

# 超快激光在 Yb:YAG 内刻写双线型光波导的研究

唐文龙<sup>1,2</sup> 宋琼阁<sup>1,2</sup> 徐庆安<sup>3</sup> 刘 欣<sup>1,2</sup> 程光华<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119)

<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049; <sup>3</sup> 北京控制工程研究所, 北京 100190

**摘要** 研究了使用钛宝石放大器输出的重复频率为 50 kHz、中心波长为 775 nm、脉冲宽度为 160 fs 的超快激光在掺镱钇铝石榴石(Yb:YAG)中刻写双线型光波导的过程。发现了波导具有偏振导光现象,偏振态平行于双线方向的激光可以导通,偏振态垂直于双线方向的激光不能导通。详细分析了双线间距、刻写速度和激光脉冲能量对波导形成的影响,在双线间距为 30  $\mu\text{m}$ 、刻写速度为 400  $\mu\text{m}/\text{s}$ 、脉冲能量为 5.0  $\mu\text{J}$  的条件下写入的光波导导光特性良好。利用近场模重建了该波导折射率二维分布,波导区域折射率相对于基质改变量的最大值为  $1.8 \times 10^{-4}$ ,且该波导在 940 nm 半导体激光抽运激励下,获得了 1030.5 nm 的连续激光输出,激光功率为 4.7 mW。

**关键词** 超快激光;集成光学;掺镱钇铝石榴石晶体;光波导;波导激光

中图分类号 TN249; TN25 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.1232002

## Study on Writing of Double Line Waveguide in Yb:YAG with Ultrafast Laser

Tang Wenlong<sup>1,2</sup> Song Qiongg<sup>1,2</sup> Xu Qing'an<sup>3</sup> Liu Xin<sup>1,2</sup> Cheng Guanghua<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China  
<sup>3</sup> Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China

**Abstract** The writing of double line waveguide in Yb<sup>3+</sup> doped yttrium aluminum garnet (Yb:YAG) crystal is studied by using titanium sapphire laser with the pulse width of 160 fs, central wavelength of 775 nm and repetition frequency of 50 kHz. The phenomenon of polarization guiding is discovered in the waveguide. The laser with polarization parallel to the direction of double line can be guided, but the laser with polarization perpendicular to the direction of double line cannot be guided. The effects of written parameters, such as double line separation, laser pulse energy and writing speed, on the formation of the waveguide are analyzed. Experimental results show that the waveguide has the good property of guiding under the writing conditions of double line separation of 30  $\mu\text{m}$ , writing speed of 400  $\mu\text{m}/\text{s}$  and pulse energy of 5.0  $\mu\text{J}$ . Bivariate distribution of the waveguide refractive index is reconstructed by near-field mode and the maximum refractive index change is  $1.8 \times 10^{-4}$ . A continuous waveguide laser with a wavelength of 1030.5 nm is obtained and the output power is 4.7 mW.

**Key words** ultrafast laser; integrated optics; Yb<sup>3+</sup> doped yttrium aluminum garnet crystal; optical waveguide; waveguide laser

**OCIS codes** 320.7090; 140.3390; 230.7380; 230.2240

## 1 引 言

与传统的离子交换、离子注入、外延生长、薄膜

沉积等波导制作方法相比,近年来发展起来的超短激光脉冲在透明材料中的光刻光波导技术具有加工

收稿日期: 2014-05-29; 收到修改稿日期: 2014-07-17

基金项目: 国家自然科学基金(61223007,61378019)、陕西省自然科学基金(Y235I41D04)

作者简介: 唐文龙(1989—),男,硕士研究生,主要从事超短激光技术方面的研究。E-mail: taxuanyi412@126.com

导师简介: 程光华(1976—),男,博士,研究员,主要从事超短脉冲微加工方面的研究。E-mail: gcheng@opt.ac.cn

(通信联系人)

