

文章编号:1004-4213(2011)12-1799-4

# 飞秒激光制作铌酸锂光波导的研究

罗晨,朱丽,周自刚

(西南科技大学 理学院,四川 绵阳 621000)

**摘 要:**针对 Z 切割铌酸锂晶体在中心波长为 800 nm、重复频率为 76 MHz 的飞秒脉冲激光下,利用放大倍数为 40、数值孔径为 0.65 的会聚透镜聚焦,研究了扫描速度和扫描次数的变化对刻写光波导结构的影响,分析了波导结构变化的原因,并测试了 1×2 光波导功分器的通光性能.实验结果表明:在采用横向扫描、聚焦深度为 350~400 μm、扫描速度为 100 μm/s 和激光功率为 250 mW 时,获得较理想的铌酸锂光波导,1×2 光波导功分器的输出功率分布基本达到均分.

**关键词:**飞秒激光;铌酸锂;光波导;通光性能

**中图分类号:**TN249;TN25

**文献标识码:**A

**doi:**10.3788/gzxb20114012.1799

## 0 引言

飞秒激光具有极高峰值功率、可实现亚微米或纳米三维加工、冷加工、加工材料广泛等诸多特点<sup>[1-2]</sup>,它的发展和一直倍受重视<sup>[3]</sup>.飞秒激光能加工各种材料,特别是透明材料,例如玻璃<sup>[4]</sup>、晶体<sup>[5]</sup>、塑料<sup>[6]</sup>、树脂和聚合物<sup>[7]</sup>等.当激光强度超过透明材料的损伤阈值时,透明材料对激光能量的非线性吸收加强,导致材料内部发生光化学变化,产生折射率比原始材料高的微小空腔.利用此相互作用机理可制作多种紧凑光学元件,如光波导和光栅<sup>[8]</sup>.而铌酸锂晶体是透明材料中的一种,它是热电、压电、体光伏、光折变和弹光效应于一体的非线性光学晶体材料<sup>[9]</sup>,可在其作用制备光波导各种结构<sup>[10]</sup>,该方法不仅成本低,操作简单,还具有高加工效率.

本文利用飞秒激光诱导铌酸锂晶体,探索在改

变扫描速度和扫描次数下,对波导结构和通光模式的进行分析,并测试 1×2 功分器的通光性能.

## 1 光波导实验

### 1.1 激光加工系统

飞秒激光刻写系统主要由掺钛蓝宝石振荡器、自行设计搭建的光路装置和三维精密电控平移台组成,如图 1.飞秒激光振荡器输出频率约为 76 MHz,平均功率为 270 mW,激光中心波长为 800 nm.光路主要包括 45°高反射率平面反射镜,半波片与格兰棱镜,高反镜与 CCD 结合在电脑上对加工过程进行监控.会聚透镜的放大倍数为 40,数值孔径为 0.65.三维精密电控平移台移动范围均为 160 mm,水平移动准确度为 10 nm,竖直移动准确度为 50 nm,与电脑联接控制.

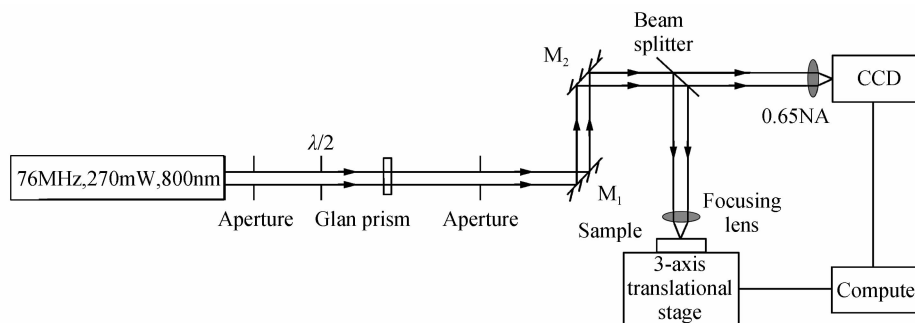


图 1 飞秒激光加工系统

Fig. 1 Femtosecond laser setup

基金项目:四川省科技厅支撑计划项目(No. 11zs2012)资助

第一作者:罗晨(1988-),女,硕士研究生,主要研究方向为激光与物质相互作用. Email: luochen5303@163.com

导师(通讯作者):周自刚(1973-),男,教授,主要研究方向为集成光学与微小光学器件. Email: zhouzigan1973@163.com

收稿日期:2011-07-10;修回日期:2011-08-30

## 1.2 扫描速度

当飞秒激光聚焦能量达到 Z 切向铌酸锂晶体的损伤阈值时,固定激光功率,而改变扫描速度,波导结构为图 2.

