

激光与光电子学进展

飞秒激光切割复杂形状石英器件的试验研究

曾凡严¹, 周广福², 王攸¹, 严超凡¹, 戴玉堂^{1*}¹武汉理工大学光纤传感技术与网络国家工程研究中心, 湖北 武汉 430070;²歌尔股份有限公司, 山东 潍坊 261031

摘要 为了从石英单晶薄片上切割分离出复杂形状的器件,进行了石英单晶薄片的飞秒激光基础试验。在 50、100、200 kHz 高重复频率下,试验研究了烧蚀孔径与激光参数的关系,从而分析计算得到在对应重复频率下纯石英的刻蚀阈值分别为 3.73、3.45、3.2 J/cm²。然后,研究了飞秒激光的脉冲能量、扫描速度等加工参数对微槽加工质量的影响。结果表明,激光脉冲能量会显著改变加工微槽的表面形貌,扫描速度控制在 3.5 mm/s 附近时加工效果最优。最后,利用优化的工艺参数,在厚度 0.45 mm 的石英晶片上切出了谐振音叉类复杂形状器件,总体上达到了预期的质量要求。

关键词 激光器; 飞秒激光; 石英晶片; 谐振音叉; 切割; 刻蚀阈值

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220506

Experimental Study on Femtosecond Laser Cutting Quartz Devices with Complex Shapes

Zeng Fanyan¹, Zhou Guangfu², Wang You¹, Yan Chaofan¹, Dai Yutang^{1*}¹National Engineering Laboratory for Optical Fiber Sensing, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China;²Goertek Co., Ltd., Weifang 261031, Shandong, China

Abstract A femtosecond laser micromachining experiment was carried out on a quartz sheet to cut and separate devices with complex shapes from a quartz single crystal wafer. The relationship between the ablation aperture square and laser parameters was studied experimentally at high repetition frequencies of 50 kHz, 100 kHz, and 200 kHz. The etching thresholds of pure quartz at the corresponding repetition frequencies were 3.73 J/cm², 3.45 J/cm², and 3.2 J/cm², respectively. The effects of femtosecond laser pulse energy, scanning speed, and other processing parameters on the cutting quality of microgrooves were studied. The laser pulse energy could change the surface morphology of the machined microgroove significantly. In addition, the machining effect was the best when the scanning speed was approximately 3.5 mm/s. Finally, using optimized process parameters, the resonant tuning fork devices with complex shapes were cut out on a 0.45 mm thick quartz wafer, which generally meets the expected quality requirements.

Key words lasers; femtosecond laser; quartz wafer; tuning fork; cutting; etching threshold

1 引言

飞秒激光是时域脉冲宽度在 10⁻¹⁵ s 量级的激光,因其具有加工热影响区小、不产生冲击振动、精确靶向聚焦定位、瞬时功率高等特点而广泛应用于微加工领域。然而在飞秒激光加工过程中,烧蚀材料冷却后形成的碎屑有阻碍飞秒激光束辐射效能的倾向,特别是在深孔和深槽加工中尤其明显,这将影响其最终加工

效果^[1]。石英材料以其耐高温、热膨胀系数小、高度绝缘、耐腐蚀、压电效应、谐振等特性被广泛应用于柔性光学器件、微电子、航空航天等领域中^[2]。

石英单晶材料的微细加工中,超快激光加工已经成为主要工艺途径。华中科技大学余本海^[3]进行了超快激光烧蚀透明玻璃试验研究。研究发现,烧蚀面积正相关于脉冲能量,多脉冲烧蚀面积呈现近似玻尔兹曼增大,当激光强度接近烧蚀阈值时,烧蚀后样品的红

收稿日期: 2022-01-11; 修回日期: 2022-02-09; 录用日期: 2022-02-14; 网络首发日期: 2022-02-24

基金项目: 国家自然科学基金(51975442)