精度高、制作工艺简单、适用范围广、成本相对较低等优点<sup>[1-2]</sup>。由于超快激光脉冲具有窄的脉冲宽度和高的峰值功率,因此在其与透明材料发生相互作用时,会出现多光子吸收、雪崩电离等强烈的非线性效应<sup>[3-5]</sup>,致使被辐照区域介质材料的折射率发生永久性改变<sup>[6-7]</sup>,该特性为光子器件的制作提供了条件。超短激光脉冲光刻光波导技术是一种灵活的光子器件制作方法,可通过调节光斑尺寸、脉冲宽度、扫描速度及刻写功率等参数来调整波导的尺寸和折射率分布,这对集成光子芯片的布局设计以及光子器件的加工都非常有利。自从 Davis 等<sup>[3]</sup>报道了超快激光在透明材料内光刻光波导以来,人们探索了使用飞秒激光在玻璃(如磁旋光玻璃<sup>[8]</sup>、磷酸盐玻璃<sup>[9]</sup>)、晶体(如掺钕的钒酸钪晶体<sup>[10]</sup>、铽镱石榴石晶体<sup>[11]</sup>)、陶瓷(如掺钕的钇铝石榴石陶瓷<sup>[12]</sup>、掺铽的钇铝石榴石陶瓷<sup>[13]</sup>)等不同的材料上进行刻写光波导的实验研究,并且已经利用飞秒激光脉冲光刻技术制作了各种光子器件,例如光波导<sup>[14-16]</sup>、波导光栅<sup>[17]</sup>、波导分束、耦合器<sup>[18-20]</sup>、波导激光器<sup>[21-22]</sup>等。

Yb:YAG 是在钇铝石榴石(YAG)基质中掺入三价镱离子( $\text{Yb}^{3+}$ )形成的一种能在  $1.03 \mu\text{m}$  附近产生近红外激光的激光晶体。Yb:YAG 晶体具有较宽的吸收和发射带宽,光谱简单,无激发态吸收,热机械性能良好,热生成率较低,饱和储能密度较高,无荧光浓度猝灭,掺杂浓度高(原子数分数可达 30% 以上),有较长的荧光寿命等优点<sup>[23-26]</sup>,而且 YAG 基质的综合物化特性性能最为优良,所以 Yb:YAG 已经成为制作光波导最引人注目的激光介质之一。在 Yb:YAG 中刻写各种光子器件也已经成为研究热点,Yb:YAG 的发展将进一步促进光刻波导技术的发展及其在光通信、光传感、集成光学等领域中的应用。

本文使用重复频率为 50 kHz 的近红外飞秒激光在 Yb:YAG 晶体上刻写双线型应力波导,发现此类波导具有偏振依赖导光特性,只能导通偏振方向平行于双线方向的光。分析了双线间距、刻写速度、脉冲能量对刻写波导的影响,当实验中采用双线间距为  $30 \mu\text{m}$ ,刻写速度  $400 \mu\text{m/s}$ ,脉冲能量  $5.0 \mu\text{J}$  的参数时得到的光波导导光特性良好。对 976 nm 的波长,波导模场直径为  $26 \mu\text{m}$ ,利用近场模式反推获得了波导折射率二维分布,波导区域折射率相对于基质改变量的最大值为  $1.8 \times 10^{-4}$ 。实验中利用此参数刻写的波导在 940 nm 激光抽运下,获得

了输出功率为 4.7 mW 的连续激光输出,中心波长为 1030.5 nm。

## 2 光刻波导实验装置

超快激光光刻波导的实验装置如图 1 所示,使用钛宝石锁模激光再生放大系统(Phidia, UpTek Solutions)产生的超短激光脉冲作为刻写光源,输出激光的中心波长为 775 nm,重复频率为 50 kHz,脉冲宽度为 160 fs。用二分之一波片和偏振分光镜(PBS)调节激光脉冲的能量,用计算机控制的快门来调节超短激光脉冲对样品的曝光时间。实验所用的 Yb:YAG 晶体属于立方晶系,掺杂的原子数分数为 5%,莫氏硬度为 8.5,在 1030 nm 波长处的折射率为 1.82。实验中采用横向刻写双线的方法,即激光传播方向(沿  $x$  轴传播)垂直于样品平移方向(沿  $z$  轴平移);并采用分步式的刻写步骤。如图 1 所示,把六面抛光的样品(尺寸为  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ )装在 XYZ 三维精密位移控制平台上,使用 20× 的聚焦显微镜(数值孔径为 0.42)把飞秒激光脉冲聚焦于样品表面以下  $200 \mu\text{m}$  处。先在某一固定的位置刻写出一条损伤痕迹,再把样品移动到另一个位置刻写出另一条损伤痕迹。在这两条刻写痕迹之间由于应力挤压效应,使得中间的挤压区域形成波导。实验中在不同激光参数的条件下刻写了不同间距的双线型波导。通过非球面聚焦镜( $f=18 \text{ mm}$ )把 976 nm 的激光耦合进波导,再使用 10× 显微镜将输出的近场模成像到电荷耦合器件(CCD)上,从而获得波导的近场光强分布图,通过近场模判断波导的导光性能。

