

## 激光与光电子学进展

## 飞秒激光刻蚀透射式石英玻璃光栅工艺研究

陈燕<sup>1,2</sup>, 陈亮<sup>1,2</sup>, 程立<sup>1,2</sup>, 刘晓东<sup>1,2</sup>, 刘静<sup>1\*</sup>, 熊政军<sup>1</sup><sup>1</sup>中南民族大学激光与智能制造研究院, 湖北 武汉 430074;<sup>2</sup>中南民族大学电子信息工程学院, 湖北 武汉 430074

**摘要** 透射式玻璃光栅可简化光学系统结构,降低调制难度和成本,在紧凑型微小型分光仪和光谱系统中应用广泛。因玻璃材料脆、硬等特点,传统加工技术已无法满足现代工业日益增长的需求。采用波长为 1040 nm、重复频率为 100 kHz、脉冲宽度为 388 fs 的飞秒激光刻蚀透射式石英玻璃光栅,重点研究了激光功率  $P$ 、扫描速度  $v$ 、重复扫描层数  $N$  对石英玻璃光栅刻痕宽度和深度的影响。此外,使用氦氖激光器(波长为 632.8 nm)对已刻蚀石英玻璃光栅样品进行衍射效率测试,利用 CCD 记录光栅衍射图样,通过灰度重心法得到其衍射效率。在实验中,当激光功率为 442 mW,扫描速度为 380 mm/s,重复扫描层数为 10 时,刻蚀的光栅刻痕宽度  $d$  约为 5.67  $\mu\text{m}$ ,光栅周期  $D$  约为 8.17  $\mu\text{m}$ ,测得该石英玻璃光栅的 0 级、-1 级和 +1 级衍射效率分别为 24.98%、31.80% 和 31.04%。

**关键词** 飞秒激光加工; 石英玻璃; 透射式光栅; 光栅衍射效率

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0714006

## Preparation of Transmission Quartz Glass Grating via Femtosecond Laser Etching

Chen Yan<sup>1,2</sup>, Chen Liang<sup>1,2</sup>, Cheng Li<sup>1,2</sup>, Liu Xiaodong<sup>1,2</sup>, Liu Jing<sup>1\*</sup>, Xiong Zhengjun<sup>1</sup><sup>1</sup>*Laser and Intelligent Manufacturing Research Institute, South-Central University for Nationalities, Wuhan, Hubei 430074, China;*<sup>2</sup>*Electronic Information Engineering Institute, South-Central University for Nationalities, Wuhan, Hubei 430074, China*

**Abstract** The transmissive glass grating is commonly used in compact micro spectrometers and spectroscopy systems which can simplify the structure of optical system and reduce the complexity and expense of modulation. Traditional manufacturing methods have been unable to meet the increasing demands of modern industry due to the brittle and hard characteristics of glass materials. The transmission quartz glass gratings were etched using a femtosecond laser with wavelength of 1040 nm, repetition rate of 100 kHz, and pulse width of 388 fs. And the effects of laser power  $P$ , scanning speed  $v$ , and repeated scanning layer  $N$  on the etching depths and widths of quartz glass gratings have been investigated. Furthermore, the diffraction efficiency of the etched quartz glass grating sample was measured using a helium-neon laser (wavelength: 632.8 nm). The grating diffraction pattern was recorded by a CCD, and the diffraction efficiency was calculated using the gray-scale center of gravity method. In the experiment, under the condition that laser power was 442 mW, scanning speed was 380 mm/s, and scanning times was 10, the etched grating width  $d$  was 5.67  $\mu\text{m}$  and the grating period  $D$  was 8.17  $\mu\text{m}$ . The testing results show

收稿日期: 2021-05-06; 修回日期: 2021-06-11; 录用日期: 2021-06-29

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基金(CZQ20018)、湖北省科技重大专项(2020AAA003)、中南民族大学院科研基金(YZZ17005)、中南民族大学基本科研业务费专项资金(CZP20009)

通信作者: jingliu@scuec.edu.cn

that the zero-order, positive first-order and negative first-order diffraction efficiency of the quartz glass grating are 24.98%, 31.80% and 31.04%, respectively.