通信作者: *daiyt68@163.com

外透过率略微提高,当激光超过烧蚀阈值后,透过率出现大幅下降。北京大学李萌等^[4]利用飞秒激光三维微纳加工技术,可在多种玻璃和晶体材料中制备凹陷包层波导,除了通过平移和螺旋扫描进行制备,还可以利用焦场整形技术实现快速制备。该文综述了凹陷包层波导的飞秒激光加工进展及其在波导激光器、频率转换、温度传感、波导光栅滤波器和集成光子学器件等方面的应用。陈亮等^[5]利用波长为 1040 nm、脉冲宽度为 388 fs、重复频率为 100 kHz 的飞秒激光在石英晶体上刻蚀槽宽为 50 μm 、深宽比达 5.4 的微槽,并探究了激光单脉冲能量、扫描速度以及扫描次数对刻蚀槽宽以及深宽比的影响。陈鹏等^[6]提出了飞秒激光加工法布里-珀罗(F-P)腔的方法,并且将 F-P 腔和单模光纤焊接起来形成微型非本征光纤 F-P 干涉(EFPI)应变传感器。试验分析了激光能量与腐蚀对 F-P 腔深度的关系,结果表明,这种构造的干涉传感器加工流程不复杂,对于微小形变具备较好的灵敏度与可重复性,其应变灵敏度为 0.00466 nm/ μe 。中南大学褚东凯等^[7]采用飞秒激光刻写不同扭转周数的扭转型长周期光纤光栅,并分析了其扭转特性,通过对比扭转 2、4、6、8 周的长周期光纤光栅的扭转调控试验结果发现,8 周的扭转型长周期光纤光栅在单方向上主谐振峰波长对扭转率的响应灵敏度达到了 117.4 pm/(rad/m),线性度达到了 0.9995,波长调控范围约为 12.33 nm,非常适合波长和带宽调控。国外,德国哥廷根激光研究院 Ihlemann 等^[8]分别用纳秒脉冲激光器和飞秒脉冲激光器在石英晶体表面直接刻蚀圆槽,并且证明了激光石英刻蚀质量的好坏既与激光波长和脉冲宽度有关,又与石英晶体表面质量有关。

相对而言,对石英单晶薄片的精密切割,目前少有学者进行系统研究。本文利用高重复频率飞秒激光脉冲,开展硬脆透明材料石英单晶薄片的切割加工试验,研究其不同激光重复频率下的刻蚀阈值,探讨飞秒激光加工参数对石英晶片切割质量的影响,并实际切割了复杂形状的石英音叉器件原型样件。

2 试验设备及方法

本试验采用的飞秒激光加工系统外观如图 1 所示,主要由飞秒激光器、传输光路、二维工作台、CCD 监控相机及激光控制系统组成。主体光源是瑞士产飞秒激光器,飞秒激光波长为 1030 nm,脉宽为 260 fs,重复频率最大为 200 kHz,实际测得最大输出功率为 3 W。激光焦点处的光斑直径根据所采用的物镜数值孔径不同,通常为 12~30 μm 。激光束由激光器种子光源发出后,经衰减镜和光阑,并通过聚焦物镜照射在工件上。飞秒激光功率、重复频率以及脉冲宽度等参数可通过飞秒激光控制面板进行调节,飞秒激光经过传输光路聚焦到工件上。CCD 监控相机和聚焦物镜共焦点,因此可实时监测激光加工工况。加工工件安

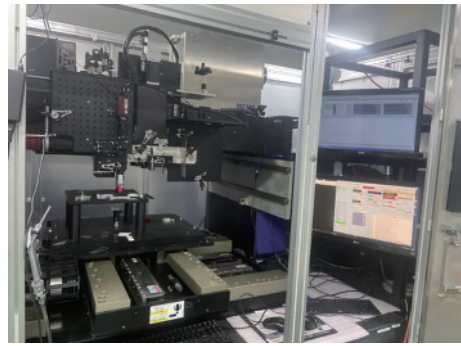


图 1 飞秒激光加工系统外观图

Fig. 1 Photograph of the femtosecond laser processing system

装在夹具上,工件夹具固定在二维工作台上,晶片切割过程是通过数控工作台移动工件与激光束的相对位置来实现的。

本试验所使用的晶片是由中国科学院上海光学精密机械研究所生产的 Z 切石英晶片,尺寸规格为 12 mm \times 8 mm \times 0.45 mm。激光切割后切面形貌及表面粗糙度由超景深显微镜(VHX-100, KETENCE, 日本)、金相显微镜(MV5000, 江南永新光学有限公司, 南京)、扫描电子显微镜(JSM-IT300, 日本电子株式会社, 日本)等完成检测。