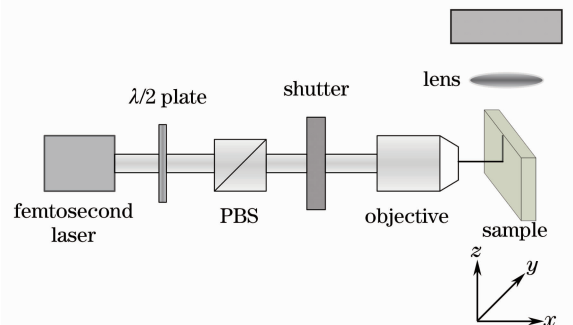


图 1 超快激光刻写光波导实验装置示意图  
Fig. 1 Schematic diagram for ultrafast laser waveguide writing experimental setup

## 3 波导偏振导光特性研究

在光刻双线型波导过程中,由于激光脉冲和材

料相互作用区域发生了多光子吸收等非线性效应,脉冲能量转移到了晶格,致使晶格产生缺陷从而引起了激光作用区域的材料发生膨胀,而双线之间的区域由于受到挤压导致折射率发生改变。双线之间的区域产生了应力双折射<sup>[27]</sup>,不同偏振方向的光对应的折射率不同。图 2 是双线型波导的横截面图和相应的近场模式图,该双线型波导的刻写参数为脉冲能量  $5.0 \mu\text{J}$ ,刻写速度  $400 \mu\text{m/s}$ ,双线间距  $30 \mu\text{m}$ ,所有实验的耦合激光波长都为  $976 \text{ nm}$ 。图

中的箭头方向为被耦合激光的偏振方向,图 2(b)说明双线型波导能导通偏振方向平行于双线方向的偏振光,图 2(c)说明双线型波导不能导通偏振方向垂直于双线方向的偏振光。产生此偏振依赖导光的现象是因为图 2(b)中偏振方向的激光对应的折射率高于基质,从而导通;而图 2(c)中偏振方向的激光对应的折射率低于了基质,所以不导光。因此该类波导可以做成波导偏振器,在集成光学里有巨大的应用前景。

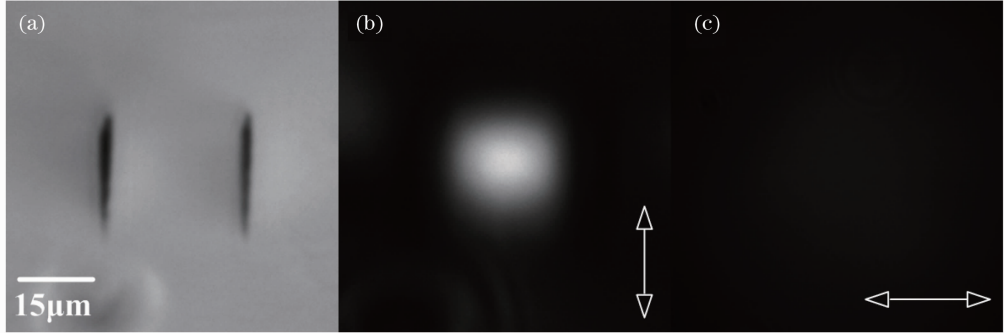


图 2 双线型波导的横截面图和近场模式图。(a)双线结构波导的横截面图;(b)耦合激光偏振方向平行于双线时对应的近场模;(c)耦合激光偏振方向垂直于双线时对应的近场模

Fig. 2 Cross-section view images and near field modes of the double line waveguide. (a) Cross-section view image of double line waveguide; (b) near field mode of injected laser radiation with polarization parallel to the double line; (c) near field mode of injected laser radiation with polarization perpendicular to the double line

## 4 刻写参数对波导形成的影响

### 4.1 双线间距的影响

为了研究双线间距对波导的影响,固定激光脉冲能量为  $5.0 \mu\text{J}$ ,刻写速度控制为  $400 \mu\text{m/s}$ ,改变不同的双线间距写入波导。图 3 给出了不同刻写间

