

引用格式: LU Yiming, GAO Bingrong, LIU Xueqing, et al. Fabrication of High Temperature Resistant Geometric Phase Element Inside Sapphire by Femtosecond Laser(Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(6):0650107

卢轶明,高炳荣,刘学青,等.飞秒激光制备耐高温蓝宝石内部几何相位波带片(特邀)[J].光子学报,2021,50(6):0650107

飞秒激光制备耐高温蓝宝石内部几何相位 波带片(特邀)

卢轶明,高炳荣,刘学青,陈岐岱

(吉林大学 电子科学与工程学院 集成光电子国家重点实验室, 长春 130012)

摘 要:针对晶体材料几何相位元件加工难、精度低、效果差等问题,提出了利用飞秒激光诱导纳米条纹技术来实现材料内部几何相位衍射元件的制备。飞秒激光近阈值加工方式有效的提升了加工精度,其精度为 340 nm。通过实时调控扫描激光的偏振可以精准控制诱导纳米条纹的方向,进而改变晶体双折射效应的慢轴方向。基于该方法实现了蓝宝石内部几何相位波带片的有效制备,器件形貌良好、无裂纹,可用于高温环境下聚焦。

关键词:飞秒激光;微光学元件;几何相位;蓝宝石;高温成像;内部加工

中图分类号:TN249

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215006.0650107

Fabrication of High Temperature Resistant Geometric Phase Element Inside Sapphire by Femtosecond Laser(Invited)

LU Yiming, GAO Bingrong, LIU Xueqing, CHEN Qidai

(State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering,
Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: Aiming at the problems of difficult processing, low precision and poor effect of fabricating geometric phase elements in crystal materials, a femtosecond laser-induced nano-grating technology was proposed to fabricate the internal geometric phase diffraction elements. The femtosecond laser near-threshold processing method effectively improves the processing accuracy and the fabricating accuracy is 340 nm. By adjusting the polarization of the scanning laser, the direction of the induced nano-grating can be accurately controlled, leading to the change of the slow axis direction of the crystalline birefringence. Based on this method, the geometric phase Fresnel zone plate in sapphire has been fabricated. The device has a good morphology with no cracks and excellent optical performance, which can be used for focusing in high-temperature environments.

Key words: Femtosecond laser; Micro-optical elements; Geometric phase; Sapphire; Imaging in high-temperature; Internal fabrication

OCIS Codes: 140.7090; 130.3990; 140.3390

0 引言

传统光学元件通过控制材料的厚度或折射率来改变光程差进而操纵光的特性。虽然传统光学元件制

基金项目:国家重点研发计划(No.2017YFB1104600)

第一作者:卢轶明(1994—),男,博士研究生,主要研究方向为飞秒激光微纳加工。Email: 13180893370@163.com

导师(通讯作者):高炳荣(1976—),女,副教授,博士,主要研究方向为飞秒激光微纳加工。Email: brgao@jlu.edu.cn

收稿日期:2021-04-15;录用日期:2021-06-08

<http://www.photon.ac.cn>

造方面已有数十年的经验,但是,到目前为止,器件的精度和质量仍然是一个挑战。近年来,平面光学的发展突破了传统光学的局限性,实现了超薄平面元件。它的工作原理是利用亚波长尺寸的特定单元在空间上对光相位进行调控^[1-7]。目前,从透镜^[8]、光栅^[9]、涡旋相位板^[10]到能够以不同方式弯曲光线的元件^[11],几乎所有光学元件的不同相位轮廓都已经被证明可以通过等离子体超表面或者介电梯度超表面来实现^[12]。目前多种技术已经实现了表面浮雕型几何相位元件的制备,但是表面几何相位微光学元件的光学性能易受环境变化的影响。将微光学元件雕刻在晶体材料内部能够有效解决外部环境对器件性能的影响,然而在晶体材料内部实现纳米尺度几何相位的调制对加工技术提出了苛刻的要求。

目前,飞秒激光双光子聚合技术已经证明可以在聚合物材料上制备任意真三维微光学元件^[18-22],形貌保真度高、表面光滑、光学效果优异。然而,聚合物材料热稳定性差,在超过两百摄氏度的环境下,聚合物材料会融化,光学结构塌陷。晶体材料具有更高的热稳定性、化学稳定性。其中,蓝宝石的熔点在2 000℃以上,激光作用之后非晶态的蓝宝石的重结晶转化温度也在1 260℃。基于蓝宝石材料的微光学器件可用于更高温的环境下,这是其他材料所不具有的特性。