**Key words** femtosecond laser processing; quartz glass; transmission grating; grating diffraction efficiency

## 1 引言

光栅是一种具有周期性结构的分光元件,被广泛应用于分光仪器和光谱分析<sup>[1]</sup>系统中。按其工作方式可分为反射式和透射式。其中,透射式光栅<sup>[2]</sup>由透明材料表面刻蚀周期性结构而成,具有大带宽、高衍射效率和高损伤阈值等特性。透射光栅能够简化光学系统、降低调制难度且成本较低,因此在电子通信、生物医疗和微电子器件等领域<sup>[3-5]</sup>应用十分广泛。相较于其他透明材料,石英玻璃具有热膨胀系数较低、化学性质稳定、耐酸耐碱、绝缘性能优良、在紫外和红外波段光学损耗低等<sup>[6]</sup>优异特征,是制备透射式玻璃光栅不可缺少的理想材料之一。随着微型化、集成化、高效率的光学系统需求日益加大,光栅朝着尺寸小、性能优良和类型多样等方面发展,但因玻璃材料具有高硬度、高脆性和耐化学腐蚀性等特性,传统的加工方法如机械研磨和抛光<sup>[7]</sup>、磨料喷射、化学刻蚀<sup>[8]</sup>等,会在加工过程中产生裂纹且加工效率低下,难以进行高精度微米量级光学器件加工,无法满足制造业日益增长的需求。

近年来,新型的微型光栅制备方式取得了突破性进展,如电子束曝光法<sup>[9]</sup>和聚焦离子束曝光法<sup>[10]</sup>制备高频率光栅,纳米压印法<sup>[11]</sup>制备栅线频率高的光栅,以及激光干涉法<sup>[12-13]</sup>制备硅光栅等。而激光技术<sup>[14-15]</sup>作为一种新型加工技术,能够将高功率激光的能量聚焦至待加工玻璃表面或者内部,使得材料瞬间融化或者汽化,实现非接触加工。相较于常规加工方式,激光刻蚀具有无接触、功率高、加工速度快等<sup>[16]</sup>优势,在石英玻璃微加工领域具有广泛的应用价值和研究意义<sup>[16-17]</sup>。按照激光脉冲宽度,激光刻蚀玻璃又分为纳秒激光刻蚀<sup>[18]</sup>、皮秒激光刻蚀<sup>[19]</sup>以及飞秒激光刻蚀<sup>[20]</sup>。与皮秒激光加工、纳秒激光加工相比,飞秒激光加工<sup>[21]</sup>两个最显著的特点是超高峰值功率<sup>[22]</sup>和超短脉冲持续时间<sup>[23]</sup>:前者诱导材料在激光辐照下出现非线性吸收,具有更小的吸收区域;后者在加工过程中,控制材料与激光的相互作用时间,减少热扩散区域,两者极大地提高了激光加工的精度,使其在高精度微加工领域<sup>[24]</sup>占得一席之地。余浩锋等<sup>[25]</sup>采用波长

为 1030 nm、脉宽为 290 fs、重复频率 50 kHz 的飞秒激光在石英玻璃上刻蚀凹槽制备亚微米金属线,研究揭示了不同脉冲能量激光与烧蚀凹槽以及金属线宽的关系。近年来,飞秒脉冲激光刻蚀微纳结构<sup>[20, 26]</sup>已获得较大进展,而国内关于飞秒激光加工脆性材料<sup>[27]</sup>的相关工艺开发进展缓慢,亟待深入探索。

因此,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,探究激光功率  $P$ 、扫描速度  $v$ 、重复扫描层数  $N$  对石英玻璃光栅刻痕宽度和深度的影响,为制备符合市场需求的透射式石英玻璃光栅提供有价值的借鉴和参考。