距的光波导在白光下的横截面图和相应的近场模式图。实验中发现刻写间距为  $20 \mu\text{m}$  时所刻写的波导近场模式近似矩形分布,纵横比较大,不利于实现高效率的耦合;当刻写间距增加至  $25 \sim 30 \mu\text{m}$  区间时,近场模式相对均匀对称,波导导光性能良好;继

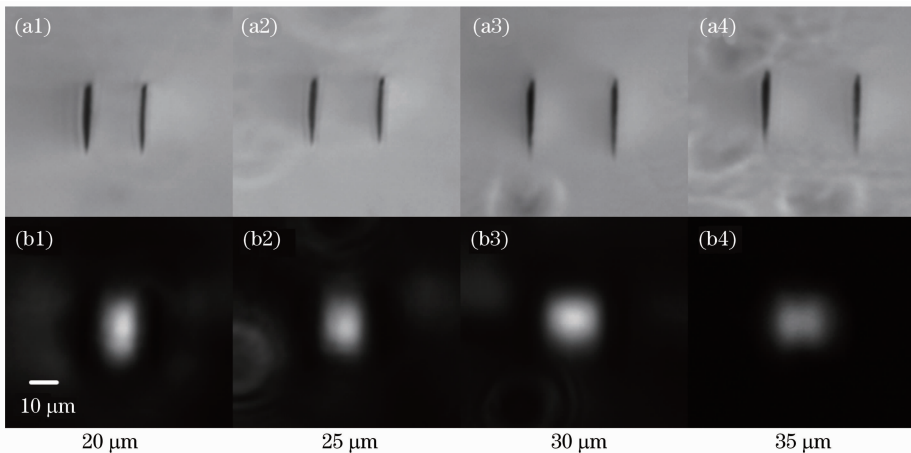


图 3 刻写脉冲能量为  $5.0 \mu\text{J}$ ,刻写速度为  $400 \mu\text{m/s}$ ,不同刻写间距下波导横截面图和波导近场模式图

Fig. 3 Cross-section view images and near field mode images of waveguides with different writing spacings at the writing speed of  $400 \mu\text{m/s}$  and the pulse energy of  $5.0 \mu\text{J}$

续增加刻写间距至  $35\ \mu\text{m}$  时波导明显出现了多模导通,说明这个刻写间距已经不适合刻写单模波导了。刻写间距只有在  $25\sim 30\ \mu\text{m}$  的范围内才可以刻写出导光比较好的单模光波导。

#### 4.2 激光脉冲能量的影响

为了便于研究激光脉冲能量对波导形成的影响,实验中控制刻写速度为  $400\ \mu\text{m}/\text{s}$ ,刻写间距为  $30\ \mu\text{m}$ ,将脉冲能量控制在  $0.3\sim 7.0\ \mu\text{J}$  之间刻写双线型波导。实验表明当刻写脉冲能量小于  $0.3\ \mu\text{J}$  时,材料没有出现任何明显的刻写痕迹,这是因为激光脉冲能量过低,没有达到 Yb:YAG 的损伤阈值。如图 4(a1)所示,当刻写脉冲能量达到  $0.3\ \mu\text{J}$  时,材

料开始出现了刻写痕迹,双线间区域由于应力作用,折射率发生了改变,近场模式图也显示波导微弱导通,但导光性能较差;随着脉冲能量的进一步增大,波导的近场模式图显示波导的导光效果越来越好,波导的导通模式呈现均匀对称的近高斯型分布;继续增加脉冲能量,当脉冲能量增加至  $6.0\ \mu\text{J}$  时,波导的导光性能变差;当脉冲能量增加至  $7.0\ \mu\text{J}$  时,出现了多模导通;此时如果继续增加脉冲能量,激光作用痕迹的形貌开始变得无序不规则,这样就会增加波导的散射损耗,影响其导光能力。由图 4 可知控制写入脉冲能量窗口范围为  $3.0\sim 5.0\ \mu\text{J}$  时都可以写出导光性能较好的波导。

