

飞秒激光在掺Yb³⁺磷酸盐玻璃中刻写双线型光波导的研究

唐文龙^{1,2} 刘爽^{1,2} 程光华¹

¹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

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 利用重复频率为 50 kHz, 中心波长为 790 nm, 脉冲宽度为 140 fs 的飞秒激光脉冲在掺 Yb³⁺ 磷酸盐玻璃中刻写双线型光波导。研究了双线间距, 激光脉冲能量和刻写速度对波导形成的影响, 并测试了不同刻写参数下波导的导光模式。实验结果表明, 在双线间距为 35 μm, 激光脉冲能量为 1.0 μJ, 刻写速度为 600 μm/s 的条件下写入的光波导导光性能最优; 利用近场模式重建了激光诱导该波导的折射率二维分布, 波导区域相对于基质的最大折射率改变为 1.5×10^{-4} , 并利用散射法测试了波导的传输损耗, 传输损耗为 1.56 dB/cm。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。

关键词 集成光学; 飞秒激光; 掺 Yb³⁺ 磷酸盐玻璃; 偏振导光; 光波导

中图分类号 TN249; TN25

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0406005

Study on Writing Double Line Waveguide in Yb³⁺: Phosphate Glass by Femtosecond Laser

Tang Wenlong^{1,2} Liu shuang^{1,2} Cheng Guanghua¹

¹State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract By using femtosecond laser with repetition frequency of 50 kHz, center wavelength of 790 nm, and pulse width of 140 fs, double line waveguides are inscribed in Yb³⁺ doped phosphate glass. The influences of double-line separation, laser pulse energy and writing speed on the waveguide formation are investigated and the near-field modes of waveguides written by different laser parameters are measured. The experimental results show that the waveguide has good property of guiding under the writing conditions of double-line separation of 35 μm, pulse energy of 1.0 μJ and scanning speed of 600 μm/s. By using near-field mode, bivariate distribution of the waveguide refractive index is reconstructed with the maximum refractive index change of 1.5×10^{-4} . The propagation loss of the waveguide is 1.56 dB/cm by testing with the scattering technique. The phenomenon of polarization guiding is discovered from the waveguide. The waveguide can guide the laser with polarization parallel to the direction of double line and the laser with polarization perpendicular to the direction of double line cannot be guided.

Key words integrated optics; femtosecond laser; Yb³⁺ doped phosphate glass; polarization dependent guiding; optical waveguide

OCIS codes 140.3390; 230.7380; 230.2240

收稿日期: 2014-11-19; 收到修改稿日期: 2014-12-26

基金项目: 国家自然科学基金(61223007, 61378019)、陕西省科学基金(Y235141D04)

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, 硕士生导师, 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)

1 引言

近红外区的飞秒激光脉冲刻写技术避免了紫外激光对大多数材料不透明的缺点,深入透明材料内部实现了真正意义上的三维立体微加工,在实现复杂的高密度集成光子器件方面展现了巨大的应用潜力。因此利用飞秒激光脉冲在各种不同的透明电介质内刻写微缩的三维光子器件引起了人们极大的兴趣。飞秒激光脉冲刻写技术具有作用时间极短,热效应小(几乎可以忽略),加工精度高,制作工艺简单,适用范围广,成本相对较低等优点^[1-3]。当飞秒激光脉冲与透明电介质相互作用时,会在焦点附近的区域内产生多光子吸收等非线性效应,使得介质材料内部折射率产生永久性的改变,根据刻写激光参数以及材料的不同^[4-5],产生正折射率改变或负折射率改变。利用该技术人们已经制成了光波导^[6-10]、波导耦合器^[11-12]、波导分束器^[13]、波导光栅^[14]、波导偏振器^[15]、波导激光器^[16-17]等。

掺 Yb^{3+} 磷酸盐增益介质玻璃具有受激发射截面大,抽运效率高,激光振荡阈值低,光谱简单,热机械性能良好,热生成率较低,饱和储能密度较高,掺杂浓度高,较长的荧光寿命以及较低的非线性系数等优点,是理想的激光介质之一,已经成为研究的热点并得到了广泛应用^[18-19]。因此,利用飞秒激光脉冲刻写技术在掺 Yb^{3+} 磷酸盐玻璃上制作三维光子结构的光子器件也成为了新的研究方向。飞秒激光在透明电介质中刻写光波导一般可以分为两类:I类波导(激光焦点在介质内部刻写出一条折射率改变量为正的导光轨迹,波导位于激光焦点诱导的轨迹内)和II类波导即双线型波导(激光焦点在介质内部刻写出两条折射率改变量为负的损伤痕迹,损伤痕迹之间的区域折射率改变量为正,波导位于两条损伤痕迹之间)。非晶体材料如各种玻璃通常适合制备I类光波导;晶体材料通常适合制备II类光波导。近年来,国内外相继报道过在掺 Yb^{3+} 磷酸盐玻璃中刻写I类光波导^[20-22],而没有关于刻写II类光波导的报道。