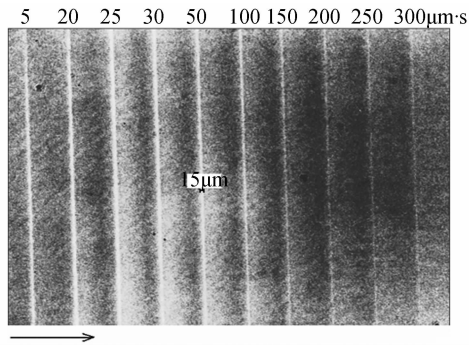


图 2 不同扫描速度对波导宽度的演化  
Fig. 2 Evolution of waveguide' width in sample with different scanning speed

表 1 不同扫描速度下所形成波导的宽度

Table 1 The waveguide' width of different scanning speed

Scanning speed/ $(\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	5	20	25	30	50	100	150	200	250	300
Waveguide width/ $(\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	20.59	18.63	17.33	16.43	15.03	13.94	10.95	8.96	8.52	7.96

导带电子的转变,从而导致锂离子向外扩散,使得焦点区域的 Li 与 Nb 的比值降低. 而铌酸锂晶体的密度与 Li 与 Nb 所占比例有关, Li 与 Nb 的比例小则晶体的密度大,所以晶体被激光辐照区域致密化,从而折射率变大.

由图 2 和表 1 可以明显看出,当重复频率固定时,随扫描速度的增大,铌酸锂晶体在单位时间单位长度内接收到的激光脉冲数减少,注入的能量也随之降低,由价带向导带跃迁的电子数目减少,使锂离子向外扩散数目减少,因此获得的改性区域宽度变窄. 而 Li 与 Nb 的比例减小程度减小,所以晶体被激光辐照区域致密化程度也相应减小,从而折射率增大程度减小.

## 1.3 扫描次数

激光功率为 230 mW 的飞秒激光在同一铌酸锂晶体内 400  $\mu\text{m}$  处,采用 100  $\mu\text{m}/\text{s}$  的扫描速度,分别对材料扫描 1、2 和 3 次后所刻写波导,如图 3. 图

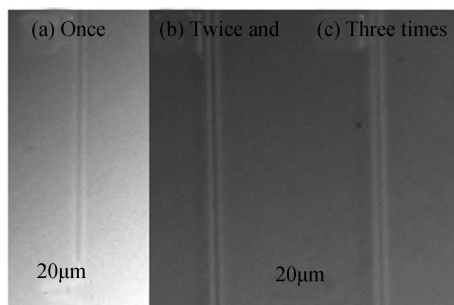


图 3 扫描次数对波导宽度的演化  
Fig. 3 Evolution of waveguide' width in sample with different scanning reiteration

图 2 是功率为 270 mW 的飞秒激光在一块铌酸锂晶体内 350  $\mu\text{m}$  处,用不同扫描速度所刻写波导的形貌. 图中从左到右(箭头方向所示),扫描速度依次为 5  $\mu\text{m}/\text{s}$ 、20  $\mu\text{m}/\text{s}$ 、25  $\mu\text{m}/\text{s}$ 、30  $\mu\text{m}/\text{s}$ 、50  $\mu\text{m}/\text{s}$ 、100  $\mu\text{m}/\text{s}$ 、150  $\mu\text{m}/\text{s}$ 、200  $\mu\text{m}/\text{s}$ 、250  $\mu\text{m}/\text{s}$ 、300  $\mu\text{m}/\text{s}$ ,相应波导宽度如表 1.

铌酸锂晶体的禁带宽度为 4.0 eV<sup>[11]</sup>,实验中采用 800 nm 飞秒激光,单个光子的能量为 1.6 eV,吸收一个光子时不足以使铌酸锂分子发生电离,只当一个束缚态电子同时吸收 3 个光子时才能挣脱束缚态成为自由电子. 因此,飞秒激光与铌酸锂晶体相互作用时,在激光强光下铌酸锂的非线性吸收增强,通过多光子吸收以及雪崩电离的相互作用,引起铌酸锂晶体受激光辐照焦点区域的温度急剧上升,多光子电离过程和碰撞电离过程均可导致价带电子到

3 中(a)、(b)、(c)分别为刻写 1、2、3 次后的波导区域. 当激光功率和扫描速度均固定时,随扫描次数的增多波导区域宽度在增大,扫描次数相应波导宽度如表 2.