虽然蓝宝石材料性能优良,但是关于蓝宝石材料的内部微纳光学器件的工作还相对较少,究其原因缺乏可行的加工技术。飞秒激光可以聚焦在透明材料内部而不损伤材料的表面,高峰值功率的激光瞬间对材料破坏,破坏区域仅为百纳米,百纳米级的破坏区域为晶体材料内部超精细光学结构的制备提供了先决条件^[13]。超短脉冲照射后的透明材料会出现自组织的亚波长的周期结构,称之为纳米条纹^[14]。纳米条纹的方向皆垂直于入射激光的偏振方向。这些热稳定纳米结构的双折射值为负,量级在 10^{-2} 和 10^{-3} 之间,与石英、红宝石等单轴晶体的自然双折射顺序相同^[15]。这些理论为晶体内部几何相位元件的制备提供理论支持。

本文利用飞秒激光直写技术在蓝宝石内部制备了高性能的几何相位菲涅尔波带片。通过控制飞秒激光扫描的参数(功率、重复频率、偏振)来降低激光扫描的线宽度和激光扫描后结构的纳米条纹的方向,进而控制激光诱导结构双折射的慢轴方向。精准控制激光扫描器件不同区域的激光偏振,可以实现晶体材料内部光学性能优异的四阶几何相位菲涅尔波带片。经验证,该器件可用于高温环境下的光学聚焦,聚焦效果不会随着温度的提升而有明显的变化。

1 飞秒激光高精度加工

1.1 激光重复频率对加工精度的影响

飞秒激光的重复频率为激光每秒作用在材料的脉冲个数。在相同扫描速度的情况下,激光的重复频率决定了飞秒激光扫描时脉冲与脉冲的间隔。当飞秒激光作用在材料上时,高峰值功率的激光会瞬间将蓝宝石晶态转变为等离子体态,进一步加强材料对光的吸收。在脉冲与材料作用区域会产生10 Tpa的应力和 10^5 K的升温^[16]。如果脉冲之间的间距过小,激光热作用明显,激光作用后无定形的区域会发生重结晶现象^[17]。

实验中,将基频为1 030 nm的飞秒激光三倍频后得到波长为343 nm的紫外激光(Light Conversion),激光的脉冲宽度为230 fs。激光经过一个20倍,数值孔径为0.5的物镜后聚焦在样品上,聚焦直径为 $d = 1.22\lambda/NA = 836$ nm,其中NA为数值孔径。通过一个三轴PI压电位移平台来控制样品精准运动(精度为1 nm, x 、 y 轴的行程为1.5 mm, z 轴的行程为100 μ m),实现样品三维联动扫描。为了控制激光扫描时长和压电平台的稳定,将扫描速度设置为400 μ m/s。

实验中,首先验证飞秒激光的重复频率对加工精度的影响。在调控激光的重复频率时不改变激光的单脉冲能量。图1(a)~(h)分别是激光重复频率为2 kHz(2 000 Hz)、5 kHz、10 kHz、50 kHz、100 kHz、500 kHz、1 000 kHz和5 000 kHz扫描后的电子扫描显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)的照片。从图中可以看出,线条周围几乎没有任何损伤。在单脉冲能量相同时(12 nJ),激光的重复频率对激光加工的精度影响不大,激光扫描后的线宽都在400 nm附近,如图1(i)所示。