本文使用重复频率为50 kHz的近红外飞秒激光在掺 Yb^{3+} 磷酸盐玻璃中刻写双线型光波导,研究了双线间距、激光脉冲能量、刻写速度对光波导形成的影响,测试了不同参数下光波导的导光模式,实验显示当使用双线间距为35 μm ,刻写速度为600 $\mu\text{m/s}$,激光脉冲能量为1.0 μJ 时得到的光波导导光特性良好。利用近场模式反推获得了波导折射率的二维分布,并利用散射法测试了波导的传输损耗,波导区域折射率相对于基质改变量的最大值为 1.5×10^{-4} ,传输损耗为1.56 dB/cm。实验中发现此类光波导具有偏振导光特性,只能导通偏振方向平行于双线方向的激光。

2 实验介绍

飞秒激光脉冲刻写光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)产生的飞秒激光脉冲作为刻写光源,输出激光的中心波长为790 nm,重复频率为50 kHz,脉冲宽度为140 fs。用计算机控制的电动快门来调节飞秒激光脉冲对样品的曝光时间,通过1/2波片和偏振分光镜(PBS)来调节激光脉冲的能量。实验中所使用的样品掺 Yb^{3+} 磷酸盐玻璃的尺寸为12 mm \times 10 mm \times 3 mm,掺杂粒子数分数为9%,折射率为1.535。实验中采用横向刻写双线型光波导的方法,即样品移动方向(沿 z 轴平移)垂直于激光传播方向(沿 x 轴传播),把6面抛光的掺 Yb^{3+} 磷酸盐玻璃样品装在XYZ三维精密位移控制平台上(Physik Instrumente),使用10 \times 的聚焦显微镜把飞秒激光脉冲聚焦于样品表面以下100 μm 处,分别在不同参数条件下刻写双线型光波导。写入光波导的长度为10 mm。通过非球面聚焦镜把976 nm的激光耦合

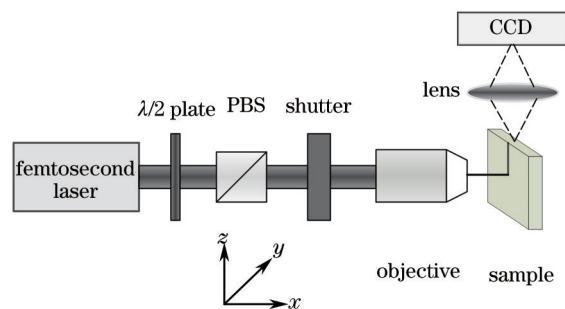


图1 飞秒激光刻写光波导实验装置示意图

Fig.1 Experimental schematic of femtosecond laser waveguide writing

进光波导,使用10×显微镜将输出的近场模式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,通过近场模式判断波导的导光性能。

3 激光焦斑成丝的分析

在飞秒激光脉冲刻写双线型光波导实验中,为了选取合适的刻写参数及刻写深度,分别研究了同一激光脉冲能量同一刻写速度下在不同深度处的成丝痕迹,同一刻写速度在同一深度处不同激光脉冲能量时的成丝痕迹,以及同一激光脉冲能量在同一深度处不同刻写速度时的成丝痕迹。图2(a)给出了激光脉冲能量为1.0 μJ、刻写速度为600 μm/s时,材料表面以下不同深度处激光焦斑的成丝痕迹,实验结果表明,随着写入深度的增加激光焦斑成丝长度逐渐增加,成丝区域的痕迹颜色逐渐变淡且成丝分布不均匀,说明激光焦斑成丝对材料的修饰能力随深度的增加而减弱。图2(b)给出了在材料表面以下100 μm处,刻写速度为600 μm/s,不同激光脉冲能量下激光焦斑的成丝痕迹。由图可以看出,当刻写脉冲能量过低时,材料几乎没有损伤,随着刻写脉冲能量的增加,成丝长度增加,成丝痕迹颜色逐渐变深且损伤均匀,说明激光焦斑成丝对材料的修饰能力随着刻写脉冲能量的增加而增强;当刻写脉冲能量超过一定值时,刻写痕迹成丝较长且不均匀分布,靠近表面一端材料已明显出现损坏。图2(c)给出了在材料表面以下100 μm处,激光脉冲能量为1.0 μJ,不同刻写速度下激光焦斑的成丝痕迹,由图可以看出当刻写速度较高时成丝痕迹相对均匀分布,随着速度的逐渐降低,成丝痕迹逐渐变长且不均匀分布,靠近表面一端对材料的修饰明显强于远离表面一端,不利于形成良好的光波导。因此,最终选取在材料表面以下约100 μm处,激光脉冲能量在0.2~2.0 μJ范围内,刻写速度在10~800 μm/s之间,刻写双线型光波导。

