光*, 2018, 45(8): 0802003.  
Li Q S, Liang T, Lei C, et al. 355 nm all-solid-state ultraviolet laser direct writing and etching of micro-channels in borosilicate glass[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 0802003.
- [10] Cao X W, Chen Q D, Fan H, et al. Liquid-assisted femtosecond laser precision-machining of silica[J]. *Nanomaterials*, 2018, 8(5): 287.
- [11] Takayama N, Asaka S, Yan J W. Nanosecond pulsed laser irradiation of sapphire for developing microstructures with deep V-shaped grooves[J]. *Precision Engineering*, 2018, 52: 440-450.
- [12] 王兴盛, 黄宇珂, 沈博, 等. 短/超短脉冲激光诱导等离子体微加工研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(11): 111405.  
Wang X S, Huang Y K, Shen B, et al. Advances of short and ultrashort pulse laser induced plasma micromachining[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(11): 111405.
- [13] 崔云, 张晗宇, 赵元安, 等. 飞秒激光作用下金膜的微观特性变化[J]. *中国激光*, 2019, 46(2): 0203001.  
Cui Y, Zhang H Y, Zhao Y A, et al. Microscopic properties changes of Au film under action of femtosecond laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(2): 0203001.
- [14] Mishchik K, Gaudfrin K, Lopez J. Drilling of through holes in sapphire using femto-second laser pulses[J]. *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, 2017, 12(3): 321-324.
- [15] Lott G, Falletto N, Devilder P J, et al. Optimizing the processing of sapphire with ultrashort laser pulses[J]. *Journal of Laser Applications*, 2016, 28(2): 022206.
- [16] Phillips K C, Gandhi H H, Mazur E, et al. Ultrafast laser processing of materials: a review[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(4): 684-712.
- [17] Jia X S, Chen Y Q, Liu L, et al. Advances in laser drilling of structural ceramics[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(2): 230.
- [18] Sakurai H, He C, Konishi K, et al. Effect of damage incubation in the laser grooving of sapphire[J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, 125(17): 173109.
- [19] 徐思佳, 于颜豪, 陈岐岱. 基于水辅助的飞秒激光碳化硅微孔加工(特邀)[J]. *光子学报*, 2021, 50(6): 0650106.  
Xu S J, Yu Y H, Chen Q D. Water-assisted femtosecond laser silicon carbide micro-hole machining(invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(6): 0650106.
- [20] 韦新宇, 温秋玲, 陆静, 等. 紫外纳秒激光加工金刚石微槽工艺参数优化研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(10): 1002406.  
Wei X Y, Wen Q L, Lu J, et al. Research on parameters optimization of diamond microgrooves processed by ultraviolet nanosecond laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(10): 1002406.
- [21] Chen Z J, Yang J, Liu H B, et al. A short review on functionalized metallic surfaces by ultrafast laser micromachining[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 119(11): 6919-6948.
- [22] Liang T, Li Q S, Lei C, et al. Research on 355 nm all-solid-state ultraviolet laser processing through silicon holes[J]. *Journal of Laser Applications*, 2019, 31(2): 022003.
- [23] Kuriakose A, Bollani M, Di Trapani P, et al. Study of through-hole micro-drilling in sapphire by means of pulsed Bessel beams[J]. *Micromachines*, 2022, 13(4): 624.