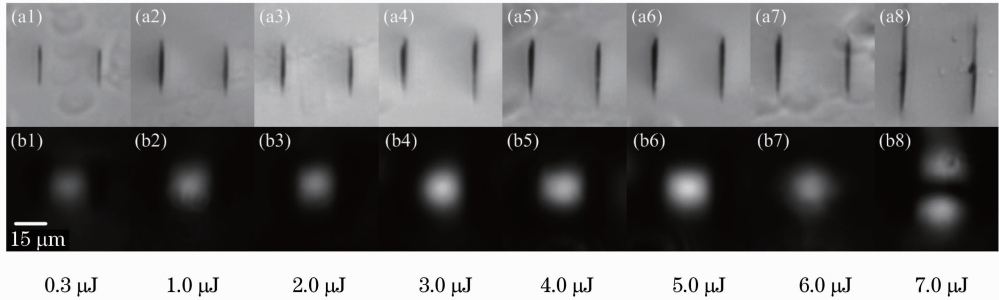


图 4 不同刻写脉冲能量下波导横截面图和波导近场模式图。刻写间距为  $30\ \mu\text{m}$ ,刻写速度为  $400\ \mu\text{m}/\text{s}$   
Fig. 4 Cross-section view images and near field mode images of waveguides with different writing pulse energies at the writing speed of  $400\ \mu\text{m}/\text{s}$  and the writing spacing of  $30\ \mu\text{m}$

#### 4.3 写入速度的影响

为了研究刻写速度对波导形成的影响,固定激光脉冲能量为  $5.0\ \mu\text{J}$ ,刻写间距为  $30\ \mu\text{m}$ ,使用不同的速度刻写双线波导。实验发现当刻写速度小于  $50\ \mu\text{m}/\text{s}$  时,波导出现了明显的损坏,速度只有在  $50\sim 800\ \mu\text{m}/\text{s}$  的范围内才能写出效果较好的光波导。图 5 给出了不同速度下写入光波导的横截面图和波导近场模式图。从图 5(a1)可以看出,在写入

速度为  $50\ \mu\text{m}/\text{s}$  时,由波导横截面图可以看出波导的双线痕迹颜色较深,当注入激光测试波导的近场模式时,发现导光效果不好,如图 5(b1)所示。随着刻写速度增加,波导横截面图显示波导的双线痕迹逐渐均匀且颜色变浅,近场模式图显示波导的导光效果逐渐变好;当速度为  $400\ \mu\text{m}/\text{s}$  时导光效果最好,如图 5(b4)所示近场模式呈现均匀对称的近高斯型分布;随着速度的继续增加,近场模式图显示波

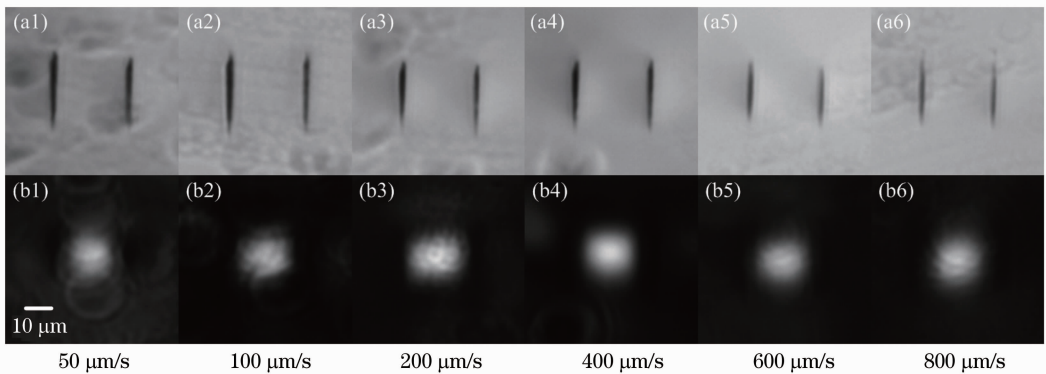


图 5 不同刻写速度下波导横截面图和波导近场模式图。  
刻写间距为  $30\ \mu\text{m}$ ,刻写脉冲能量为  $5.0\ \mu\text{J}$

Fig. 5 Cross-section view images and near field mode images of waveguides with different writing speeds at the writing pulse energy of  $5.0\ \mu\text{J}$  and the writing spacing of  $30\ \mu\text{m}$