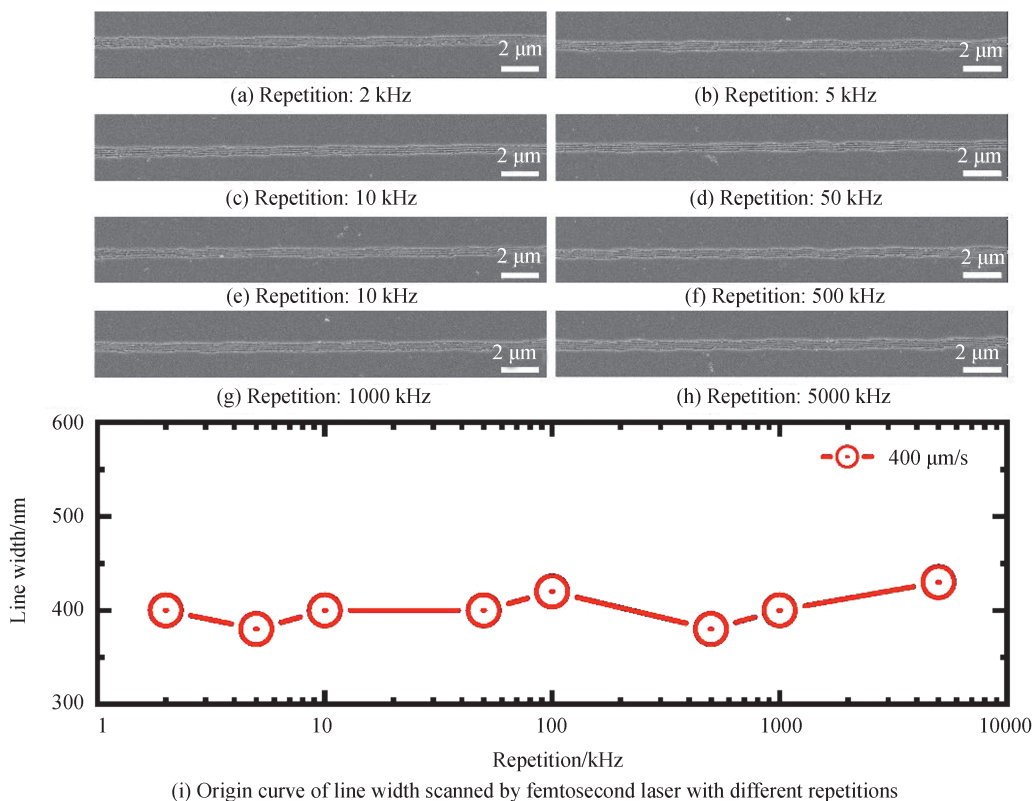


图1 激光重复频率对激光扫描精度的影响
 Fig.1 Influence of laser repetition on laser scanning accuracy