## 2 实验设备与方法

图 1 为飞秒激光刻蚀石英玻璃光栅的加工系统示意图。飞秒激光器是 Newport Corporation 公司的 SPIRIT 16-HE-SHG,激光器波长为 1040 nm,重复频率为 100 kHz,平均功率最高为 16 W,脉冲宽度为 388 fs,激光光斑大小约为 14  $\mu\text{m}$ 。扫描振镜 (hurrySCAN, Scanlab) 通光直径为 15 mm,光束扫描位移范围为 72 mm,最大扫描速度为 6 m/s。实验仪器中三维运动平台最大位移距离为 200 mm,最小位移距离为 1  $\mu\text{m}$ ,垂直 Z 向定位器最小位移精度达到 1  $\mu\text{m}$ 。飞秒激光通过反射镜 M1、M2 进入扩束镜,扩束后经反射镜 M3 进入扫描振镜中,经场镜 (焦距  $f=100$  mm) 聚焦至待加工样品上。其中,待加工样品被真空吸附板固定。

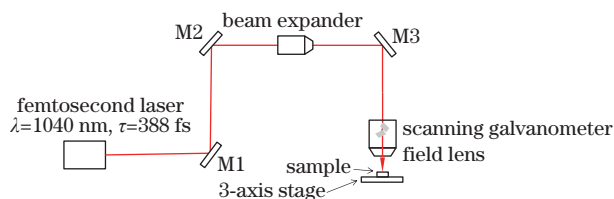


图 1 飞秒激光刻蚀石英玻璃光栅的加工系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of femtosecond laser etching quartz glass grating

实验样品是戴尔蒙科技公司的 JGS1 紫外石英片,长 20 mm,宽 20 mm,厚 1 mm,折射率  $n=1.46$ 。实验开始之前用无水乙醇对石英片表面清洗擦拭,尽量避免实验样品表面杂质对实验结果的影响。

光栅结构是由飞秒激光刻蚀石英玻璃表面产

生大面积相互平行且等宽的刻痕形成。表征光栅性能的两个关键参数分别为光栅周期  $D$  和刻痕宽度  $d$ 。 $d$  主要由激光工艺参数决定,而  $D$  主要由 CAD 制图软件绘制的刻蚀图案控制。其中,在本实验中  $D$  由 CAD 制图软件固定设置为  $8\ \mu\text{m}$ ,如图 2(a) 所示。实

验中将飞秒激光聚焦到样品表面,利用扫描振镜控制激光束的偏转,并配合激光聚焦系统,实现聚焦光斑自上而下地刻蚀石英玻璃,如图 2(b) 所示。因此石英玻璃表面的未刻蚀部分与刻蚀部分形成明暗相间的周期性结构,从而得到透射式玻璃光栅。

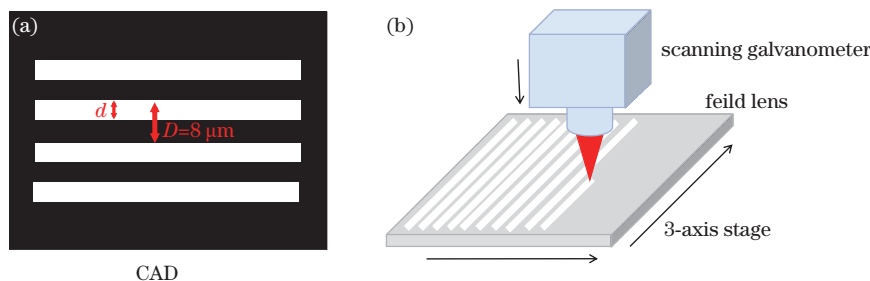


图 2 激光刻蚀方式示意图。(a) 飞秒激光刻蚀轨迹(光栅结构)的 CAD 图;(b) 飞秒激光自上而下刻蚀方法  
Fig. 2 Schematic diagram of laser etching method. (a) CAD drawing of femtosecond laser etching path (gratings); (b) method of top-down femtosecond laser processing

### 3 实验结果与分析

飞秒激光对石英玻璃产生损伤的过程中涉及到材料内部自由电子数密度的变化情况,而材料内部的自由电子数密度变化过程极为复杂,至今仍是研究者们努力攻克的难题。由于石英玻璃本身几乎不含自由电子,且吸收激光能量较低,主要依赖于超快激光的极高峰值强度,通过多光子电离或隧穿电离等方式,使得束缚电子成为自由电子,进而以雪崩电离的形式实现对激光能量的吸收。在这些过程中,激光功率、扫描速度、重复扫描层数以及被刻蚀材料物理性质等参数,与刻蚀效果密切相关。因此,本节将重点研究飞秒激光的加工参数,如激光功率  $P$ 、扫描速度  $v$ 、重复扫描层数  $N$  等,对石英玻璃光栅刻痕宽度和深度的影响规律。此外,需要说明的是,刻蚀光栅不同于刻

