

飞秒激光在石英玻璃表面刻蚀微槽的研究

陈亮, 刘晓东, 刘静*, 熊政军

中南民族大学激光与智能制造研究院, 湖北 武汉 430074

摘要 采用波长为 1040 nm、脉宽为 388 fs、重复频率为 100 kHz 的飞秒激光对石英玻璃表面进行大深宽比微型凹槽的刻蚀。首先,通过面积推算法,实验测量得到石英玻璃的损伤阈值为 10.61 J/cm^2 。然后,采用单线刻蚀法,研究了激光单脉冲能量、扫描速度和扫描次数对微槽刻蚀深度和宽度的影响。最后,利用激光扫描振镜,使用螺旋环切法,有效地增大微槽深宽比。实验结果表明:激光单脉冲能量是影响微槽深宽比的主要因素,在激光单脉冲能量为 $110 \mu\text{J}$ 、扫描速度为 100 mm/s 、扫描次数为 30 的条件下,能够获得质量良好、槽宽 $50 \mu\text{m}$ 且深宽比达 5.4 的石英玻璃微槽。

关键词 激光光学; 飞秒激光加工; 石英玻璃; 微槽; 损伤阈值

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2314001

Microgroove Etching with Femtosecond Laser on Quartz Glass Surfaces

Chen Liang, Liu Xiaodong, Liu Jing*, Xiong Zhengjun

Institute of Laser and Intelligent Manufacturing Technology, South-Central University for Nationalities, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract In this paper, we used femtosecond laser with a wavelength of 1040 nm, a pulse duration of 388 fs, and repetition frequency of 100 kHz to etch microgrooves with a large depth-to-width ratio on the surface of quartz glass. Firstly, the laser-induced damage threshold of quartz glass was experimentally determined to be 10.61 J/cm^2 by virtue of the area calculation method. Secondly, the effects of laser single-pulse energy, scanning speed, and scanning times on the etching depth and width of the microgrooves were investigated with a single-line etching method. Finally, applying spiral etching with assistance of a laser scanning galvanometer, we found that the depth-to-width ratio of the microgrooves could be increased significantly. Experimental results indicate that the laser single-pulse energy plays an important role on the depth-to-width ratio of the microgrooves. Besides, with a laser single-pulse energy of $110 \mu\text{J}$, a scanning speed of 100 mm/s , and a scanning times of 30, we obtain the high-quality microgrooves with a width of $50 \mu\text{m}$ and a depth-to-width ratio of 5.4 on the surface of quartz glass.

Key words laser optics; femtosecond laser processing; quartz glass; microgroove; damage threshold

OCIS codes 140.3390; 140.3330; 140.7090; 160.2750

1 引 言

近年来,在微流体器件制造、电子封装等领域对大深宽比、高精度微型凹槽(宽度小于 $50 \mu\text{m}$)的需求日益增多^[1-2]。在制造加工领域现已涌现了各种各样的关于制备这类高品质微型凹槽的新兴技术,如电子束加工和聚焦离子束加工^[3],它们的加工精度高,但使用条件苛刻、效率较低。还有电火花和电化学法^[4],它们的加工效率高,但对所加工的材料具有一定的限制,且加工精度不高,难以达到工业需

求^[5]。相比以上方法,超快激光加工^[6]则是具有广泛应用前景的先进制造工艺。该技术利用高能激光束与材料的非线性相互作用,在加工过程中因其脉冲宽度远远小于晶格与晶格之间作用的热弛豫时间,从根本上避免了热扩散的影响,因而加工质量大大提高^[7-9]。如今,飞秒激光加工因其具备“冷加工”和“高精度”两大特点^[10-11],被广泛应用于微纳制造领域,如制备光波导^[12]、微器件、三维光子晶体等^[12-14]。此外,根据飞秒激光光束的光斑特性,通过调节峰值能量进而控制焦点附近的激光强度,对飞

收稿日期: 2020-04-07; 修回日期: 2020-07-24; 录用日期: 2020-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(11804399)、中南民族大学中央高校基本科研业务费专项资金(CZQ20018)

