

doi:10.3788/gzxb20134204.0402

飞秒激光刻写 1×4 铌酸锂光波导功分器的研究

周自刚, 罗晨, 杨永佳, 范宗学, 全恩思, 朱万清, 王亮

(西南科技大学 极端条件物质特性联合实验室, 四川 绵阳 621010)

摘要: 采用一种以五次幂函数为基础所设计的 1×4 光波导功分器路径, 利用中心波长为 800 nm、重复频率为 75 MHz 的飞秒脉冲激光为光源, 通过控制三位电动平移台, 在 Z 切割铌酸锂晶体进行横向扫描此路径, 在激光功率为 270 mW 和扫描速度为 0.05 mm/s 下, 制备出 1×4 光波导功分器, 分析了改变扫描速度和扫描次数对波导形成的影响, 以及波导形成的原因. 实验结果表明: 在强激光的各种参量一定时, 扫描速度越小, 扫描次数越多, 波导线宽越大, 扫描速度在一定范围内时, 波导损耗较低.

关键词: 飞秒激光; 铌酸锂晶体; 光波导; 五次幂函数

中图分类号: TN249, TN2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)04-0402-3

Fabrication of 1×4 Optical Waveguide Splitter by Femtosecond Laser in LiNbO_3

ZHOU Zi-gang, LUO Chen, YANG Yong-jia, FAN Zong-xue,

QUAN En-si, ZHU Wan-qing, WANG Liang

(Laboratory for Extreme Conditions Matter Properties, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China)

Abstract: This paper reports the experimental research of optical channel waveguides in Z- LiNbO_3 crystals by femtosecond pulses. The laser scanning trajectory is controlled by the five power function program. A 1×4 optical splitter was prepared by the horizontal scanning when the pulse energy is 270 mW, the scanning speed from 50 μm to 200 μm per second. The result shows that the scanning speed is slower, and the repeat times are more, the waveguide width is wider.

Key words: Femtosecond lasser; LiNbO_3 ; Optical waveguide; Five power function

0 引言

由于光纤通信在现代通信技术中的快速发展, 作为光纤链路中最重要的无源器件之一的光功率分路器又称光分路器或光功分器, 在材料选择, 弯曲路径设计以及制作方法上都必须跟上时代的脚步. 光功分器弯曲路径的设计将直接影响其弯曲损耗和过度损耗的大小^[1], 从而影响光纤通信中的传输效率. 而飞秒激光凭借其高功率^[2]、高效率^[3]、加工范围精确^[4]等特点, 依然是维纳加工中的热点. 在先前的研究中^[5]发现, 将飞秒激光聚焦在热电、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铌酸锂晶体中^[6-8], 以一定的扫描速度和激光功率能获得较理想的铌酸锂光波导.

本文利用 Matlab 软件优化低损耗波导路径, 通过计算得出以五次幂函数为波导路径时其损耗最低, 并以此为模板利用飞秒激光在铌酸锂晶体中制作 1×4 光功分器. 进一步研究了飞秒激光与铌酸锂相互作用的机理, 飞秒激光的高功率密度, 使作用区域发生雪崩电离和多光子效应为主的物理机制, 对于铌酸锂晶体, 当飞秒激光作用其中时, 主要是锂离子吸收多个光子使其逃脱价带跃迁致导带或者自由能级, 从而使作用区域折射率发生改变, 形成波导.

1 实验

1.1 飞秒激光加工系统

飞秒激光加工原理图如图 1. 由飞秒振荡器输出的重复频率为 75 MHz, 平均功率为 300 mW 的

基金项目: 四川省科技厅支撑计划项目 (No. 11zs2012) 和西南科技大学极端条件物质特性联合实验室基金资助

第一作者: 周自刚 (1973-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为集成光学与微小光学器件. Email: zhouzigang1973@163.com

收稿日期: 2012-10-09; 录用日期: 2012-11-01

激光光源经过一系列分光镜,反光镜等光学元件后,透过放大倍数 40×和 NA=0.65 的显微物镜,垂直紧聚焦于 Z 切向的铌酸锂表面下 300 μm 处刻写 1×4 光功分器,扫描速度为 100 μm/s. 通过计算机精确控制三维电动平移台的移动,其中 X 轴动范围均为 160 mm,准确度为 10 nm,Y 轴动范围均为 100 mm,准确度为 50 nm.