3 试验结果与讨论

3.1 飞秒激光刻蚀石英材料的刻蚀阈值

3.1.1 理论光斑大小的计算

飞秒激光是高斯型激光光束,所以光斑大小的确定也是采用高斯型光束的方法计算。 ω 是聚焦于工件上的光斑直径,其计算公式为

$$\omega = \frac{4M^2 f \lambda}{\pi D}, \quad (1)$$

式中: M^2 是飞秒激光品质因子; f 是聚焦物镜的焦距长度; λ 是飞秒激光波长; D 是飞秒激光初始光束直径。本飞秒激光试验设备的参数为 $M^2=1.2$, $f=9.01$ mm, $D=2$ mm。将这些参数代入式(1)可得到激光光斑直径的理论值为

$$\omega = 7.08 \mu\text{m}. \quad (2)$$

3.1.2 石英晶片损伤阈值的计算

石英晶片是透明性极好的材料,当石英受到超快激光照射时,相当一部分光束会被透射出去,只有部分光束能量被吸收。只有当能量密度达到足够量值时,由多光子吸收引起的雪崩电离才会发生并形成等离子体喷发,从而对石英晶格造成实质性损伤破坏,这个临界能量密度就是我们探讨的损伤阈值。当激光能量密度低于材料损伤阈值时,则不能被刻蚀。虽然损伤阈值的判别方法有很多种,但这里我们选用文献[9]提出的外推法。通常对于飞秒激光等超快脉冲激光而言,损伤阈值采用激光能量和光斑面积的比值,其表达式为

$$\phi_{th} = \frac{E_{th}}{s}, \quad (3)$$

式中: E_{th} 为材料被刻蚀所需要的最低能量; s 为光斑面积。由于飞秒激光是高斯型光束, 定义最大激光能量密度为

$$\phi_0 = \frac{2E_p}{\pi\omega_0^2}, \quad (4)$$

式中: ω_0 是高斯光束在最大能量密度 e^{-2} 处的半径, 也可理解为高斯束腰半径; E_p 为单脉冲能量; ϕ_0 为高斯激光束最大激光能流密度(束腰处)。烧蚀直径与损伤阈值的关系为

$$D^2 = 2\omega_0^2 \ln\left(\frac{\phi_0}{\phi_{th}}\right), \quad (5)$$

式中: D 为烧蚀微孔开口直径; ϕ_{th} 为材料损伤阈值。要计算石英晶体损伤阈值, 首先需要计算实际激光光斑大小, 然而激光光斑的实际大小与理论大小是存在一定差距的。本次试验中, 分别采用不同重复频率 50、100、200 kHz 激光辐照石英晶体材料, 主要通过式(4)结合试验观察, 获得在不同频率下的激光光斑大小 ω_0 值。然后通过式(5)作图, 直线拟合推算石英晶体的损伤阈值。

依次在石英晶片上用等间距能量密度分布的单脉冲激光能量辐照, 将激光出光时间设置为不同重复频率下的单脉冲辐照时间。然后利用超景深光学显微镜测量不同能量辐照的烧蚀孔径大小, 每个功率下分别打孔 5 个, 取其孔径平均值。最后依据刻蚀孔径和激光能量密度之间关系, 以及刻蚀孔径与激光能量对数之间关系推出激光光斑实际值, 从而计算得到石英晶片的损伤阈值。

当激光重复频率为 200 kHz 时, 激光功率计测得工件处即石英晶片处的实时功率, 最大功率为 3 W。由式(4)可计算出 200 kHz 时激光光斑半径大小 $\omega_0 \approx 3.69 \mu\text{m}$ 。根据计算出来的光斑半径, 得出最大能量密度与烧蚀孔径平方的关系, 如图 2 中蓝色三角形测点值所示, 图中实线是拟合线, 该拟合直线与坐标轴的