表 2 不同扫描次数下所形成波导的宽度

Table 2 The waveguide' width of different scanning reiteration

Repeat time	1	2	3
Waveguide width/ $\mu\text{m}$	14.78	17.25	20.53

扫描次数对聚焦区域的影响是由于初次激光使聚焦区域锂离子在高温下向外扩散一定距离后,再次对其作用时,高温使已扩散的锂离子继续远离焦点向外扩散. 同时使更多价带电子向导带跃迁,使其密度加大. 故随扫描次数的增加,因此被改性区域的尺寸加大. Li 与 Nb 的比例减小程度增大,晶体被激光辐照区域致密化程度加强,从而折射率增加程度加大.

## 2 1×2 功率分配器

### 2.1 制备

采用重复频率为 76 MHz 的飞秒激光透过 40× 显微物镜在垂直于 Z 切向的铌酸锂表面下 400  $\mu\text{m}$  处刻写 Y 型功分器,其中激光功率为 250 mW,扫描速度为 100  $\mu\text{m}/\text{s}$ ,所设计的 Y 分支的角度为 2°. 在光学显微镜下观察,如图 4. 图 4(a)为功分器直线区域;图 4(b)为功分器分支处;图 4(c)为功分器分离区域,波导宽度约为 20  $\mu\text{m}$ .

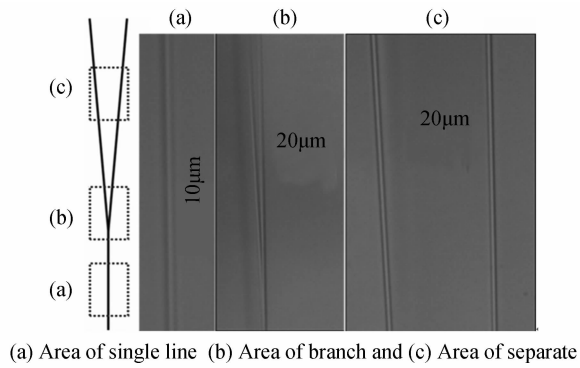


图 4 1×2 功分器分区图像

Fig. 4 Power divider of one to two

## 2.2 测试

利用 10× 显微物镜将波长为 532nm 的半导体激光器所发出的绿光耦合到 1×2 功分器波导中,输出端用光束质量分析仪接收,并通过其检测系统观察输出光场分布,从而观察光波导的性能.测试装置如图 5.

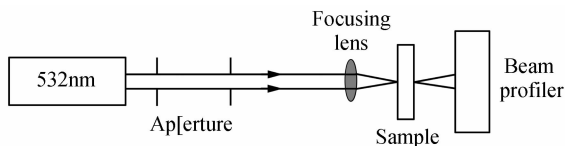


图 5 性能测试装置

Fig. 5 Setup of performance test in sample

将 1×2 功分器进行近场光强分布测试,如图 6,每单支输出的光强均具有良好的对称分布,且两支输出光之间也具有一定的对称性.输出模式为单模.

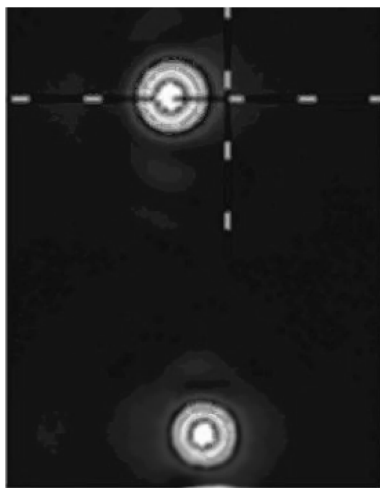


图 6 1×2 功分器分支处近场光强分布图

Fig. 6 The intensity distribution with near field of one to two power divider

通过测量和计算得出改性区域折射率变化  $\Delta n$  约为  $3.5 \times 10^{-4}$ ,以及插入损耗均在 1 dB/cm 左右.

## 3 结论

在掺钛蓝宝石飞秒激光振荡器输出的中心波长

为 800 nm、重复频率为 76 MHz 的飞秒光束作为光源,以及利用放大倍数为 40、数值孔径为 0.65 的显微聚焦物镜聚焦的实验条件下,随着扫描速度的减小和扫描次数的增多,所加工波导区域的折射率改变量增大,使其发生改变的原因可能是飞秒激光高温下诱导锂离子外扩所致.并在此基础上制备出 1×2 光功分器,对所刻写光波导传输性能进行了测试.结果表明:采用紧聚焦和横向扫描的扫描方式,聚焦深度为 350  $\mu\text{m}$ 、扫描速度为 100  $\mu\text{m/s}$ 、激光功率为 250 mW 时,所刻光波导具有良好的波导特性,1×2 光功分器的插入损耗在 1 dB/cm 左右.