* E-mail: jingliu@scuec.edu.cn

秒激光的加工区域进行精确控制,使其加工尺寸突破衍射极限成为可能,为微纳米尺度器件的超精细加工提供了可行性^[15-17]。

在透明脆性材料中,石英玻璃具有较低的热膨胀系数、稳定的化学性质、优良的电绝缘性、耐磨损、抗氧化等特征,被广泛应用于光伏、电光源、半导体、光纤通信等领域,是 21 世纪最具潜力的材料之一^[18-19]。目前,已有相关研究报道使用飞秒激光对石英玻璃进行微纳米加工,其方法主要归纳为两类:液体辅助飞秒激光刻蚀法和飞秒激光直写制备法^[20-21]。液体辅助飞秒激光刻蚀法^[22]是将飞秒激光直接聚焦于样品-液体界面进行加工,如邢松龄等^[23]利用 800 nm 和倍频得到的 400 nm 飞秒激光通过水辅助法在石英玻璃表面进行刻蚀,获得高质量、高深径比(孔直径为 72 μm ,孔深为 1824 μm)的微孔。飞秒激光直写制备法^[24-25]是将激光直接聚焦到透明材料内部,在没有任何辅助液体情况下,直接进行加工,加工流程更简单,但相关文献较少,目前体现的工艺技术水平达不到实际应用要求。至今,飞秒激光与石英玻璃相互作用的物理机制和实验研究均处于初期阶段,亟待深入探索。

本文以石英玻璃作为实验对象,以飞秒脉冲激光作为实验手段,以共聚焦激光显微镜为表征手段,系统地研究了激光单脉冲能量、振镜扫描速度、加工

次数等工艺参数对石英玻璃表面微槽深宽比的影响规律。依据石英玻璃微槽的深宽比和形貌特征,获得最优的加工参数,可为微电子器件布线封装、微流体通道等提供有价值的借鉴和参考。

2 实验设备与方法

实验样品材料为戴尔蒙科技公司的石英玻璃圆片,其直径为 20 mm、厚度为 1 mm、折射率 $n = 1.46$,实验前用无水酒精对样品表面进行擦拭,去除样品表面杂质,确保样品表面清洁。

实验中,采用的激光加工系统设备构造如图 1 所示。飞秒激光器为 Newport Corporation 公司的 SPIRIT 16-HE-SHG,技术参数如表 1 所示。扫描振镜(hurrySCAN, Scanlab, 德国)的通光直径为 15 mm,光束扫描位移为 72 mm,反应时间为 1.2 ms,最大扫描速度为 6 m/s。二维运动平台行程为 200 mm,最小位移为 1 μm ,垂直 z 向定位器分辨率为 1 μm ,重复定位精度为 1 μm 。近红外激光束通过反射镜 M1、M2 后入射到激光扩束镜(扩束比例 1:3)中,再经过反射镜 M3 和 M4 入射到扫描振镜中,最后通过场镜聚焦至样品表面。本文所有的实验均采用脉冲宽度为 388 fs、波长为 1040 nm 的激光,以自上而下刻蚀的方法(即激光首先聚焦于样品上表面,向下刻蚀)进行加工。

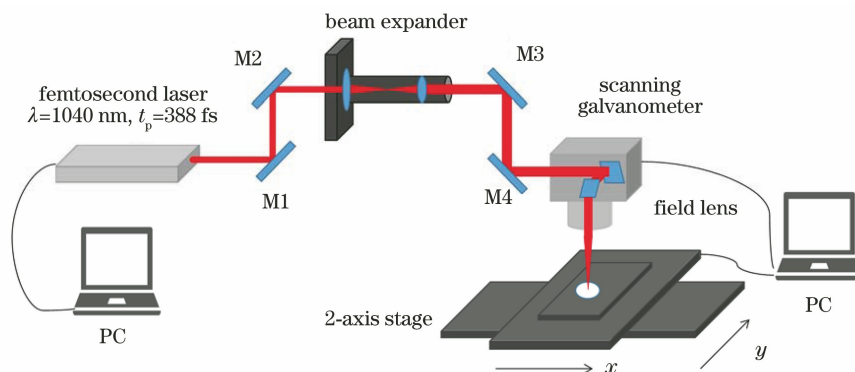


图 1 制备石英玻璃表面微槽构造的实验装置

Fig. 1 Experimental setup for fabrication of microgrooves on quartz glass surface

表 1 激光技术参数

Table 1 Technical parameters of laser

Technical parameter	Value
Wavelength/nm	1040
Average power /W	0-16
Repeat frequency /kHz	100
Pulse duration /fs	388
Focal spot diameter / μm	14