蚀单槽,在大面积上对激光均匀性要求高,且成品率和重复性相对较差。

#### 3.1 飞秒激光功率对光栅刻痕宽度和深度的影响

图 3(a)、3(b) 是重复扫描层数  $N=8$ 、激光功率  $P$  分别为 363、403、442 mW 时,光栅刻痕宽度和深度随扫描速度变化的趋势图,实验中误差棒由多组数据标准差构成。由图 3(a) 可知,石英玻璃表面光栅刻痕宽度随着激光功率增大而增大。这是由于飞秒激光脉冲能量近似呈高斯分布,光斑中心处能量高、边缘能量低。当激光功率变大时,刻蚀区域边缘能量密度超过石英玻璃损伤阈值,导致刻痕宽度增大。由图 3(b) 可知,随着激光功率增大,光栅刻痕深度增大,但值得注意的是,在激光功率  $P \leq 442\ \text{mW}$ ,扫描速度  $200\ \text{mm/s} < v < 400\ \text{mm/s}$  时,刻痕深度的变化在  $1\ \mu\text{m}$  以内。在光栅刻蚀过程中,激光功率过小时,刻痕深度几乎为零;当激光功

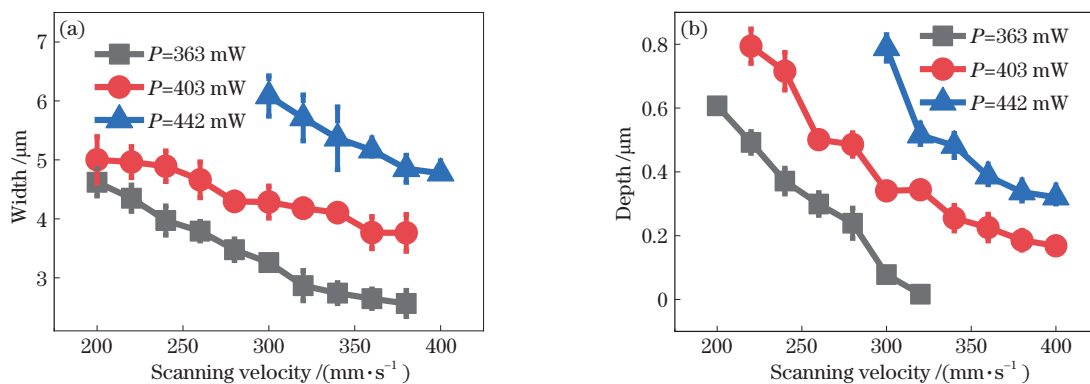


图 3 激光功率对刻痕宽度和刻痕深度的影响。(a) 刻痕宽度;(b) 刻痕深度  
Fig. 3 Effects of laser power on etching width and etching depth. (a) Etching width; (b) etching depth

率过大时,刻痕宽度则超过预设定的光栅周期宽度。

### 3.2 扫描速度对光栅刻痕宽度和深度的影响

图 4(a)、4(b)是在激光功率  $P=363\text{ mW}$  的实验条件下,不同扫描速度与石英玻璃表面刻痕宽度和深度的关系图。由图 4(a)可知,刻痕宽度随扫描速度  $v$  的增大而减小。这主要是由于激光扫描速度  $v$  直接影响相邻激光脉冲叠加比例,扫描速度  $v$  越大,加工点间距越大,单位体积内石英玻璃能吸收的能量越小,因此被刻蚀区域线宽变小。在  $v>320\text{ mm/s}$

时,刻痕宽度变小的趋势逐渐平缓,这是由于扫描速度较大,激光脉冲叠加比例较小,接近于单脉冲刻蚀石英玻璃,此时扫描速度不再是影响线宽的主要因素。由图 4(b)可知,刻痕深度与扫描速度基本成反比关系。这是由于激光扫描速度变大时,激光脉冲叠加减小,导致作用在石英玻璃表面的能量密度减少,刻蚀量降低导致深度减小。此外,由于扫描速度相对较高 ( $v>200\text{ mm/s}$ ),被刻蚀的石英玻璃深度均在  $1\text{ }\mu\text{m}$  以下。