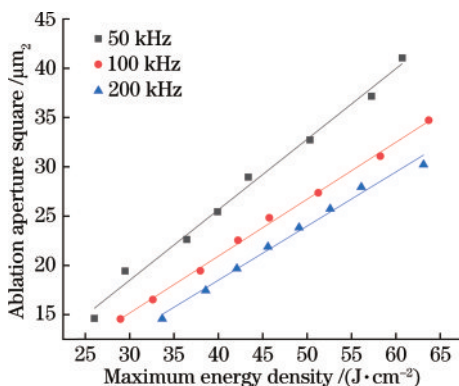


图 2 不同重复频率下最大能量密度与烧蚀孔径平方的关系图
Fig. 2 Relationship between maximum energy density and ablation aperture square at different repetition frequencies

交点即为刻蚀阈值能量密度。这是因为, 图 2 中的最大能流密度即为高斯光束束腰处的能流密度, 当这个能流密度小到刚好能实现刻蚀(似刻蚀非刻蚀的临界点)即刻蚀阈值时, 产生的刻蚀孔径 D 并不为零(肉眼无法观察), 只能通过拟合曲线的延长线推算。即由拟合方程 $y=0.513x-1.638$ 可得到, 200 kHz 刻蚀阈值 ϕ_{th} (200 kHz) $\approx 3.2 \text{ J/cm}^2$ 。

同理, 改变重复频率为 100 kHz、50 kHz 时, 分别采用激光功率计测得激光到达工件表面最大能量功率为 2.8 W、2 W。通过光斑直径的计算, 得到不同功率下的最大能流密度, 并得出了最大能量密度与孔径平方的关系。不同重复频率下最大能量密度与孔径平方的关系如图 2 所示, 各拟合直线与坐标轴的交点即为刻蚀阈值能量密度。当激光重复频率为 100 kHz 时, 其刻蚀阈值 ϕ_{th} (100 kHz) $\approx 3.45 \text{ J/cm}^2$ 。当激光重复频率为 50 kHz 时, 其刻蚀阈值 ϕ_{th} (50 kHz) $\approx 3.73 \text{ J/cm}^2$ 。不同的重复频率下实际光斑大小、损伤阈值和最小刻蚀能量的关系, 如表 1 所示。

表 1 实际光斑大小、损伤阈值和最小刻蚀能量的关系
Table 1 Relationship among actual spot size, damage threshold, and minimum etching energy

Test	Repeat frequency / kHz	Spot diameter / μm	Threshold / (J·cm ⁻²)	Minimum etching energy / μJ
1	50	7.66	3.73	0.86
2	100	7.38	3.45	0.74
3	200	7.38	3.69	0.68

实际计算出来的光斑直径大小为 7.66~7.38 μm, 而理论计算的光斑大小是 7.08 μm, 可见实际光斑大小略大于理论光斑直径。主要原因在于理论计算是采用设备说明书的最优参数, 如激光品质因子 M^2 、飞秒激光初始光束直径大小, 以及衰减镜、光阑、物镜聚焦、试验误差等因素都会导致实际光斑大小大于理论光斑大小。

3.2 工艺参数对石英刻蚀效果的影响

石英单晶透光性好, 被脉冲激光照射后, 很大一部分能量被透过, 只有部分能量被吸收。当激光能量过高时, 晶体材料易产生开裂、崩边、裂纹等缺陷。因此, 在加工透明单晶时, 通常是在保证加工效率及不产生物理缺陷的情况下, 寻找合适的激光能量通过多次扫描循环加工出所需要的微细结构。尤其是在精密切割的情况下, 探究飞秒激光能量与扫描速度等参数对加工的影响显得尤为重要。

在不同激光能量下, 控制其他激光影响参数不变, 重复频率为 200 kHz, 扫描速度为 5 mm/s, 离焦量为材料表面以下 50 μm, 扫描次数为 1, 采用 20 倍物镜聚焦。在飞秒激光光束未经整形的情况下, 光束能量呈现高斯正态分布, 即光束中心部位的能量高, 且延径向