1.2 激光功率对加工精度的影响

激光的单脉冲能量决定了激光扫描后的线宽。本实验选用的激光波长为 343 nm, 聚焦物镜的数值孔径

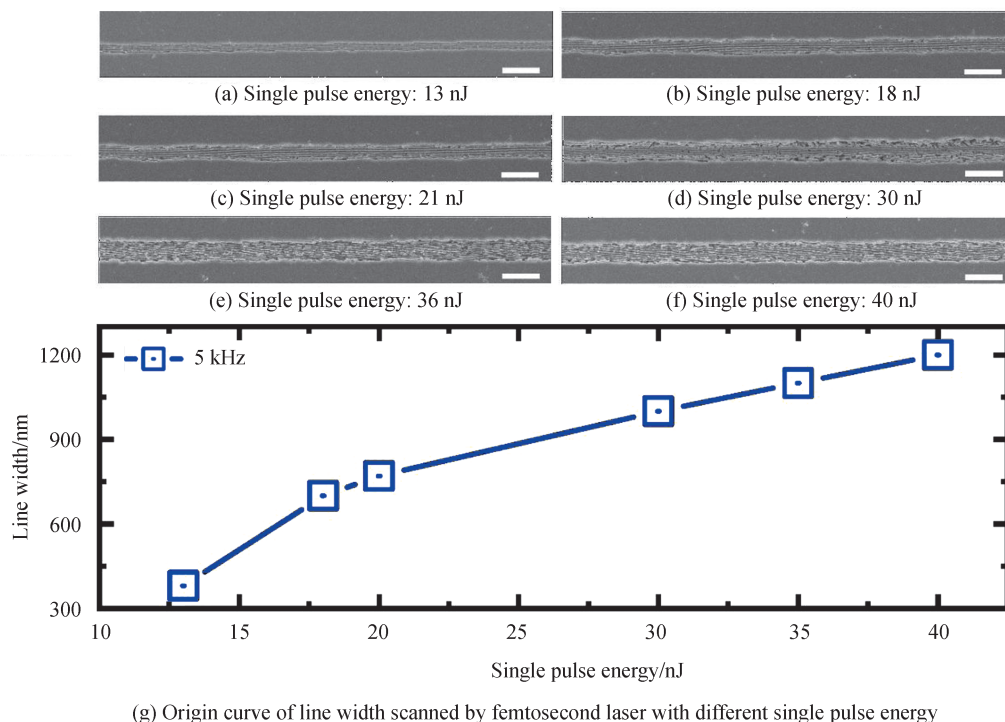


图2 激光功率对激光扫描精度的影响
 Fig.2 Influence of laser energy on laser scanning accuracy

为0.5,经计算衍射极限为836 nm。然而飞秒激光聚焦光斑呈高斯型分布,激光的能量主要集中在光斑的中心,这就为飞秒激光超衍射极限加工提供了理论基础。这里使用不同的激光功率对蓝宝石晶体表面进行划线扫描,线条形貌如图2(a)~2(f)所示。可以看出,随着激光能量的增加,材料的损伤程度也越大。由图2(g)可以看出,当单脉冲能量远大于材料损伤阈值时(10 nJ),激光扫描的线宽与飞秒激光的单脉冲能量成正比。而当激光单脉冲能量近似于激光损伤阈值时,激光扫描精度会有明显的提升,经优化参数后得到的线宽最小仅为340 nm。

2 激光诱导纳米条纹及双折射现象

2.1 激光诱导纳米条纹

高功率的激光聚焦在样品产生等离子体,等离子体与入射激光发生干涉,诱导表面或者内部产生亚波长周期的纳米条纹。激光诱导亚波长周期性条纹的排列方向与激光的偏振方向相关,为了探究激光偏振方向与纳米条纹的平行方向的关系,通过调控1/2波片来实时精确的控制入射激光的偏振方向,得到了一系列不同激光偏振方向诱导纳米条纹的图片,如图3(a)~(f)所示。可以看出,飞秒激光诱导纳米条纹的平行方向永远与入射激光的偏振方向垂直。

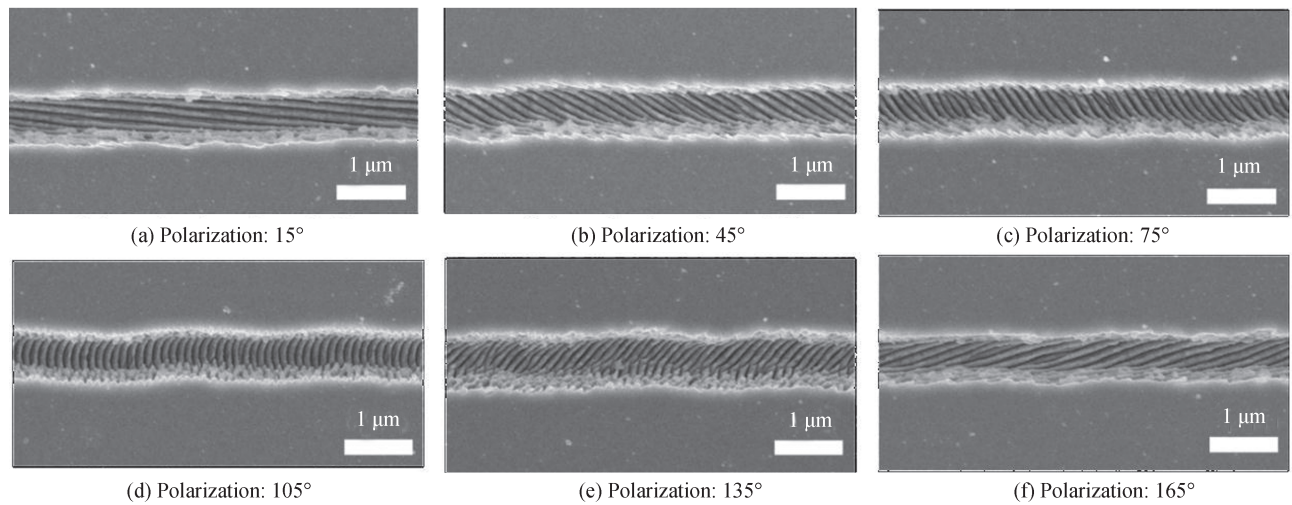


图3 激光偏振方向对纳米条纹的影响
Fig.3 Influence of laser polarization on nanogratings

2.2 激光诱导结构双折射效应

激光诱导的纳米条纹周期一般为百纳米量级,材料内部纳米条纹的深度尺寸为微米量级至十微米量级之间,主要与聚焦激光物镜的数值孔径和聚焦深度有关,利用空间光整形的贝塞尔光束可以将纳米条纹拉长至百微米量级。激光诱导材料内部的纳米条纹可以表示