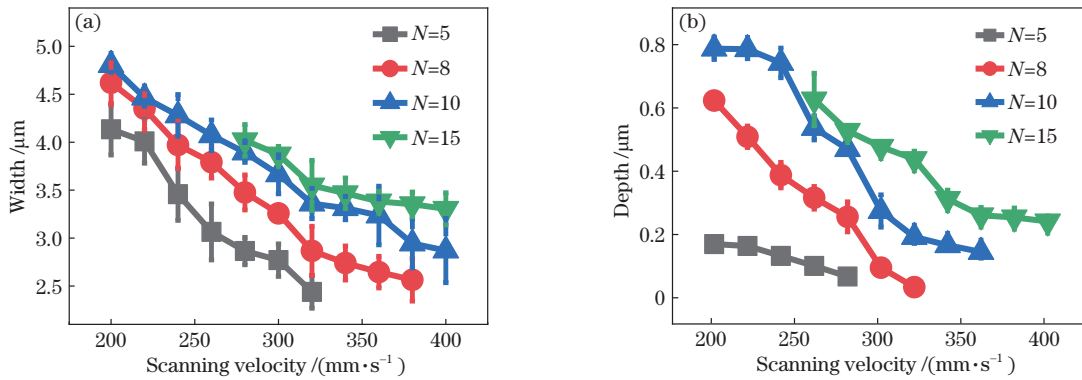


图 4 扫描速度对刻痕宽度和刻痕深度的影响。(a)刻痕宽度;(b)刻痕深度

Fig. 4 Effects of scanning velocity on etching width and etching depth. (a) Etching width; (b) etching depth

### 3.3 重复扫描层数对光栅刻痕宽度和深度的影响

图 5(a)、5(b)是在激光平均功率  $P=363\text{ mW}$  下,不同重复扫描层数与光栅刻痕宽度和深度的关系图。由图 5(a)可知,在扫描速度相同时,石英玻璃表面光栅刻痕宽度整体随重复扫描层数的增加而增大。由于加工的激光光束是高斯光束,随着激光多次扫描,烧蚀材料的损伤阈值因结构变化而降低<sup>[28]</sup>,导致激光束边缘部分的能量也足以烧蚀材

料,因此被刻蚀区域宽度变大。但值得注意的是,当  $N>8$  次时,刻痕宽度随着重复扫描层数增多并没有明显增大,说明当重复扫描层数  $N>8$  时,单位面积上的脉冲数量并不是影响刻痕宽度的主要原因。由图 5(b)可知,刻痕深度随着激光重复扫描层数  $N$  增加而增大。主要原因是随着重复扫描层数增多,激光脉冲能量在加工区域逐渐累积,使得刻痕深度不断加深。

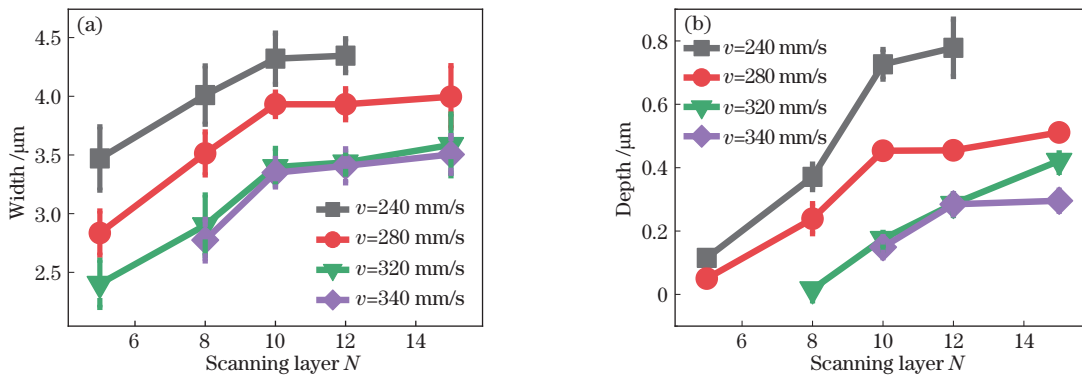


图 5 重复扫描层数对刻痕宽度和刻痕深度的影响。(a)刻痕宽度;(b)刻痕深度

Fig. 5 Effects of repeated scanning layers on etching width and etching depth. (a) Etching width; (b) etching depth