逐渐减弱,因此,光束照射正中具有最高的刻蚀能流密度,刻蚀深度远高于四周,而且光束外围能流密度一旦低于材料的刻蚀阈值,将失去材料去除作用,这必然造成打孔或切槽时,开口部位呈锥形,如图 3 所示。当

然,聚焦光束本身也是以一定角度聚焦到工件表面,同样会造成锥形开口形貌特征。本试验的工艺条件如下:激光重复频率为 100 kHz,扫描速度为 5 mm/s,单脉冲能量 E_p 分别为 11.8 μJ 和 35.4 μJ 。

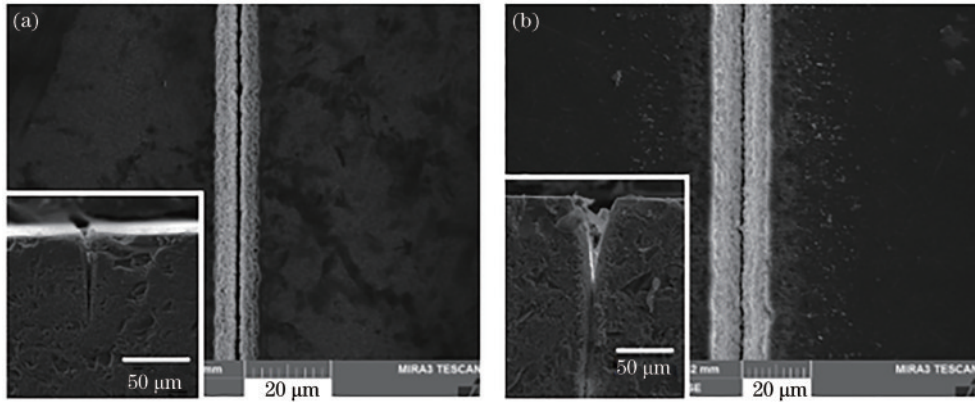


图 3 不同激光单脉冲能量下石英切割槽面的形貌。(a) $E_p=11.8 \mu\text{J}$; (b) $E_p=35.4 \mu\text{J}$

Fig. 3 Morphologies of quartz cutting groove surface under different laser single pulse energies. (a) $E_p=11.8 \mu\text{J}$; (b) $E_p=35.4 \mu\text{J}$

一般地,能流密度会对切槽的开口角度产生影响。理论上讲,能流密度越大,光束最外围超过材料阈值的概率越大,形成 V 形槽的夹角会变得更小。但实际加工时,由于硬脆晶体材料易发生崩边、熔融等缺陷,能流密度不能设置过大,因此在刻蚀石英微槽时,两侧壁很难产生一定的锥度。有时,可以调节焦平面的上下位置,但只能在很小的程度上减小锥度。试验过程中改变激光能流密度,V 槽的深度及角度都会相应地发生改变。试验结果表明,激光能量越大,V 槽的深度会越深,角度越大,而且沟槽开口附近会产生大量碎屑,槽边缘较为粗糙,表面形貌较差。由于沟槽缺陷形成的机理较为复杂,后续将从理论仿真结合大量参数优化试验,寻求最佳工艺参数,以达到更好的表面质量和垂直加工精度,同时改善壁面形貌。

本文也测量了不同激光能量下的微槽深度和宽度。图 4 为扫描速度 7 mm/s、循环次数为 5 的测量结果。从图 4 可以看出,切槽随着激光能量的增大而加

深,然而当能量逐渐增大到一定程度时槽深的增量开始逐渐趋缓。这是由于当激光能量增加到一定程度时,槽底碎屑、颗粒无法飞出,即使溢出,部分会回落重凝而附着在微槽底部和两侧壁上,这将导致深度难以显著增加。当然,还有一个原因,就是高重复频率下单脉冲能量偏低,加之扫描速度不匹配,造成烧蚀等离子体喷发初始速度较低,从而切割深度受到局限。