3 结果与讨论

3.1 石英玻璃单脉冲损伤阈值测定

损伤阈值是材料受到不可逆转的破坏时,去除单层材料所需的最小能量,是确定材料产生烧蚀的一个重要参数。实验通过面积推算法计算材料的损伤阈值^[26]。

飞秒激光的单脉冲能量密度近似服从高斯函数

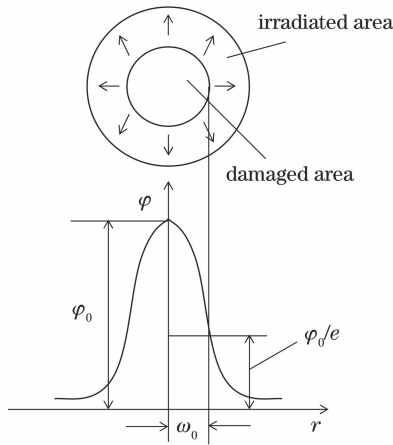


图 2 高斯光束的能量密度分布

Fig. 2 Energy density distribution of Gaussian beam

分布,如图 2 所示,聚焦光斑截面直径上激光单脉冲能量密度分布为

$$\varphi(r) = \varphi_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right), \quad (1)$$

式中: φ_0 为激光脉冲峰值能量密度; ω_0 为光斑半径; r 为测量点到光斑中心的距离。对光斑各点激光单脉冲能量密度进行积分,可得激光单脉冲能量 E_p 为

$$E_p = \int_0^\infty 2\pi r \varphi(r) dr = \frac{\pi\omega_0^2}{2} \varphi_0. \quad (2)$$

激光平均功率 P 与单脉冲能量 E_p 和激光重复频率 f 关系为

$$E_p = \frac{P}{f}. \quad (3)$$

设 φ_{th} 为烧蚀区域边缘激光能量密度,根据材料损伤阈值定义,则 φ_{th} 为材料损伤阈值,单脉冲烧

蚀区域直径为 D ,由(1)、(2)、(3)式可得:

$$\varphi_{th} = \varphi_0 \exp\left(-\frac{D^2}{2\omega_0^2}\right) = \frac{2E_p}{\pi\omega_0^2} \exp\left(-\frac{D^2}{2\omega_0^2}\right). \quad (4)$$

整理(4)式可得:

$$D^2 = 2\omega_0^2 \ln\left(\frac{\varphi_0}{\varphi_{th}}\right) = 2\omega_0^2 \left(\ln E_p + \ln \frac{2}{\pi\omega_0^2 \varphi_{th}}\right). \quad (5)$$

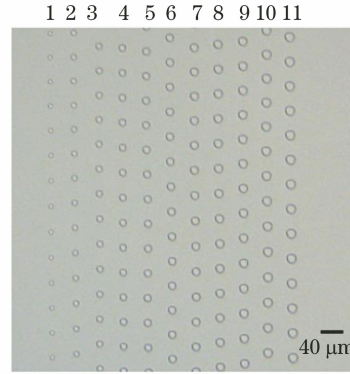


图 3 石英玻璃单脉冲刻蚀形貌

Fig. 3 Single pulse etching morphology of quartz glass

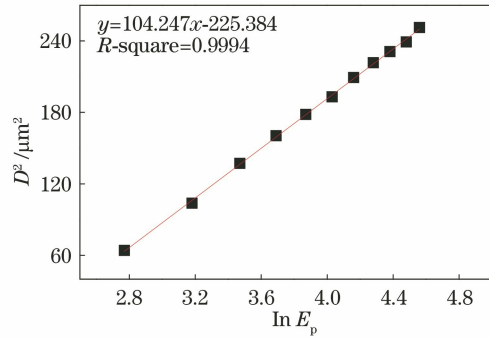


图 4 石英玻璃单脉冲刻蚀拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of single pulse etching of quartz glass

表 2 石英玻璃表面单脉冲刻蚀实验数据

Table 2 Experimental data of single-pulse etching on quartz glass surface

Number	$D / \mu\text{m}$	P / W	$\ln E_p$	$D^2 / \mu\text{m}^2$
1	8.01	1.6	2.77	64.13
2	10.19	2.4	3.18	103.8
3	11.71	3.2	3.47	137.2
4	12.67	4.0	3.69	160.5
5	13.35	4.8	3.87	178.3
6	13.90	5.6	4.03	193.1
7	14.47	6.4	4.16	209.3
8	14.89	7.2	4.28	221.7
9	15.20	8.0	4.38	231.1
10	15.46	8.8	4.48	239.2
11	15.80	9.6	4.86	251.4