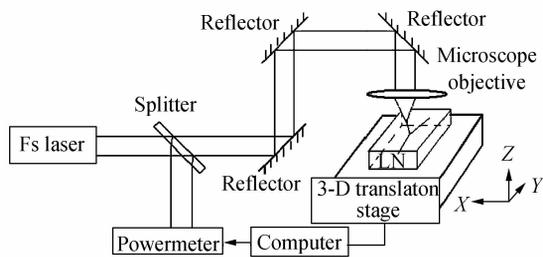


图 1 飞秒激光刻写系统
Fig. 1 Sketch figure of fabrication setup

1.2 路径设计

根据弯曲光波导损耗理论^[9-10],以及优弯曲光

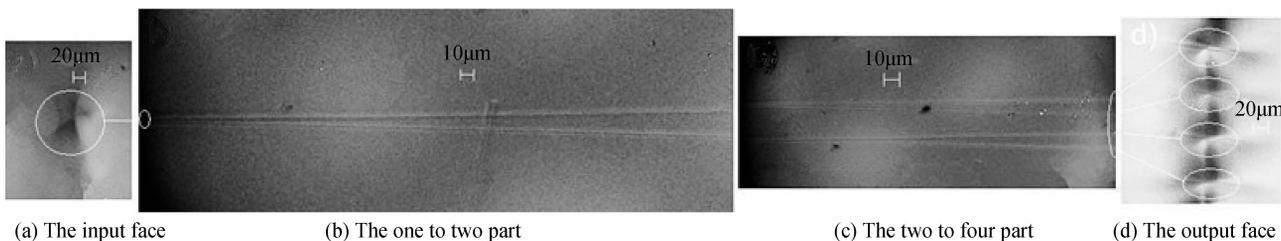


图 3 铌酸锂光波导功分器分支区域图像

Fig. 3 Microscope images of the channel waveguide in Lithium Niobate substrate of the written by femtosecond laser powers 中(b)、(c)对应,其中(a)和(d)部分放大 100 倍,(b)和(c)部分放大 50 倍,光波导宽度为 13.96 μm.

2 实验分析

2.1 扫描速度

为了进一步分析刻写条件对波导形成的影响,本文进行直线刻写波导.当激光功率固定为 270 mW,采用紧聚焦与横向扫描相结合的扫描方式,扫描速度由 0.05~0.20 mm/s 逐级变化,波导结构如图 4.

9.32μm	0.20mm/s
11.16μm	0.15mm/s
14.45μm	0.10mm/s
15.57μm	0.05mm/s
20μm	

图 4 不同扫描速度波导宽度的变化

Fig. 4 Evolution of waveguide's width sample with different scanning speed and reiteration

图 4 中,由下往上,第一条是用 0.05 mm/s 的速度移动平移台 X 轴,其它轴不动,使激光在铌酸锂晶体内部作用形成一条直波导,波导宽度为

波导的结构函数、导函数以及曲率函数均连续的基本条件,设计如图 2 所示 1×4 光功分器模板.

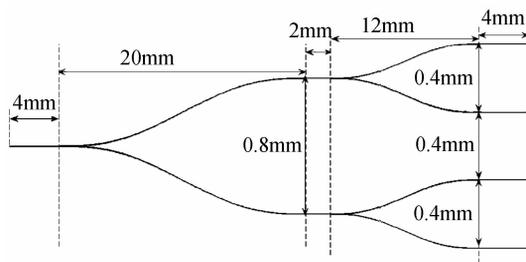


图 2 1×4 激光扫描路径
Fig. 2 The schematic design diagrams of a 1×4 optical splitter

1.3 制备

采用上述实验条件,将飞秒激光垂直紧聚焦于 Z 切向的铌酸锂表面下 300 μm 处刻写 1×4 光功分器,扫描速度为 100 μm/s.在光学显微镜下观察如图 3.

图 3 为光学显微镜观察图(图中(b)、(c)与图 2

15.57 μm;其它条件不变,仅改变平移台 X 轴移动速度,依次为 0.05 mm/s,0.10 mm/s,0.15 mm/s,0.20 mm/s,形成另外三条直波导,波导宽度依次为测得波导宽度为 14.45 μm,11.16 μm,9.32 μm,本文发现,随着扫描速度的增大,波导宽度明显变窄.

2.2 扫描次数

当激光功率固定为 250 mW,采用紧聚焦与横向扫描相结合的扫描方式,扫描速度固定为 0.05 mm/s,改变扫描次数,波导结构如图 5.