导的导光效果又逐渐变差；然而当速度增至  $900 \mu\text{m/s}$  时，材料几乎没有发生任何变化，把激光注入相应的位置也没有发现任何导光模式，说明这个速度已经不足以使材料的折射率发生明显的改变。因此刻写速度只有控制在  $50 \sim 800 \mu\text{m/s}$  之间时波导才能够导通，刻写速度在  $200 \sim 600 \mu\text{m/s}$  之间的波导导光性能较好。

综合以上分析，在双线间距为  $30 \mu\text{m}$ ，脉冲能量为  $5.0 \mu\text{J}$ ，刻写速度为  $400 \mu\text{m/s}$  条件下刻写的波导导光性能最优[见图 5(b4)]，根据该波导近场模式重构了该波导横截面折射率的二维分布<sup>[28]</sup>，从图 6

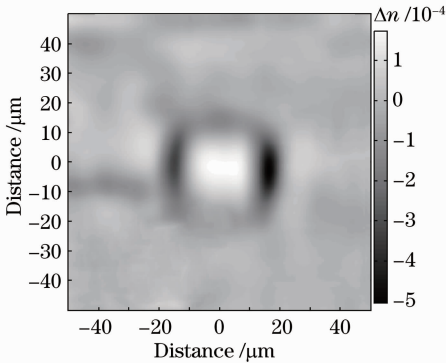


图 6 对应于图 5(b4)的波导折射率二维分布图  
Fig. 6 Calculated refractive index distribution of the waveguide shown in Fig. 5(b4)

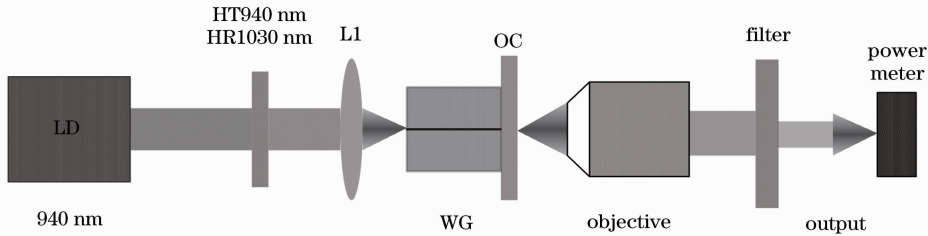


图 7 波导激光实验装置图

Fig. 7 Experimental setup of the waveguide laser

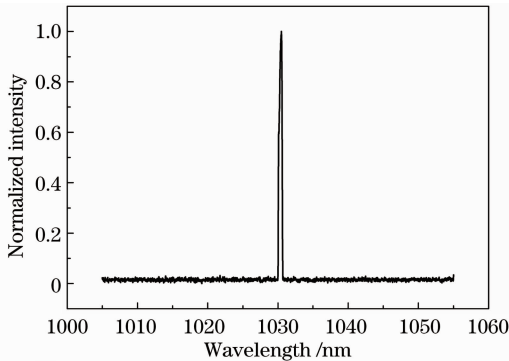


图 8 波导激光器输出激光光谱图。中心波长为  $1030.5 \text{ nm}$   
Fig. 8 Output laser spectrum of the waveguide laser. The central wavelength is  $1030.5 \text{ nm}$

中可以看出波导双线中心区域折射率较基底增加，这也可以解释导光出现在双线之间的区域，其中折射率最大变化量为  $\Delta n = 1.8 \times 10^{-4}$ ，双线位置的折射率较基底降低，图中折射率降低区域的间距恰为  $30 \mu\text{m}$ ，这与图 5(a4)所示双线间距一致。

## 5 波导激光实验研究

图 7 为波导激光器的实验装置图。选用的波导是在脉冲能量为  $5.0 \mu\text{J}$ ，刻写速度为  $400 \mu\text{m/s}$ ，双线间距为  $30 \mu\text{m}$  条件下刻写的波导(WG)。紧贴波导右端的是透射率  $T=30\%$  的  $1030 \text{ nm}$  的耦合输出镜(OC)，左端为双色镜[ $940 \text{ nm}$  高透(HT)， $1030 \text{ nm}$  高反(HR)]，放置于耦合透镜( $f=3.1 \text{ mm}$  的非球面镜)之前。波导激光器采用  $940 \text{ nm}$  的半导体激光器(LD)做为抽运源，抽运光源为空间光输出，通过耦合透镜将空间输出的  $940 \text{ nm}$  激光直接耦合入波导。文中所提到的抽运功率均为  $940 \text{ nm}$  抽运光在通过耦合透镜以后的测量值。采用  $f=20 \text{ mm}$  的显微物镜将波导右端输出的激光准直至  $1030 \text{ nm}$  带通滤光片上，以便功率及光谱的测量。实验中在抽运光功率升至  $188 \text{ mW}$  时输出连续激光，当抽运功率升至最大输出功率  $300 \text{ mW}$  时，输出的连续光功率为  $4.7 \text{ mW}$ ，中心波长为  $1030.5 \text{ nm}$ 。输出激光光谱图如图 8 所示。