在不同激光功率 P 下,将扫描速度 v 设置为 3000 mm/s 即可在实验上实现单个激光脉冲对石英

玻璃表面进行刻蚀,如图 3 所示。被烧蚀区域的直径 D 、对应的激光功率 P 、烧蚀区域直径的平方 D^2 和单

脉冲能量的对数 $\ln E_p$, 如表 2 所示。图 4 为石英玻璃的烧蚀区域与激光单脉冲能量的关系示意图, 其中横坐标是激光单脉冲能量的对数 $\ln E_p$, 纵坐标是烧蚀区域直径的平方 D^2 。依据(5)式可知, 激光单脉冲能量的对数 $\ln E_p$ 与烧蚀区域直径的平方 D^2 呈线性关系, 对图 4 数据进行线性拟合(线性相关度为 99.94%), 可得光斑半径 $\omega_0 = 7.22 \mu\text{m}$, 石英玻璃单脉冲损伤阈值 $\phi_{th} = 10.61 \text{ J/cm}^2$ 。

3.2 激光加工参数对石英玻璃微槽刻蚀的研究

飞秒激光脉冲与石英玻璃之间的相互作用过程非常复杂, 涉及多种因素, 如激光脉冲能量、扫描速度、扫描次数等。由于飞秒激光脉冲能量近似于高斯分布, 激光光斑中心处的能量高、边缘能量低, 导致在激光刻蚀过程中, 对材料的刻蚀在光斑中心处深、边缘处浅。此外, 随着刻蚀石英玻璃微槽的深度增大, 部分残渣溅射到凹槽侧壁, 慢慢累积, 形成“V”型, 不利于飞秒脉冲激光与材料相互作用, 导致凹槽的深度增加缓慢。为得到宽度小、深度大的石英玻璃微型凹槽, 采用控制变量法, 通过对样品进行单线刻蚀, 分别比较激光脉冲能量、扫描速度和扫描次数等工艺参数对微槽的深度和宽度的影响。

3.2.1 激光单脉冲能量对石英玻璃微槽深宽的影响

在扫描次数为 1 的实验条件下, 飞秒激光单脉冲能量对微槽的深度与宽度的影响趋势如图 5 和图 6 所示, 微槽的深度与宽度均是使用三维激光扫描共聚焦显微镜(VK-X250K, KEYENCE, 日本)进行测量。由图 5 可知, 对不同扫描速度而言, 石英玻璃被刻蚀的深度均随着激光单脉冲能量的增大而增大。值得注意的是, 当扫描速度在 50 mm/s 时, 微槽深度的增长趋势最为突出。当扫描速度大于 200 mm/s 时, 增长趋势不明显, 主要原因是扫描速度较大, 激光脉冲重叠率降低, 作用于石英玻璃的激光能量密度减小, 刻蚀的深度减小, 随着激光单脉冲能量的增大, 深度随之增大, 但增大趋势趋于平缓。

由图 6 可知, 微槽宽度随激光单脉冲能量增大而缓慢增大, 然而, 在相同的 E_p (激光单脉冲能量) 条件下, 槽宽随扫描速度 v 增大而逐渐减小。当 E_p 增大时, 刻蚀区域边缘激光能量密度超过石英玻璃损伤阈值, 导致槽宽增大。在相同 E_p 条件下, 扫描速度 v 增大, 激光脉冲重叠率降低, 刻蚀区域内激光能量密度减小, 槽宽也随之减小。