图 5 中,由上往下,第一条扫描次数为一次,扫



图 5 不同扫描次数波导宽度的变化

Fig. 5 Evolution of waveguide's width sample with different scanning speed and reiteration

描速度为 0.05 mm/s,测得波导宽度为 15.68 μm ;第二条扫描速度为 0.05 mm/s 不变,在飞秒激光在晶体内部作用一次后,不改变聚焦深度等任何条件,以相同的速度进行重复扫描,得到直波导宽度为 17.81 μm ;第三条扫描方式与第二条相似,重复刻写次数为三次,测得直波导宽度为 19.74 μm . 本文发现,随着重复扫描次数的增加,波导宽度明显变宽.

在对铌酸锂的晶体结构与性能关系研究中发现锂离子比铌离子更为活跃,且对铌酸锂晶体的介电性质影响较大,即飞秒激光聚焦在铌酸锂晶体内部时,聚焦区域的能量密度剧增,导致晶体在该区域处非线性吸收. 一个锂离子由价带移动至导带或自由能级需同时吸收多个光子,即多光子电离过程,从而改变晶体结构,导致其折射率发生变化. 当激光聚焦区域的能量高达能够损伤晶体时,称这一临界值为损伤阈值. 如果将激光聚焦区域的能量控制在此临界值以下,即不损伤晶体时,改变晶体的折射率,波导形成. 当扫描速度减小时,飞秒激光在晶体内部聚焦区域单位时间内停留时间增长,激光功率密度增加,锂离子发生非线性吸收几率增加,更多的锂离子由价带向外移动,导致晶体结构改变区域增大. 当扫描次数增加时,激光再次聚焦已作用区域,使更多的锂离子发生雪崩电离和多光子吸收,导致晶体被改变结构区域曾宽.

3 结论

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,使锂离子向外扩数目减少,因此获得的改性区域宽度变窄,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纳秒激光高温下诱导锂离子外扩所致. 并在此基础上制备出 1×4 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,扫描速度为 0.05 ~ 0.2 mm/s、激光功率为 270 mW 时,所刻 1×4 光功分器的插入损耗低于 1 dB/cm.

参考文献

- [1] SUN Guang-chun, ZHOU Zi-gang, WANG Qiang, *et al.* The research and production of low bending loss waveguide[J]. *China Science and Technology Information*, 2010, (8): 48-51.
孙光春, 周自刚, 王强, 等. 低弯曲损耗光波导的研制[J]. 中国科技信息, 2010, (8): 48-51.
- [2] GUI Li, XU Bao-xi, WU Dong-jiang, *et al.* Refractive index change in lithium niobate induced by focused femtosecond laser[J]. *Photonics West*, 2004: 24-29.
- [3] ZHANG Shuang-geng, YAO Jiang-hong, FAN Ya-xian, *et al.* Second harmonic generation in periodically poled lithium niobate waveguide using femtosecond laser pulses[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **8**(17): 7135-7139.
- [4] CHEN Hong-yun. Fabrication and Characterization of waveguides in LiNbO₃ written with femtosecond laser pulses [C]. Proceedings of 2010 International Conference on Display and Photonics, 2010, 120-122.
- [5] LUO Chen, ZHU Li, ZHOU Zi-gang. Fabrication and investigation of optical waveguide in LiNbO₃ by femtosecond laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(12): 1799-1802.
罗晨, 朱丽, 周自刚. 飞秒激光制作铌酸锂光波导的研究[J]. 光子学报, 2011, **40**(12): 1799-1802.
- [6] ZHOU Guang-yong, GU Min. Fabrication of 3D photonic crystals in lithium niobate by use of femtosecond laser-induced microexplosion[C]. Optical Society of America, 2006, 1-2.
- [7] GRANDO D, YU J, BALLARINI D, *et al.* Femtosecond laser writing of surface microstructures in lithium niobate[C]. Nonlinear Guided Waves and Their Applications (NLGW), 2005, WD33.
- [8] SATOSHI A, SATORU S, JUNJI H. Transient optical absorption upon femtosecond pulse irradiation in lithium niobate crystals [J]. *Nonlinear Frequency Generation and Conversion*, 2009, 7197121-8.
- [9] ZHANG Xiao-kang, LIAO Chang-jun, LIU Song-hao. The relationship of the radius to the loss in bending waveguide[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2): 147-150.
张小康, 廖常俊, 刘颂豪. 波导弯曲半径与弯曲损耗的关系[J]. 光子学报, 2004, **33**(2): 147-150.
- [10] XU Jian-feng, BO Zhong-yang, BAI Jian, *et al.* Research of bent waveguide optimization[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(9): 1078-1081.
徐建峰, 薄中阳, 白剑, 等. 弯曲光波导模拟优化研究[J]. 光电子·激光, 2006, **17**(9): 1078-1081.