## 参考文献

- [1] HUANG You-xiang, ZHANG Qing-mao, LIAO Jian-hong, *et al.* Review and prospects of femtosecond laser micro-processing technology[J]. *Heat treatment of Metal*, 2008, **33**(6): 8-13.  
黄佑香,张庆茂,廖键宏,等.飞秒激光微加工技术的评述与展望[J].*金属热处理*,2008,**33**(6): 8-13.
- [2] LIANG Jing, WU Zhi-hua, YANG Xiu-feng, *et al.* The latest development in the field of fabricating optical instrument using femtosecond laser[J]. *Laser & Infrared*, 2007, **36**(6): 493-496.  
梁静,吴志华,杨秀峰,等.用飞秒激光制作高精度微光学器件的研究进展[J].*激光与红外*, 2007, **36**(6):493-496.
- [3] ZHU Li. Research on congruent LiNbO<sub>3</sub> waveguide fabricated by femtosecond laser pulses [D]. Miangyang: Southwest University Science and Technology, 2011.  
朱丽.飞秒激光刻写铌酸锂光波导的研究[D].绵阳:西南科技大学,2011.
- [4] QIU Jian-rong, MIURA K, HIRAO K. Femtosecond laser-induced microfeatures in glasses and their application [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2008, **354**(12-13): 1100-1111.
- [5] ZHANG Shuang-gen, YAO Jiang-hong, LI Yong-man, *et al.* Experimental research on congruent LiNbO<sub>3</sub> waveguide fabricated by femtosecond laser pulses[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 26-28.  
张双根,姚江宏,李勇男,等.飞秒激光刻写铌酸锂光波导的实验研究[J].*光子学报*,2009, **38**(1): 26-28.
- [6] WATANABE W, ITOH K. Fabrication of micro-photonics component in silica glass with femtosecond laser pulses[J]. *Optical Society of Korea*, 2004, **8**(1): 21-28.
- [7] LITTLE D J, AMS M, DEKKER P, *et al.* Femtosecond laser modification of fused silica; the effect of writing polarization on Si-O ring structure [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(24): 20029-20037.
- [8] LIU Qing, CHENG Guang-hua, WANG Yi-shan, *et al.* Fabrication of internal diffraction gratings in transparent materials using femtosecond laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11): 1290-1293.  
刘青,程光华,王屹山,等.用飞秒激光在透明介质体内形成衍射光栅[J].*光子学报*,2004,**33**(11): 1290-1293.
- [9] YU Ben-hai. Ablation and micromachining of dielectris with a femtosecond laser [D]. Wuhang: Huazhong University of Science& Technology, 2008.  
余本海.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.
- [10] BURGHOFF J, GREBING C, NOLTE S, *et al.* Efficient frequency doubling in femtosecond laser-written waveguides

in lithium niobate[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(8): 811-813.

Femtosecond optical breakdown in dielectrics[J]. *Physical Review Letters*, 1998, **80**(8): 4076-4079.

[11] LENZNER M, KURGER J, SARTANIA S, *et al.*

## Fabrication and Investigation of Optical Waveguide in LiNbO<sub>3</sub> by Femtosecond Laser

LUO Chen, ZHU Li, ZHOU Zi-gang

(*School of Science, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621000, China*)

**Abstract:** The experimental research of optical channel waveguides in Z-LiNbO<sub>3</sub> crystals using femtosecond pulses is performed on Ti sapphire laser system, the wavelength and the repetition rate of it are 800 nm and 76 MHz. By using the focusing lens with 40 magnification, 0.65 numerical aperture (NA), the effect of fabrication parameters, for example laser scanning speed, repeat time on writing quality and the characters of relative microstructures are analyzed and studied in theory. Also the distribution is measured by the beam profiler. The result shows that the propagation of optical waveguide could achieve ideal effect when the pulse energy is under 250 mW, the scanning speed is 100 μm/s and the focus depth is from 350 μm to 400 μm. At last the insertion loss of 1×2 optical splitter is about 1 dB/cm.

**Key words:** Femtosecond laser; Optical waveguide; LiNbO<sub>3</sub>; The optical properties