## 6 结 论

本文使用重复频率为  $50 \text{ kHz}$ ，脉冲宽度为  $160 \text{ fs}$ ，中心波长为  $775 \text{ nm}$  的飞秒激光在 Yb:YAG 晶体上刻写双线型应力波导，发现了此类波导具有偏振导光现象，偏振态平行于双线方向的激光可以导通，偏振态垂直于双线方向的激光不能导通。详细研究了双线间距，刻写速度及激光脉冲能量对于双线型波导形成的影响，在双线间距为  $30 \mu\text{m}$ ，刻写速度为  $400 \mu\text{m/s}$ ，激光脉冲能量为  $5.0 \mu\text{J}$  的光刻参数下写入的光波导导光特性最优。利用近场模式反推获得了最优光波导的折射率二维分布，光波导区域折射率相对于基底改变量的最大值为  $1.8 \times$

$10^{-4}$ ; 并进行了波导激光实验, 得到了功率为 4.7 mW, 中心波长为 1030.5 nm 的连续激光输出。

## 参 考 文 献

- 1 J R Vazquez de Aldana, P Moreno, L Roso. Ultrafast lasers: A new frontier for optical materials processing [J]. *Opt Mater.* 2012, 34(3): 572–578.
- 2 R G Rafael, M Eric. Femtosecond laser micromachining in transparent materials [J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(4): 219–225.
- 3 K M Davis, K Miura, N Sugimoto, *et al.*. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser [J]. *Opt Lett*, 1996, 21(21): 1729–1731.
- 4 B C Stuart, M D Feit, A M Rubenchik, *et al.*. Laser-induced damage in dielectrics with nanosecond to subpicosecond pulses [J]. *Phys Rev Lett*, 1995, 74(12): 2248–2251.
- 5 M Lenzner, J Kruger, S Sartania, *et al.*. Femtosecond optical breakdown in dielectrics [J]. *Phys Rev Lett*, 1998, 80(18): 4076–4079.
- 6 C B Schaffer, A Brodeur, J F Garcia, *et al.*. Micromachining bulk glass by use of femtosecond laser pulses with nanojoule energy [J]. *Opt Lett*, 2001, 26(2): 93–95.
- 7 C B Schaffer, J F Garcia, E Mazur. Bulk heating of transparent materials using a high repetition-rate femtosecond laser [J]. *Appl Phys A*, 2003, 76(3): 351–354.
- 8 Hou Fang, Li Weinan, Bai Jing, *et al.*. Femtosecond-laser-written waveguide in magnetic-optical glass [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0314002.  
侯方, 李玮楠, 白晶, 等. 飞秒激光在磁旋光玻璃中写入光波导的研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0314002.
- 9 Xuewen Long, Jing Bai, Xin Liu, *et al.*. Buried waveguide in neodymium-doped phosphate glass obtained by femtosecond laser writing using a double line approach [J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(10): 102301.
- 10 Y Jia, F Chen, J R Vázquez de Aldana, *et al.*. Efficient continuous-wave laser operation at 1064 nm in Nd:YVO<sub>4</sub> cladding waveguides produced by femtosecond laser inscription [J]. *Opt Express*, 2012, 20(4): 16801–16806.
- 11 Long Xuewen, Bai Jing, Liu Xin, *et al.*. Inscription of waveguides in terbium gallium garnet using femtosecond laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0432002.  
龙学文, 白晶, 刘欣, 等. 飞秒激光在钽镱石榴石中的光刻光波导[J]. *光学学报*, 2013, 34(4): 0432002.
- 12 A Benayas, W F Silva, C Jacinto, *et al.*. Thermally resistant waveguides fabricated in Nd:YAG ceramics by crossing femtosecond damage filaments [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(18): 330–332.
- 13 T Calmano, A G Paschke, J Siebenmorgen, *et al.*. Characterization of an Yb:YAG ceramic waveguide laser, fabricated by the direct femtosecond-laser writing technique [J]. *Appl Phys A*, 2011, 103(1): 1–4.