$$\varphi = h(n_e - n_o)2\pi/\lambda = h\Delta n2\pi/\lambda \quad (1)$$

式中, h 为纳米条纹深度, n_o 为正常折射率, n_e 为反常折射率, λ 为测试波长。 Δn 为o光和e光的折射率差。

图4为不同偏振方向的激光对蓝宝石内部扫描结构的双折射慢轴方向的影响。由图3可知,激光扫描之后会产生纳米条纹,纳米条纹的方向直接影响了内部器件的应力双折射的慢轴方向。由图4可知,不同偏振方向的飞秒激光扫描完的结构经过双折射显微镜成像后呈现的颜色不同,不同的颜色对应不同双折射的慢轴方向。经测试后,发现激光扫描后的双折射慢轴方向与激光偏振方向垂直。所以,我们可以在激光直写时,实时调控激光偏振方向来改变诱导结构的慢轴方向,为激光扫描蓝宝石内部几何相位元件打下了良好的理论基础。

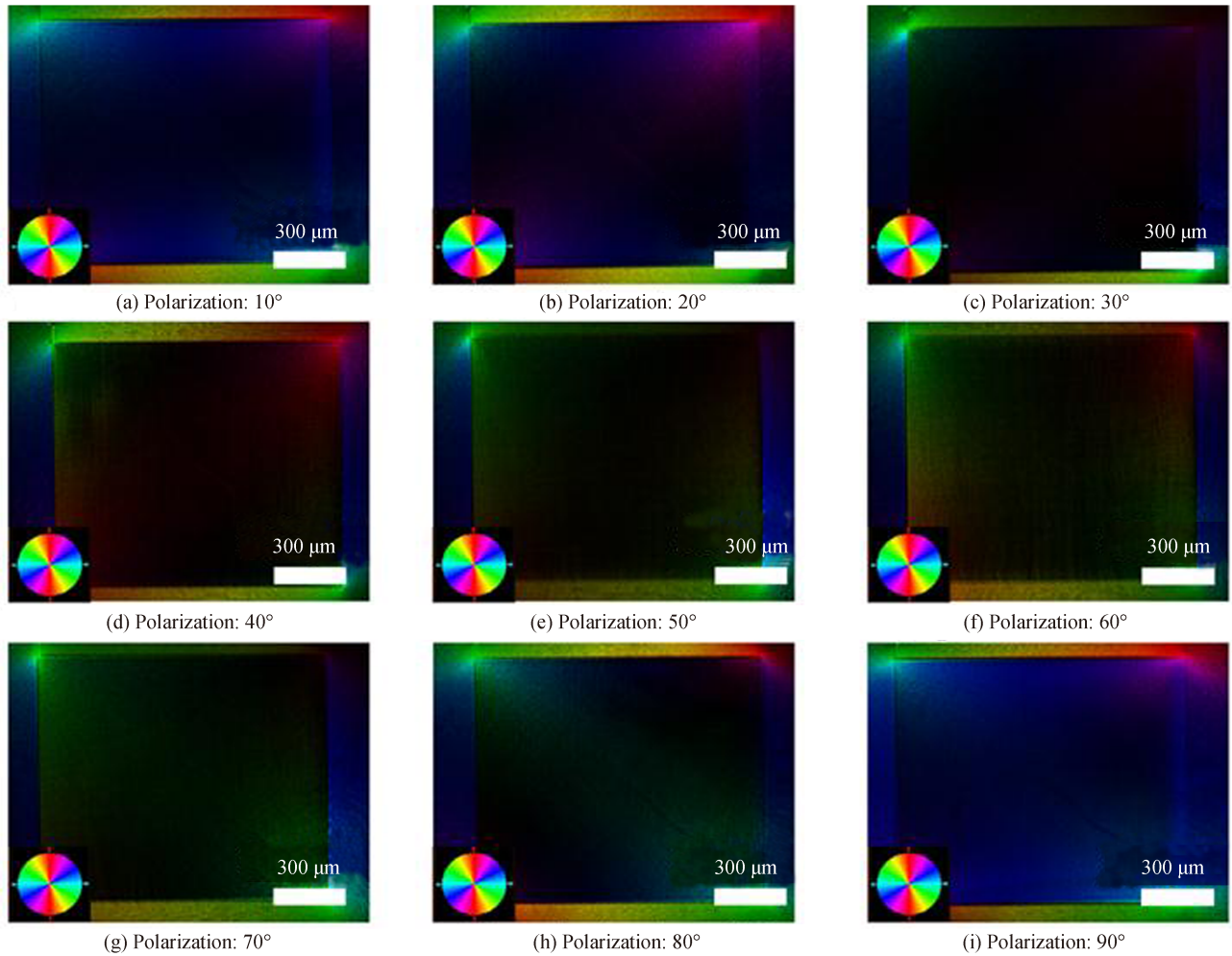


图4 激光偏振方向改变双折射慢轴方向

Fig.4 Laser polarization direction changes the direction of the slow axis of birefringence

3 蓝宝石内部几何相位元件的制备与高温测试

3.1 蓝宝石内部几何相位元件

图5为蓝宝石内部几何相位衍射光学元件的形貌特征,本器件激光扫描方式皆为同心圆扫描。通过改变激光扫描每个区域的激光偏振,以改变扫描区域的纳米条纹方向,从而对光在各个区域进行相位调控。图5(a)为蓝宝石内部几何相位波带片的原理图,相邻两个区域中纳米条纹方向相差 45° ,每一个周期内结构对光的相位改变量为 2π 。利用波长为343 nm的激光通过一个20倍、数值孔径为0.5的物镜,将激光聚焦在