3.2.2 扫描速度对加工石英玻璃微槽深宽的影响

在扫描次数为 1 的实验条件下, 扫描速度 v 对微槽深度和宽度的影响趋势如图 7 和图 8 所示。由

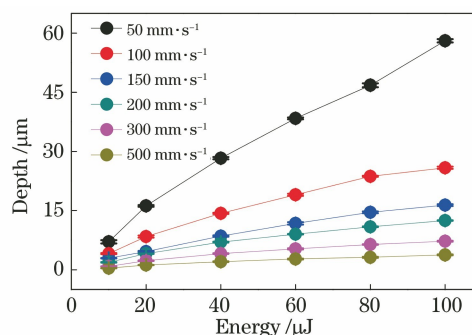


图 5 微槽深度与激光单脉冲能量关系

Fig. 5 Relationship between depth of microgrooves and single-pulse energy

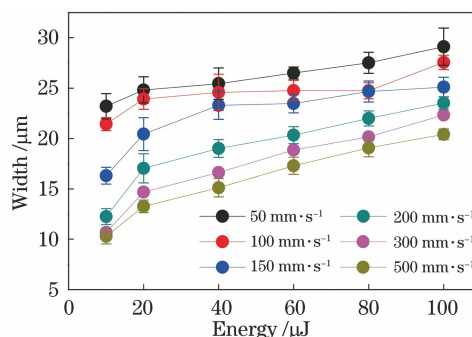


图 6 微槽宽度与激光单脉冲能量关系

Fig. 6 Relationship between width of microgrooves and single-pulse energy

图 7 可知, 在扫描速度较小 ($v < 50 \text{ mm/s}$) 时, 微槽深度波动较大, 在 $3 \sim 24 \mu\text{m}$ 之间, 这主要是由多种原因导致, 如空气易参与激光电离介质形成破坏的过程, 增加刻蚀不稳定性; v 较小时激光脉冲重叠率较大, 刻蚀产生的残渣溅射、熔融、参与激光二次加工等(不确定性多)。当扫描速度 $v \geq 50 \text{ mm/s}$ 后, 微槽深度的整体变化趋势随扫描速度的增大而减小。当激光单脉冲能量 $E_p \geq 40 \mu\text{J}$ 时, 在扫描速度为 50 mm/s 所对应的条件下, 微槽的深度明显增大, 且当 $E_p = 100 \mu\text{J}$ 时, 仅单次刻蚀微槽深度可达 $58 \mu\text{m}$ 。随着振镜扫描速度逐渐增大, 加工区域脉冲重叠减少, 作用于石英玻璃表面的激光能量密度逐渐减小, 因此刻蚀石英玻璃的深度越来越小。

对于大深宽比的石英微槽而言, 其宽度越小越好。由图 8 可知, 当扫描速度较小 ($v < 50 \text{ mm/s}$) 时, 被刻蚀的宽度在 $16 \sim 24 \mu\text{m}$ 之间。当 $50 \text{ mm/s} < v < 200 \text{ mm/s}$ 时, 宽度略有增加, 在 $13 \sim 29 \mu\text{m}$ 之间。当 $v > 200 \text{ mm/s}$ 时, 光斑重叠率降低, 宽度随扫描速度的增大而逐渐减小, 但同时被刻蚀的微槽的深度急剧下降(图 7)。因此, 振镜扫描速度 v 在 $[50 \text{ mm/s}, 200 \text{ mm/s}]$ 区间内, 比较适合石英玻璃微槽加工。

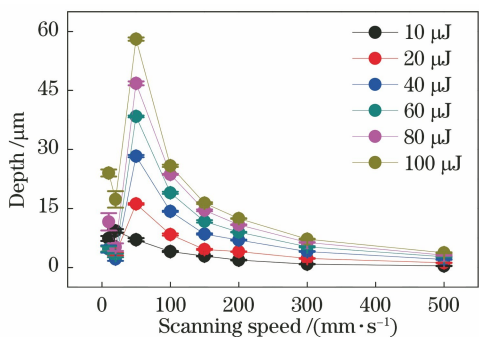


图 7 微槽深度与扫描速度关系

Fig. 7 Relationship between depth of microgrooves and scanning speed

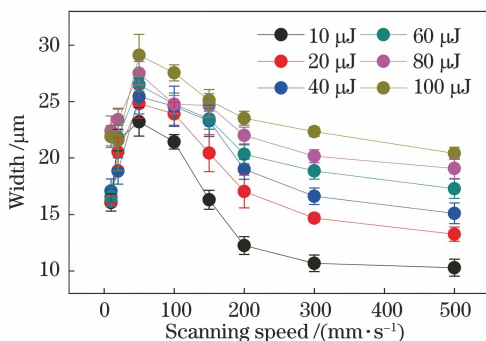


图 8 微槽宽度与扫描速度关系

Fig. 8 Relationship between width of microgrooves and scanning speed

3.2.3 扫描次数对加工石英玻璃微槽深宽的影响

在激光单脉冲能量为 $40 \mu\text{J}$ 的实验条件下,扫描次数对微槽深度和宽度的影响趋势如图 9 和图 10 所示。由图 9 可知,当扫描速度 $v = 20 \text{ mm/s}$ 时,刻蚀的深度不会随着次数的变化有明显的增大或减小。对于扫描速度 $v \geq 50 \text{ mm/s}$,在扫描次数 $N < 20$ 时,石英玻璃微槽的深度随着扫描次数的增加而增大(随着扫描次数增多,激光脉冲能量在加工区域逐渐累积,使得微槽的深度不断加深)。随着扫描次数的增多($N > 20$),被刻蚀的深度没有明显增大,主要是因为激光在刻蚀石英玻璃过程中,微槽深度不断增大,形成的残渣需要更长时间从微槽中飞出,有部分甚至直接附着在槽壁上,导致激光传播至槽底部的能量逐渐减小,使得微槽深度增加变缓,最终达到饱和。