另外,我们对激光扫描速度也进行了试验探讨。一般而言,扫描速度过小时,焦平面处的热效应及热应力积累会造成崩边、局部熔融甚至微裂纹等缺陷,而扫描速度过大时由于晶体材料接收光子数量较少,多光子吸收的刻蚀作用有限。在激光重复频率 50 kHz、离焦量为 $-50 \mu\text{m}$ (即焦平面距晶片上表面以下 $50 \mu\text{m}$)、单脉冲能量 $50 \mu\text{J}$ 条件下,研究了不同扫描速度和扫描次数对微槽深度及深宽比的影响规律。从试验结果来看,随着扫描速度的增加,石英微槽刻蚀深度逐渐减小,微槽深宽比在扫描速度 $3\sim 4 \text{ mm/s}$ 范围内达到最大值(15 以上),当然扫描循环次数对深宽比有一定影响。

3.3 复杂形状石英器件的切割分离试验

试样工件为纯度 99.9999% 的石英单晶片,尺寸为 $8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm} \times 0.45 \text{ mm}$ 。所设计的石英复杂形状器件如图 5(a) 所示,这种形状的石英器件,可称为石英音叉,常被用作谐振传感器,可利用其压电谐振效应测量诸如油质黏度、超低温环境下的温度等物理参量。在上述尺寸的石英薄片试样上,切割分离出希望的谐振音叉形状[图 5(a)]。

从 3.2 节的试验及结果分析可知,一般采用 20 倍物镜聚焦、离焦量为 $-50 \mu\text{m}$ (固定)、激光重复频率为 50 kHz、扫描速度约为 3.5 mm/s ,切割效果最佳,既能获得较大的深宽比又能获得较佳的切口质量。因此,

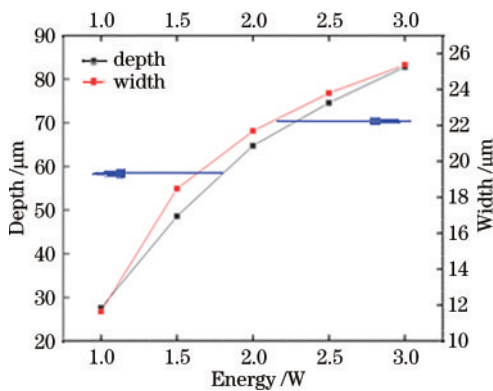


图 4 不同激光能量下石英切割微槽的深度与宽度

Fig. 4 Depth and width of quartz cutting micro groove under different laser energies

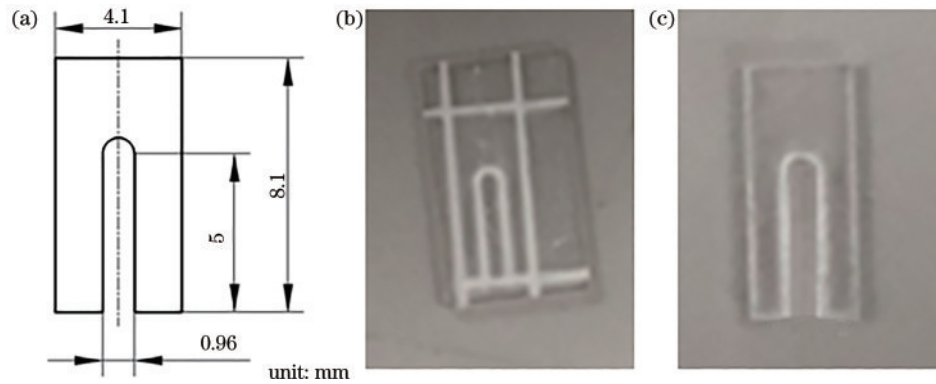


图 5 石英谐振器件设计形状及试切结果。(a)谐振器件设计图;(b)初试加工工件;(c)加工并清洗后分离器件

Fig. 5 Design and cutting results of quartz resonant device. (a) Resonant device design drawing; (b) initial trial machining of workpieces; (c) separating devices after processing and cleaning