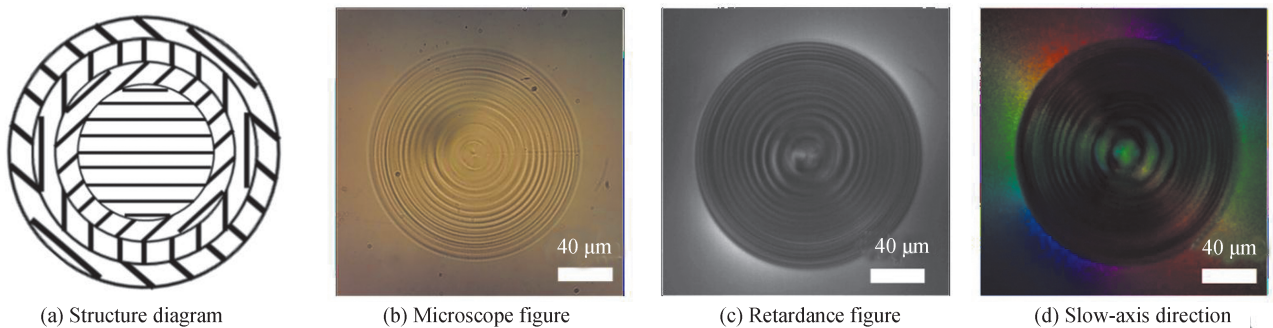


图5 蓝宝石内部几何相位器件

Fig.5 Geometric phase elements in sapphire

样品内部。激光单脉冲能量为 12 nJ, 重复频率为 200 kHz, 扫描速度为 0.4 mm/s, 扫描图案如图 5(b) 所示。其中, 图 5(b) 为激光扫描后蓝宝石内部的几何相位波带片的光学显微镜图, 整体器件直径为 170 μm , 器件最外侧圆环宽度为 800 nm。图 2 展示的飞秒激光近阈值加工的加工精度仅为 340 nm, 满足整个几何相位元件的扫描精度。图 5(c) 和 5(d) 为飞秒激光加工后的几何相位波带片的应力分布图和双折射慢轴方向展示图。

3.2 高温测试效果

为了测量制备的器件高温下聚焦的稳定性, 搭建如图 6(a) 所示的测试光路图。波长为 400 nm 的光纤激光器用于提供稳定的入射激光, 激光器出射的线偏振激光经过 1/4 波片后转变为圆偏振光, 后经过 10 倍物镜聚焦在样品的结构上。样品下面为固定的高温火焰喷枪, 火焰枪加热物体可达 800 $^{\circ}\text{C}$ 。入射激光被几何相位波带片调制后经过一个 40 倍的物镜放大, 后被 1/4 波片转变为线偏振光, 以便工业相机 (CCD) 接收光信号。