另一方面,随着扫描次数的线性递增,石英玻璃被刻蚀的宽度始终在 $28 \mu\text{m}$ 上下波动,且波动范围较小($< 5 \mu\text{m}$)。这说明激光扫描次数对宽度的影响较小,如图 10 所示。

3.3 螺旋环切法刻蚀石英玻璃微槽的分析

由于飞秒激光脉冲能量在空间上的分布近似于

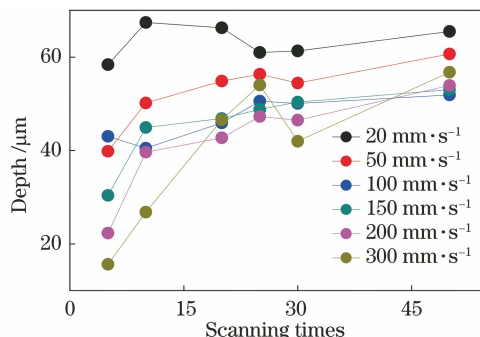


图 9 扫描次数与微槽深度的关系

Fig. 9 Relationship between depth of microgrooves and scanning times

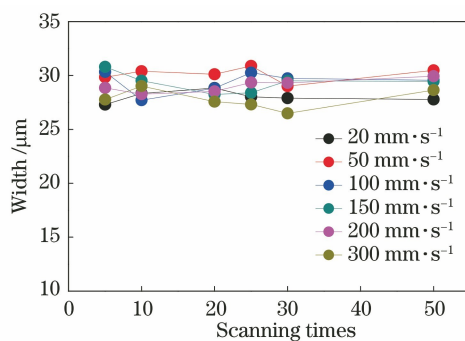


图 10 扫描次数与微槽宽度的关系

Fig. 10 Relationship between width of microgrooves and scanning times

高斯分布,激光光斑中心处的能量最高,越往边缘能量越低,对材料的烧蚀在光斑中心处最深并往外依次递减,因此在石英玻璃表面加工微槽时,对石英玻璃采用单线刻蚀的方法,容易直观地比较各种激光加工参数对微槽深宽的影响,然而,为了获得深度较大、宽度较小的石英玻璃微槽,本文采用螺旋环切法^[27]对石英玻璃微槽进行刻蚀。由 CAD(图 11)中加工路径可知,螺旋环切法的加工路径会使激光光斑边缘部分的线条密集程度明显增大,反映至实际加工的过程中,即作用在刻蚀凹槽两壁的平均能量密度增加,有利于飞秒激光与材料相互作用的能量传输,从而获得较大深宽比的微槽。

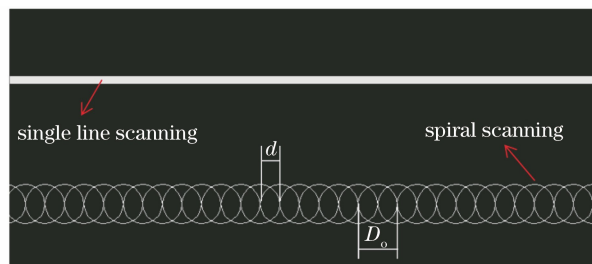


图 11 单线刻蚀与螺旋环切刻蚀的 CAD 图

Fig. 11 Single line etch with spiral etch CAD drawing

螺旋环切法的加工策略中,除基本的激光加工参数外,还会涉及另外两个参数,一个是所采用的圆环直径 D_0 ,即加工的切缝宽度,另一个是圆环之间的间隔距离 d 。本实验采用的螺旋环切参数为 $D_0=30\ \mu\text{m}$, $d=15\ \mu\text{m}$ 。在激光单脉冲能量为 $110\ \mu\text{J}$,扫描次数为 30 次的实验条件下,以共聚焦显微镜为表征手段得到的石英玻璃微槽截面形貌如图 12 所示。