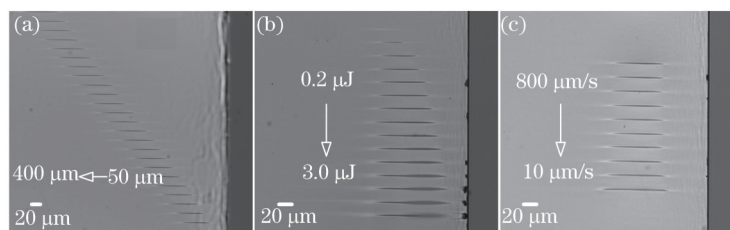


图2 激光焦斑成丝痕迹图。(a) 同一激光脉冲能量同一刻写速度不同深度; (b) 同一刻写速度同一深度不同激光脉冲能量; (c) 同一激光脉冲能量同一深度不同刻写速度

Fig.2 Images of the silk trace of laser focal spot. (a) With different writing depths at the same pulse energy and writing speed; (b) with different pulse energies at the same writing speed and writing depth; (c) with different writing speeds at the same pulse energy and writing depth

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形成的影响,固定刻写速度为600 μm/s,激光脉冲能量为1.0 μJ,改变不同的双线间距写入波导。图3给出了不同刻写间距下光波导在白光下的横截面图和相应的近场模式图。实验中

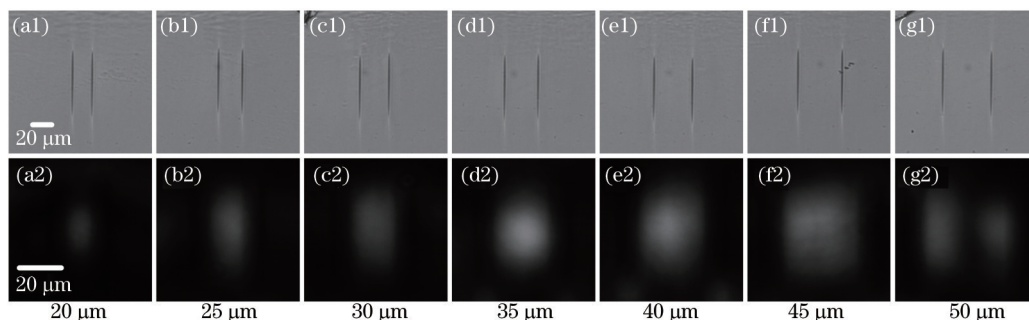


图3 刻写速度为600 μm/s,刻写脉冲能量为1.0 μJ,不同刻写间距下(a1)~(g1)波导横截面图和(a2)~(g2)波导近场模式图
Fig.3 (a1)~(g1) Cross-section view images and (a2)~(g2) near field mode images of waveguides with different writing spacings at the writing speed of 600 μm/s and the pulse energy of 1.0 μJ

发现刻写间距为 20 μm 时所刻写的波导的导光性能较差,随着双线间距的增大导光效果逐渐变好,但近场模式呈现近长条形分布,纵横比较大,不利于实现高效率的耦合;当刻写间距增加到 35 μm 时,波导近场模式呈现相对均匀对称的近高斯型分布,导光性能良好;继续增加双线间距,波导导光效果又逐渐变差,近场模式呈现近矩形分布;当双线间距增至 50 μm 时波导出现了明显的多模导通,说明这个刻写间距已经不适合刻写导光性能良好的单模波导。因此,双线间距只有在 35~45 μm 之间才可以写出导光较好的单模光波导。