- 14 G Cheng, K Mishchik, C Maclair, *et al.*. Ultrafast laser photoinscription of polarization sensitive devices in bulk silica glass [J]. *Opt Express*, 2009, 17(12): 9515–9525.
- 15 Bai Jing, Long Xuewen, Liu Xin, *et al.*. Embedded optical waveguides fabricated in SF10 glass by low-repetition-rate ultrafast laser [J]. *Appl Opt*, 2013, 52(30): 7288–7294.
- 16 Li Dongjuan, Lin Ling, Lü Baida, *et al.*. Polarization-dependent optical guiding in low repetition frequency femtosecond laser photowritten type II fused silica waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0532001.  
李冬娟, 林灵, 吕百达, 等. 低重复频率飞秒激光在石英玻璃内写入的 II 类波导的偏振依赖导光性研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0532001.
- 17 G D Marshall, M Ams, M J Withford. Direct laser written waveguide-Bragg gratings in bulk fused silica [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(18): 2690–2691.
- 18 J Liu, Z Zhang, S Chang, *et al.*. Directly writing of 1-to-N optical waveguide power splitters in fused silica glass using a femtosecond laser [J]. *Opt Commun*, 2005, 253(4-6): 315–319.
- 19 C Maclair, G Cheng, N Huot, *et al.*. Dynamic ultrafast laser spatial tailoring for parallel micromachining of photonic devices in transparent materials [J]. *Opt Express*, 2009, 17(5): 3531–3542.
- 20 A M Streltsov, N F Borrelli. Fabrication and analysis of a directional coupler written in glass by nanojoule femtosecond laser pulses [J]. *Opt Lett*, 2001, 26(1): 42–43.
- 21 S Taccheo, G D Valle, R Osellame, *et al.*. Er:Yb-doped waveguide laser fabricated by femtosecond laser pulses [J]. *Opt Lett*, 2004, 29(22): 2626–2628.
- 22 Bai Jing, Long Xuewen, Liu Xin, *et al.*. Femtosecond laser written waveguide in Yb<sup>3+</sup>:Phosphate glass and waveguide lasing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 34(4): 0432003.  
白晶, 龙学文, 刘欣, 等. 飞秒激光在掺 Yb<sup>3+</sup> 磷酸盐玻璃中写入光波导及波导激光器的实验研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0432003.
- 23 P Lacovara, H K Choi, C A Wang, *et al.*. Room-temperature diode-pumped Yb:YAG lasers [J]. *Opt Lett*, 1991, 16(14): 1089–1091.
- 24 M Ross. YAG laser operation by semiconductor laser pumping [J]. *Proc IEEE*, 1968, 56(2): 196–197.
- 25 Qiu Hongwei, Yang Peizhi, Zhong Heyu, *et al.*. Influence of annealing and doping on Yb:YAG [J]. *Chinese J Lasers*, 2002, 29(5): 439–443.  
邱宏伟, 杨培志, 钟鹤裕, 等. Yb:YAG 激光晶体的高温退火和高浓度掺杂效应[J]. *中国激光*, 2002, 29(5): 439–443.
- 26 Yang Peizhi, Deng Peizhen, Xu Jun, *et al.*. Spectroscopy and laser performance of Yb<sup>3+</sup> doped YAG crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(1): 132–135.  
杨培志, 邓佩珍, 徐军, 等. Yb:YAG 晶体的光谱和激光性能[J]. *光学学报*, 1999, 19(1): 132–135.
- 27 J Burghoff, S Nolte, A Tunnermann. Origins of waveguiding in femtosecond laser-structured LiNdO<sub>3</sub> [J]. *Appl Phys A*, 2007, 89(1): 127–132.
- 28 F Caccavale, F Segato, I Mansour, *et al.*. A finite differences method for the reconstruction of refractive index profiles from near-field measurements [J]. *J Lightwave Technol.* 1998, 16(7): 1348–1353.

栏目编辑: 王晓珉