# Sapphire Through-Hole Machining with 355 nm All-Solid-State Ultraviolet Nanosecond Laser

Ma Ye<sup>1</sup>, Lei Cheng<sup>1\*</sup>, Liang Ting<sup>1\*\*</sup>, Ji Pengfei<sup>1</sup>, Liu Yuqiao<sup>1</sup>, Wang Bingyan<sup>2</sup>, Chen Guofeng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Dynamic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;

<sup>2</sup>Inner Mongolia Power Machinery Institute, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China

## Abstract

**Objective** Sapphire crystals are commonly used in high temperature pressure sensor chips because of their excellent physical and chemical properties. In particular, in the manufacturing process of an all-sapphire fiber Fabry-Perot cavity high-temperature pressure sensor, the sapphire base must be drilled, and the quality of the through-hole is an important factor to ensure that the fiber can be vertically inserted to realize the effective transmission of optical signals. It is difficult to ensure the quality of sapphire through-holes using traditional mechanical and chemical processing methods. Laser machining technology has non-contact, non-mask, and simple process characteristics, which make it prominent in the field of hard brittle material micro-machining. Recently, there have been reports on the use of ultrashort pulse lasers to punch holes in sapphire; however, its high cost and low processing efficiency make this machining method mainly used in high-precision surface microstructure etching. Short pulse lasers, such as 355 nm ultraviolet nanosecond lasers, are widely used in industrial production owing to their low cost and high efficiency; however, there are few reports on their application in sapphire through hole processing. In this study, we analyze the impact mechanisms of different laser energy densities, repetition frequencies, and scanning speeds on sapphire processing using the control variable method, as well as the parameter space of sapphire through hole processing. We aim to fabricate through holes with diameters of approximately 200  $\mu\text{m}$  and tapering angles of less than  $5^\circ$  on 500  $\mu\text{m}$  thick sapphires without notches, heavy coagulation, or other damages. We hope that our method can provide a new, low-cost, and efficient way to process and cut the internal structure of sapphire.

**Methods** This study uses sapphire wafers with a diameter of 5.08 cm and thickness of 500  $\mu\text{m}$ . Before and after the experiment, the sapphire is ultrasonically cleaned with anhydrous ethanol to remove impurities on the surface and avoid effects on the laser processing results. First, using the control variable method, different laser energy densities, repetition frequencies, and scanning speeds are adjusted to drill holes into the sapphire. Subsequently, scanning electron microscopy and laser scanning confocal microscopy are used to analyze the surface morphology and 3D structure of the through-hole under different conditions. The effects of different laser parameters on the surface morphology and taper of the through-hole are studied. Finally, the optimal parameter space to obtain high-quality sapphire through holes is selected based on the experimental results.

**Results and Discussions** The prepared sapphire through hole diameter is 200  $\mu\text{m}$ , the taper is  $2^\circ$ , the maximum hole edge damage width is 5.74  $\mu\text{m}$ , and there is almost no heavy condensate at the hole edge (Fig. 9). In general, a suitable laser energy density enables the sample to melt and vaporize, which can reduce the splash of the molten material and improve the quality of the through-hole surface (Fig. 4). The higher the repetition frequency of the laser, the longer the corresponding pulse width, and the thermal effect of the laser is enhanced. Owing to the influence of the thermal action, spatter is produced around the processing zone, affecting the roughness of a through-hole surface (Fig. 6). The laser scanning speed directly affects the pulse overlap rate, and an appropriate pulse overlap rate can effectively remove materials and play an important role in reducing the taper of the through hole (Fig. 7).

**Conclusions** In this study, a 355 nm ultraviolet nanosecond laser is used to successfully prepare a through hole on a 500  $\mu\text{m}$ -thick sapphire wafer with a quality identical to or better than that of the ultra-short pulse laser (Table 4). Through the analysis of the drilling results assisted by laser scanning confocal microscopy and scanning electron microscopy, we determine a combination of laser energy density of 31.12 J/cm<sup>2</sup>, laser frequency of 30 kHz, and laser scanning speed of 0.5 mm/s. The results show that a micro through hole with good surface morphology and small taper can be prepared on the sapphire wafer by adjusting the appropriate combination of laser parameters. The results indicate a certain reference value for processing and cutting sapphire internal structures with a 355 nm all-solid-state ultraviolet nanosecond laser.

**Key words** laser technique; sapphire through-hole; control variate method; all-solid-state ultraviolet nanosecond laser; laser ablation