本文采用该工艺参数组合对石英晶片进行飞秒激光切片切割。考虑到前期试验中直线拐角处容易产生热集中引起崩边和熔痕等缺陷,我们尽量不用直线拐角扫描,而是先切割出如图 5(b)所示的图形。由于晶片厚度略微超过高斯光束能切割的极限值,经过 30 次扫描循环后,尽管光束穿透到晶片底部,却依然存在局部粘连,谐振器件无法自行脱落。尤其中间半圆弧,由于是曲线切割,而且曲率半径小,特别容易发生粘连。为此,在半圆弧部位采用双缝宽重叠的方法来扩大切口的缝宽,但只是向内要切下的部分扩大缝宽,圆弧外围则要保证实际设计尺寸要求。

最后将加工试件放入体积分数 5% 的 HF 酸溶液中,在超声清洗机中清洗 3 min,再轻轻用力就能取下谐振器件,如图 5(c)所示。其整体形状规整,基本达到了预期的切割质量。

4 结 论

本文针对石英音叉等复杂形状器件的切片切割需求,系统地研究了飞秒激光刻蚀石英单晶薄片的微槽加工特性。分别在 50、100、200 kHz 的重复频率下计算石英晶片的损伤阈值,发现石英晶片阈值大约为 $3.2 \sim 3.7 \text{ J/cm}^2$,重复频率越大,石英的损伤阈值相对越小。激光的实际光斑大小与理论计算的光斑大小相比偏大。然后研究了飞秒激光的脉冲能量、扫描速度等加工参数对微槽加工质量的影响。结果表明,激光脉冲能量会显著改变加工微槽的表面面貌,扫描速度控制在 3.5 mm/s 附近时加工效果最优。最后,利用优化的工艺参数,在厚度 0.45 mm 的石英晶片上切出了谐振音叉类复杂形状器件,总体上达到了预期的质量要求。

参 考 文 献

- [1] 刘斌,戴玉堂,殷广林,等. 超声波辅助飞秒激光加工光纤材料的工艺探索[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0303005.
Liu B, Dai Y T, Yin G L, et al. Exploration on ultrasonic vibration aided femtosecond laser machining process of fiber optic materials[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(3): 0303005.
- [2] 周鹏,王衍行,祖成奎,等. 低介电玻璃的研究进展[J]. 材料导报, 2016, 30(S1): 290-293.
Zhou P, Wang Y H, Zu C K, et al. Research on low dielectric glass[J]. Materials Review, 2016, 30(S1): 290-293.
- [3] 余北海. 飞秒激光对透明电介质材料的烧蚀与微加工研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
Yu B H. Ablation and micromachining of dielectrics with a femtosecond laser[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
- [4] 李萌,张茜,杨栋,等. 飞秒激光加工凹陷包层波导及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(11): 111427.
Li M, Zhang Q, Yang D, et al. Femtosecond laser writing of depressed cladding waveguide and its applications [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(11): 111427.
- [5] 陈亮,刘晓东,刘静,等. 飞秒激光在石英玻璃表面刻蚀微槽的研究[J]. 光学学报, 2020, 40(23): 2314001.
Chen L, Liu X D, Liu J, et al. Microgroove etching with femtosecond laser on quartz glass surfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(23): 2314001.
- [6] 陈鹏,戴玉堂,代圣力,等. 采用飞秒激光加工的一种 F-P 应变传感器设计[J]. 应用激光, 2017, 37(4): 569-573.
Chen P, Dai Y T, Dai S L, et al. Design of a F-P strain sensor based on femtosecond laser processing[J]. Applied Laser, 2017, 37(4): 569-573.
- [7] 褚东凯,孙小燕,胡友旺. 飞秒激光加工扭转型长周期光纤光栅的特性研究[J]. 应用激光, 2017, 37(3): 414-419.
Chu D K, Sun X Y, Hu Y W. The characteristic of twisted long period fiber grating fabricated by femtosecond laser[J]. Applied Laser, 2017, 37(3): 414-419.
- [8] Ihlemann J, Wolff B, Simon P. Nanosecond and femtosecond excimer laser ablation of fused silica[J]. Applied Physics A, 1992, 54(4): 363-368.
- [9] Liu J M. Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes[J]. Optics Letters, 1982, 7(5): 196-198.