## 4 刻蚀光栅衍射效率测试

图 6(a)为刻蚀参数  $P=442\text{ mW}$ ,  $v=380\text{ mm/s}$ ,

$N=10$  时光栅的显微镜图。右上方的插图为黑色框图的高倍显微镜示意图,可清晰看到明暗相间的光栅结构。图 6(b)是刻蚀光栅的三维共聚焦显微镜



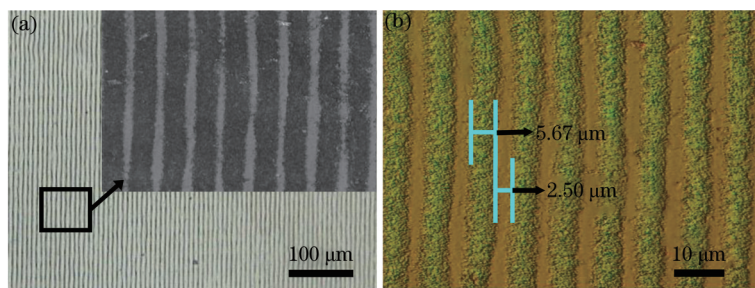


图 6 典型刻蚀光栅。(a)刻蚀光栅的显微镜图;(b)刻蚀光栅的三维共聚焦显微镜彩色形貌图

Fig. 6 Typical etched grating. (a) Microscope image of etched grating; (b) three-dimensional confocal microscope colour morphology image of etched grating

彩色形貌图。在图示中,被刻蚀的石英玻璃平均宽度为  $5.67 \mu\text{m}$ ,未被刻蚀的石英玻璃平均宽度为  $2.50 \mu\text{m}$ 。

图 7 为测量透射式石英玻璃光栅衍射效率的实验装置示意图。波长为  $632.8 \text{ nm}$  的 He-Ne 激光被两个平凸透镜组成的扩束镜扩束后,依次经过 T1、T2、T3 三个衰减片(透过率  $T$  分别为  $10\%$ 、 $32\%$ 、

$50\%$ )和光阑 D,最后入射至实验制备的透射光栅上,获得的衍射光被高速 CCD 采集。之后,利用 Matlab 分析软件导入 CCD 相机采集的光栅衍射各级光强分布图,并将彩色图片灰度化后,可分别计算光强分布的灰度值。通过计算各衍射能级光强与初始光强(未加光栅时)之比,即得透射光栅的各级衍射效率。

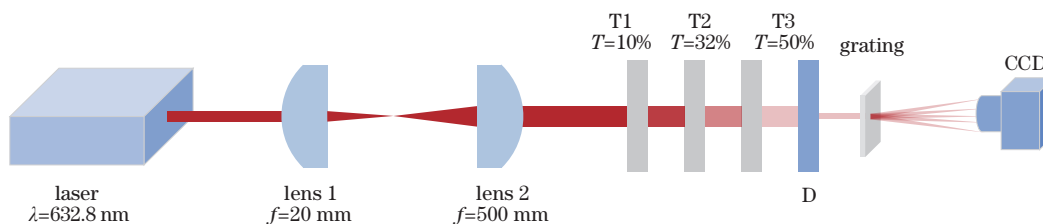


图 7 测量石英玻璃光栅衍射效率的实验装置

Fig. 7 Experimental setup for measuring diffraction efficiency of quartz glass grating