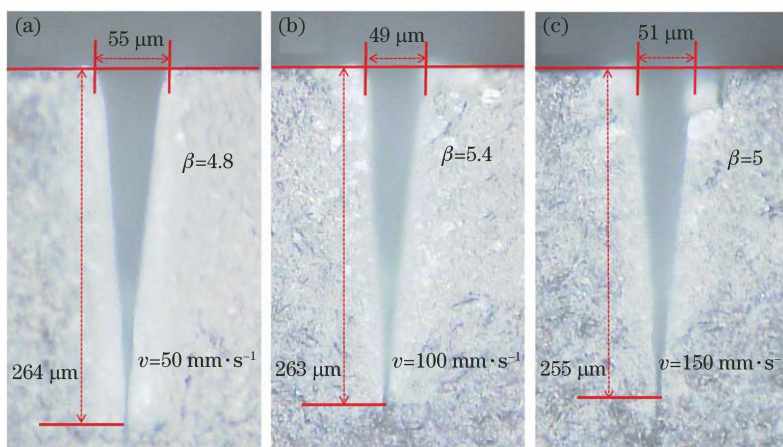


图 12 不同扫描速度下的微槽截面形貌

Fig. 12 Section morphology of microgroove at different scanning speeds

由图 12(a)~(c)可知,微槽宽度大于 $30\ \mu\text{m}$ ($D_0=30\ \mu\text{m}$),考虑到光斑大小约为 $14\ \mu\text{m}$,以及加工时多个激光脉冲的累积烧蚀,在激光沿图 11 所示螺旋环切加工路径加工时,微槽实际宽度小幅度增大,而深度则大大提升,且在 $v=100\ \text{mm/s}$ 时,微槽深宽比 $\beta=5.4$ 。相较于单线刻蚀法加工得到的微槽深宽比 β 最大仅为 2.38,且深度小于 $70\ \mu\text{m}$,螺旋环切法加工得到的微槽深度在 $260\ \mu\text{m}$ 左右,远远超出单线刻蚀得到的深度。

4 结 论

本文采用波长为 $1040\ \text{nm}$ 、脉冲为 $388\ \text{fs}$ 、重复频率为 $100\ \text{kHz}$ 的飞秒激光对石英玻璃表面刻蚀微槽,以共聚焦显微镜为表征手段,测定了石英玻璃的损伤阈值,研究了激光单脉冲能量、扫描速度和扫描次数对石英玻璃微槽深宽比的影响规律,并采用螺旋环切法改善了微槽的深宽比。研究发现:1)实验得到石英玻璃单脉冲损伤阈值为 $10.61\ \text{J/cm}^2$; 2)激光单脉冲能量是影响微槽深宽的主要因素,扫描速度与扫描次数则是通过影响激光脉冲在石英玻璃加工区域的重叠与累积,改变样品加工区域吸收的激光脉冲能量来影响微槽深宽;3)激光单脉冲能量 $E_p=110\ \mu\text{J}$ 、扫描速度 $v=100\ \text{mm/s}$ 、扫描次数为 30 时,可获得大深宽比($\beta=5.4$)的微槽,实验获

图中采用螺旋环切法刻蚀微槽,通过参数 D_0 和 d 可以调整加工区域的激光能量分布,使得能量密度更均匀。而扫描速度主要是影响飞秒激光刻蚀的光斑重叠率。当扫描速度在 $50\sim 150\ \text{mm/s}$ 之间时,光斑重叠率均在 90% 以上。因此较高的重叠率和螺旋环切的刻蚀方式,均能使单位面积上激光的能量密度更均匀,从而使微槽的深度与宽度变化较小。

得的石英玻璃微槽加工参数及其对微槽深宽比的影响规律,对石英玻璃表面微结构制备的研究有一定的借鉴作用。

参 考 文 献

- [1] Sato S, Hidai H, Matsusaka S, et al. Drilling, bonding, and forming conductive path in the hole by laser percussion drilling [J]. Precision Engineering, 2020, 61: 147-151.
- [2] Schrauben J N. Laser ablation and seeding for the preparation of highly transparent copper conductive networks on glass [J]. Journal of Laser Micro, 2019, 14(1): 35-42.
- [3] Hao T T. Applications of focused-ion-beam/focused-electron-beam technology on the fabrication of nanodevices [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018. 郝婷婷. 聚焦离子束/电子束技术在三维纳米器件加工中的应用 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [4] He X L. Research on precision micro-hole machined by EDM-ECM combined processing [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. 何小龙. 精密微孔电火花电化学组合加工技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [5] Gattass R R, Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials [J]. Nature Photonics, 2008, 2(4): 219-225.
- [6] Sugioka K, Cheng Y. Ultrafast lasers: reliable tools for advanced materials processing [J]. Light:

- Science & Applications, 2014, 3(4): e149.
- [7] Sugioka K. Progress in ultrafast laser processing and future prospects [J]. *Nanophotonics*, 2017, 6(2): 393-413.
- [8] Li Z W, Lu H, Li Y W, et al. Near-infrared light absorption enhancement in graphene induced by the tamm state in optical thin films [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0131001.
黎志文, 陆华, 李扬武, 等. 光学薄膜塔姆态诱导石墨烯近红外光吸收增强 [J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0131001.
- [9] Shao J D, Zhu M P, Li J P, et al. Research progress on large size polarizer coating for inertial confinement fusion laser application [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1000001.
邵建达, 朱美萍, 李静平, 等. 惯性约束聚变激光驱动装置用大尺寸偏振薄膜研究综述 [J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1000001.
- [10] He F, Cheng Y. Femtosecond laser micromachining: frontier in laser precision micromachining [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(5): 595-622.
何飞, 程亚. 飞秒激光微加工: 激光精密加工领域的新前沿 [J]. *中国激光*, 2007, 34(5): 595-622.
- [11] Wei C, Ma Y P, Han Y, et al. Femtosecond laser processing of ultrahard materials [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(19): 190003.
魏超, 马玉平, 韩源, 等. 飞秒激光加工超硬材料的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(19): 190003.
- [12] Amorim V A, Maia J M, Viveiros D, et al. Loss mechanisms of optical waveguides inscribed in fused silica by femtosecond laser direct writing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(10): 2240-2245.
- [13] Li M K, Xiang X S, Zhou C H, et al. Two-dimensional grating fabrication based on ultra-precision laser direct writing system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0905001.
李民康, 向显嵩, 周常河, 等. 基于超精密激光直写系统制作二维光栅 [J]. *光学学报*, 2019, 39(9): 0905001.
- [14] Cao X W, Zhang L, Yu Y S, et al. Application of micro-optical components fabricated with femtosecond laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0102004.
曹小文, 张雷, 于永森, 等. 飞秒激光制备微光学元件及其应用 [J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0102004.
- [15] Otuka A J G, Almeida J M P, Tribuzi V, et al. Femtosecond lasers for processing glassy and polymeric materials [J]. *Materials Research*, 2013, 17(2): 352-358.
- [16] Kotz F, Risch P, Arnold K, et al. Fabrication of arbitrary three-dimensional suspended hollow microstructures in transparent fused silica glass [J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 1439.
- [17] Zhang X, Liu K, Wang M D, et al. Etching technology for copper-clad laminates based on femtosecond laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1214003.
张晓, 刘凯, 王明娣, 等. 基于飞秒激光的覆铜板蚀刻工艺 [J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 1214003.
- [18] Zhou P, Wang Y H, Zu C K, et al. Research on low dielectric glass [J]. *Materials Review*, 2016, 30(S1): 290-293.
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.
- [19] Rihakova L, Chmelickova H. Laser micromachining of glass, silicon, and ceramics [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 2015: 1-6.
- [20] Butkus S, Gaizauskas E, Macernytė L, et al. Femtosecond beam transformation effects in water, enabling increased throughput micromachining in transparent materials [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(12): 2405.
- [21] Butkus S. Rapid cutting and drilling of transparent materials via femtosecond laser filamentation [J]. *Journal of Laser Micro*, 2014, 9(3): 213-220.
- [22] Tan Y X, Chu W, Wang P, et al. Water-assisted laser drilling of high-aspect-ratio 3D microchannels in glass with spatiotemporally focused femtosecond laser pulses [J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9(4): 1971.
- [23] Xing S L, Liu L, Zou G S, et al. Effects of femtosecond laser parameters on hole drilling of silica glass [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(4): 0403001.
邢松龄, 刘磊, 邹贵生, 等. 飞秒激光参数对石英玻璃微孔加工的影响 [J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0403001.
- [24] Bulushev E, Bessmeltsev V, Dostovalov A, et al. High-speed and crack-free direct-writing of microchannels on glass by an IR femtosecond laser [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 79: 39-47.
- [25] Shi Y, Xu B, Wu D, et al. Research progress on fabrication of functional microfluidic chips using femtosecond laser direct writing technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(10): 1000001.
史杨, 许兵, 吴东, 等. 飞秒激光直写技术制备功能化微流控芯片研究进展 [J]. *中国激光*, 2019, 46(10): 1000001.
- [26] Mannion P T, Magee J, Coyne E, et al. The effect of damage accumulation behaviour on ablation thresholds and damage morphology in ultrafast laser micro-machining of common metals in air [J]. *Applied Surface Science*, 2004, 233(1/2/3/4): 275-287.
- [27] Yin P Y. A study on ultrafast laser processing for transparent brittle materials [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
尹鹏宇. 超快激光加工透明脆性材料工艺研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.