图 6(b) 为在常温下测试得到的聚焦光斑的图像, 聚焦效率为 15.4%。随后, 开启火焰枪, 为结构持续加热, 样品温度通过高温热电偶探测。分别得到在高温 200 $^{\circ}\text{C}$ 、400 $^{\circ}\text{C}$ 、600 $^{\circ}\text{C}$ 、800 $^{\circ}\text{C}$ 下蓝宝石内部几何相位波带片的聚焦光斑图, 如图 6(c)~(f) 所示。可以看出, 利用激光诱导内部纳米条纹技术制备的蓝宝石内部几何相位波带片在高温下聚焦效果与常温下几乎没有差别, 证明了该器件稳定的高温聚焦性能, 为高温探测, 航天成像等领域提供了一个可行的方案。

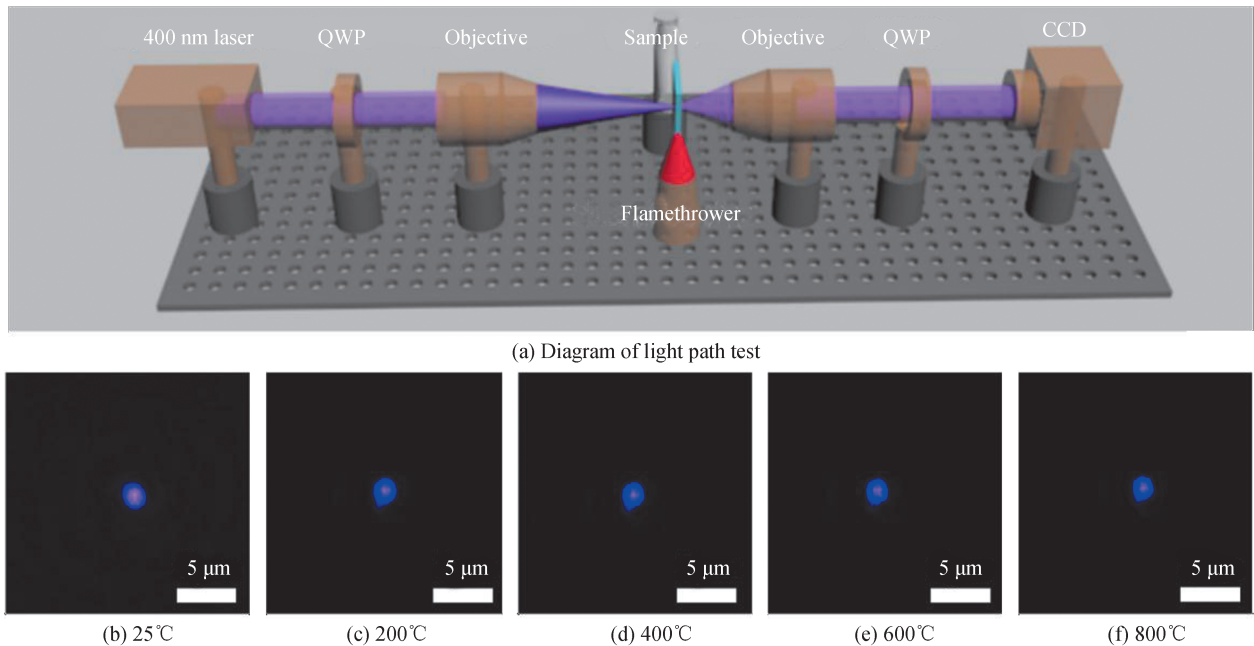


图 6 几何相位波带片在高温下的聚焦测试图

Fig.6 Focusing test image of geometric phase Fresnel zone plate at high temperature

4 结论

基于飞秒激光诱导纳米条纹技术, 实现了晶态材料蓝宝石内部几何相位微光学元件的制备。利用飞秒激光阈值扫描将加工精度提升到线宽 340 nm。通过实时改变扫描激光的偏振, 可以精准调控激光诱导纳米条纹的方向, 进而控制激光双折射的慢轴方向。基于该技术实现了蓝宝石内部几何相位菲涅尔波带片的制备, 该器件具有良好的形貌和优异的光学性能。不同于聚合物材料和玻璃, 蓝宝石内部几何相位器件可实现高温下的稳定聚焦。在国防、军事、航空航天等领域具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] ZHAO Ruizhe, HUANG Lingling, WANG Yongtian. Recent advances in multi-dimensional metasurfaces holographic technologies[J]. Photonix, 2020, 1(1): 1-24.
- [2] WANG Dongyi, LIU Feifei, LIU Tong, et al. Efficient generation of complex vectorial optical fields with metasurfaces[J]. Light: Science & Applications, 2021, 10(1): 1-14.