图 8(a)为高速 CCD 相机采集的原始光斑(未放置光栅);图 8(b)为放置刻蚀光栅的衍射光斑(-1 级、0 级和 1 级)。通过测量和分析,0 级光斑强

度较弱,且 0 级衍射效率为  $24.98\%$ , -1 级和 +1 级的衍射效率分别为  $31.80\%$  和  $31.04\%$ 。

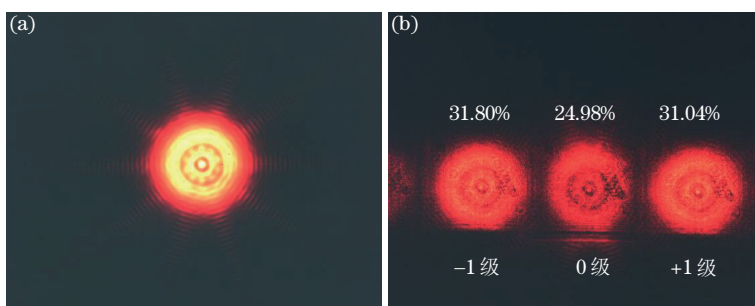


图 8 CCD 记录的光斑。(a)无光栅时原始光斑;(b)有光栅时衍射光斑(-1 级、0 级和 +1 级)

Fig. 8 Spot recorded by CCD. (a) Original spot without grating; (b) diffraction spot with grating (-1st, 0th and +1st)

## 5 结 论

通过飞秒激光刻蚀石英玻璃的实验,分析各激光参数(激光功率、扫描速度、重复扫描层数)对光栅刻痕深度和宽度的影响规律,并测量和计算了透射式玻

璃光栅的衍射效率,为后续制备高衍射效率的透射式石英玻璃光栅提供了技术支持。飞秒激光刻蚀微型透射式石英玻璃光栅,无需掩模、工艺简单、加工速度快,有望在工业上实现批量加工生产,促进以光栅为基础的各种光学元器件的微型化和集成化。

## 参 考 文 献

- [1] Lu J Y, Liang D K, Zhang X L, et al. Spectral analysis of fiber Bragg grating modulated by double long period grating and its application in smart structure monitoring[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(12): 3429-3433.  
芦吉云, 梁大开, 张晓丽, 等. 双长周期光栅调制的光纤光栅光谱分析及其在智能结构监测中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(12): 3429-3433.
- [2] Cheng Y S. Research on polarization-independent transmission grating[D]. Suzhou: Soochow University, 2018.  
程于水. 偏振无关透射光栅的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2018.
- [3] Zhang B, Li Z Q, Wang L, et al. Research advances in laser crystal optical waveguides fabricated by femtosecond laser direct writing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(11): 111415.  
张彬, 李子琦, 王磊, 等. 飞秒激光直写激光晶体光波导的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(11): 111415.
- [4] Wang J C, Zhang F T, Qiu J R. Research progress on single femtosecond laser induced nanogratings in glass: fundamentals and applications[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(1): 0102001.  
王珏晨, 张芳腾, 邱建荣. 单光束飞秒激光诱导玻璃内部纳米光栅机理及应用研究进展[J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0102001.
- [5] Liu J, Zheng M, Xiong Z, et al. 3D dynamic motion of a dielectric micro-sphere within optical tweezers[J]. Opto-Electronic Advances, 2021, 4(1): 200015.
- [6] Ge S M. A brief history of the development of quartz glass[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 1982, 1(5): 51-60.  
葛世名. 石英玻璃的发展简史[J]. 硅酸盐通报, 1982, 1(5): 51-60.
- [7] Zhang L L. Study on optimization of technological parameters of echelle grating mechanical scribing[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012.  
张垒奎. 中阶梯光栅机械刻划工艺参数优化研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- [8] Zhou L S, Yang L M, Yang C L. Wet chemical etching technology[M]//2002 annual report of China academy of engineering physics. Beijing: China Atomic Energy Press, 2002: 311-312.  
周礼书, 杨李茗, 杨春林. 湿法化学刻蚀技术[M]//中国工程物理研究院科技年报(2002). 北京: 中国原子能出版社, 2002: 311-312.
- [9] Xie H M, Kishimoto S, Li Y J, et al. Fabrication of micro-moiré gratings on a strain sensor structure for deformation analysis with micro-moiré technique[J]. Microelectronics Reliability, 2009, 49(7): 727-733.
- [10] Hao T T. Applications of focused-ion-beam/focused-electron-beam technology on the fabrication of nanodevices[D]. Beijing: Institute of Physics, 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: 中国科学院物理研究所, 2018.
- [11] Chou S Y, Krauss P R, Renstrom P J. Imprint of sub-25 nm vias and trenches in polymers[J]. Applied Physics Letters, 1995, 67(21): 3114-3116.
- [12] Bai Y F, Fan J, Zou Y G, et al. Fabrication of gratings used in 976 nm distributed feedback lasers based on laser interference lithography[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(12): 120501.  
白云峰, 范杰, 邹永刚, 等. 激光干涉光刻制备 976 nm 分布反馈式激光器光栅[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 120501.
- [13] Tan B, Sivakumar N R, Venkatakrishnan K. Direct grating writing using femtosecond laser interference fringes formed at the focal point[J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2005, 7(4): 169-174.
- [14] Zhu X N, Bao W X. Fundamentals of ultrashort pulse laser and its applications[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1200001.  
朱晓农, 包文霞. 超短脉冲激光及其相关应用的一些基本知识[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1200001.
- [15] Liu X D, Chen L, Wang X Z, et al. Micromilling blind holes in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics using UV laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 051405.  
刘晓东, 陈亮, 王曦照, 等. 紫外激光微铣削 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷盲孔的工艺研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 051405.
- [16] Wang J L, Zhan X, Sun P. Research development of laser processing transparent crystal and glass[J]. Applied Laser, 2018, 38(3): 485-495.  
王婕丽, 詹鑫, 孙裴. 激光加工透明晶体与玻璃的研究进展[J]. 应用激光, 2018, 38(3): 485-495.
- [17] Wu D J, Zhou S Y, Ma G Y, et al. Experiment of quartz glass flute precise thinning by femtosecond laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(3): 0303009.  
吴东江, 周思雨, 马广义, 等. 飞秒激光精密减薄石英玻璃凹槽实验[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303009.

- [18] Zhang H, Zhou Y, Zhou L, et al. Fabrication of micro-grating structures by nanosecond laser ablation of chrome film on glass substrate[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(2): 241-244.  
张恒, 周云, 周雷, 等. 纳秒激光刻蚀玻璃基质铬薄膜直写微光栅结构[J]. *光子学报*, 2009, 38(2): 241-244.
- [19] Li Y, Zhu Y. Research of quartz glass precise scribing by 1064 nm picosecond laser[J]. *Laser Journal*, 2015, 36(1): 132-134.  
李勇, 朱芸. 利用 1064 nm 皮秒激光加工石英玻璃精密划线工艺研究[J]. *激光杂志*, 2015, 36(1): 132-134.
- [20] 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.  
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.
- [21] Bian Y C, Wang Y L, Xiao Y, et al. Controllable micro/nano structure surface fabricated by femtosecond laser and its applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(11): 111406.  
边玉成, 王宇龙, 肖轶, 等. 飞秒激光制备可控微纳米结构表面及应用研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(11): 111406.
- [22] Li L, Huang S H, Mu C J, et al. New development of high-power femtosecond pulse laser[J]. *Optical Technique*, 2002, (6): 528-530, 532.  
李隆, 黄圣鸿, 穆参军, 等. 高功率飞秒脉冲激光器的进展[J]. *光学技术*, 2002, (6): 528-530, 532.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Yu H F, Xu J, Zhang A D, et al. Fabrication of embedded submicron metal lines on glass surfaces[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0502009.  
余浩锋, 徐剑, 张傲东, 等. 玻璃表面嵌入式亚微米金属线的制备[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0502009.
- [26] Wang L. Laser fabrication of large-area periodic micro/nano-structures[D]. Changchun: Jilin University, 2015.  
王磊. 大面积周期性微纳结构的激光制备研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [27] Li J Q, Yan J F, Li X, et al. Research advancement on ultrafast laser microprocessing of transparent dielectrics[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(2): 0202019.  
李佳群, 闫剑锋, 李欣, 等. 透明介质材料的超快激光微纳加工研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(2): 0202019.
- [28] Wang R, Yang J J, Liang C Y, et al. Femtosecond laser ablation of silicon wafers in air and water[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(8): 5429-5435.  
王锐, 杨建军, 梁春永, 等. 飞秒激光在空气和水中对硅片烧蚀加工的实验研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(8): 5429-5435.