- [3] DENG Liangui, DENG Juan, GUAN Zhiqiang, et al. Malus-metasurface-assisted polarization multiplexing [J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9(1): 1-9.
- [4] ZOU Xiujian, ZHENG Gaige, YUAN Quan, et al. Imaging based on metalenses[J]. *Photonix*, 2020, 1(1): 1-24.
- [5] KHORASANINEJAD M, CHEN Weiting, DEVLIN R, et al. Metalenses at visible wavelengths: Diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging[J]. *Science*, 2016, 352(6290): 1190-1194.
- [6] GUO Yinghui, ZHANG Shicong, PU Mingbo, et al. Spin-decoupled metasurface for simultaneous detection of spin and orbital angular momenta via momentum transformation[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 1-12.
- [7] WANG Shuai, DENG Zilan, WANG Yujie, et al. Arbitrary polarization conversion dichroism metasurfaces for all-in-one full Poincaré sphere polarizers[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 1-9.
- [8] GETAN F, MAKARENTO M, BURGUTE-LOPEZ A, et al. Broadband vectorial ultrathin optics with experimental efficiency up to 99% in the visible region via universal approximators[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 1-14.
- [9] LIN Dianmin, FAN Pengyu, HASMAN E, et al. Dielectric gradient metasurface optical elements[J]. *Science*, 2014, 345(6194): 298-302.
- [10] QIAO Zhen, WAN Zhenyu, XIE Guoqiang, et al. Multi-vortex laser enabling spatial and temporal encoding [J]. *Photonix*, 2020, 1: 1-14.
- [11] PENG Liang, DUAN Lingfu, WANG Kewen, et al. Transverse photon spin of bulk electromagnetic waves in bianisotropic media[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(12):878-882.
- [12] BOMZON Z, KLEINER V, HASMAN E. Pancharatnam - Berry phase in space-variant polarization-state manipulations with subwavelength gratings[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(18): 1424-1426.
- [13] LU Yiming, TIAN Zhennan, YANG Shuangning, et al. High-efficiency spiral zone plates in Sapphire [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(12): 979-982.
- [14] SSHIMOTSUMA Y, KAZANSKY P G, QIU J, et al. Self-organized nanogratings in glass irradiated by ultrashort light pulses[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 91(24): 247405.
- [15] BRICCHI E, KAZANSKY P G. Extraordinary stability of anisotropic femtosecond direct-written structures embedded in silica glass[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(11): 111119.
- [16] GAMALY E, JUODZAZIS S, MISAWA H, et al. Formation of nano-voids in transparent dielectrics by femtosecond lasers[J]. *Current Applied Physics*, 2008, 8(3-4): 412-415.
- [17] JUODZAZIS S, NISHIMURA K, MISAWA H, et al. Control over the crystalline state of sapphire [J]. *Advanced Materials*, 2006, 18(11): 1361-1364.
- [18] MA Zhuochen, ZHANG Yonglai, HAN Bing, et al. Femtosecond laser programmed artificial musculoskeletal systems [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1-10.
- [19] SUN Yunlu, DONG Wenfei, NIU Ligang, et al. Protein-based soft micro-optics fabricated by femtosecond laser direct writing[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(1): e129.
- [20] ZHANG Yonglai, TIAN Ye, WANG Huan, et al. Dual-3D femtosecond laser nanofabrication enables dynamic actuation [J]. *ACS Nano*, 2019, 13(4): 4041-4048.
- [21] HAN Bing, GAO Yuanyuan, ZHANG Yonglai, et al. Multi-field-coupling energy conversion for flexible manipulation of graphene-based soft robots[J]. *Nano Energy*, 2020, 71: 104578.
- [22] YU Lei, YANG Shuangning, LIU Xueqing, et al. Ion beam etching assisted femtosecond laser machining to manufacture silicon carbide micro-optical component[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(12):1214003.
- 于磊, 杨双宁, 刘学青, 等. 离子束刻蚀辅助飞秒激光加工制备碳化硅微光学元件[J]. *光子学报*, 2018, 47(12): 1214003.