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,实验中刻写间距控制为 35 μm ,刻写速度为 600 $\mu\text{m}/\text{s}$,使用不同的激光脉冲能量刻写双线型光波导,图 4 给出了不同激光脉冲能量下写入光波导的横截面图和波导近场模式图。实验结果表明,当刻写激光脉冲能量为 0.2 μJ 时,材料几乎没有出现任何明显的损伤痕迹,把激光注入相应的位置也没有发现任何导光模式,这是因为激光脉冲能量过低,没有达到材料的损伤阈值。当刻写激光脉冲能量达到 0.4 μJ 时,材料开始出现了较为明显的刻写痕迹,但近场模式图显示波导不能导通;随着脉冲能量进一步增大,波导的近场模式图显示波导的导光效果越来越好;当激光脉冲能量增加至 1.0 μJ 时,波导的近场模式呈现相对均匀对称的近高斯型分布,导光效果良好;继续增加激光脉冲能量至 1.2 μJ 时,波导的近场模式呈现近长条形分布,纵横比较大,不利于实现高效的耦合;当激光脉冲能量增加至 1.4 μJ 时,波导出现了多模导通;如果继续增加激光脉冲能量,激光作用区域的形貌开始变得不规则,这会增加波导的散射损耗,影响导光能力。因此,只有控制刻写激光脉冲能量在 0.8~1.2 μJ 时才能写出导光性能较好的光波导。

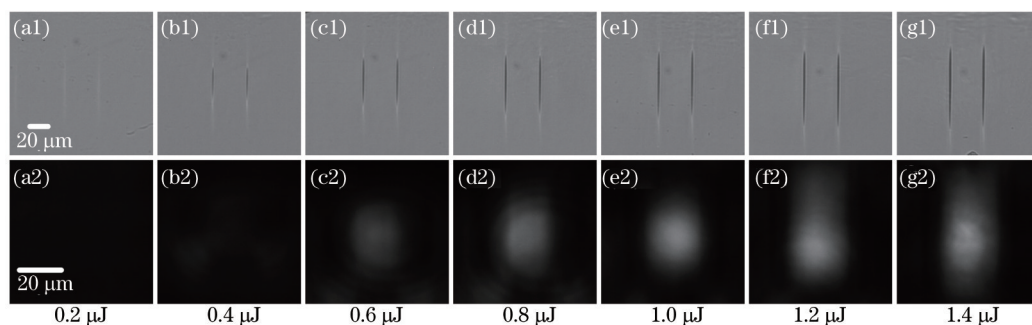


图 4 双线间距为 35 μm ,刻写速度为 600 $\mu\text{m}/\text{s}$,不同刻写脉冲能量下(a1)~(g1)波导横截面图和(a2)~(g2)波导近场模式图
Fig.4 (a1)~(g1) Cross-section view images and (a2)~(g2) near field mode images of waveguides with different writing pulse energies at the writing depth of 35 μm and the writing speed of 600 $\mu\text{m}/\text{s}$

4.3 刻写速度的影响

为了研究刻写速度对波导形成的影响,固定刻写间距为 35 μm ,激光脉冲能量为 1.0 μJ ,使用不同的速度刻写双线型光波导。图 5 给出了不同刻写速度下写入光波导的横截面图和波导近场模式图。可以看出,当刻写速度为 10 $\mu\text{m}/\text{s}$ 时,波导出现了明显的多模导通,导光性能较差;当刻写速度为 50 $\mu\text{m}/\text{s}$ 时,波导的近场模式呈现长条形分布,纵横比较大,不利于实现高效率的耦合;随着刻写速度增加,波导的导光效果

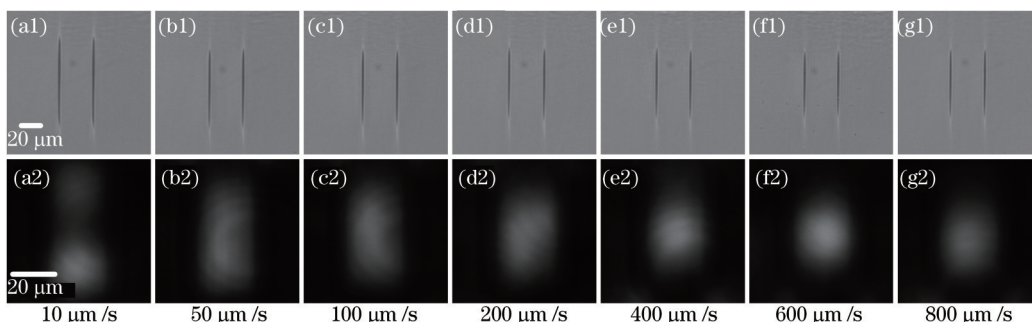


图 5 刻写间距为 35 μm ,刻写脉冲能量为 1.0 μJ ,不同刻写速度下(a1)~(g1)波导横截面图和(a2)~(g2)波导近场模式图
Fig.5 (a1)~(g1) Cross-section view images and (a2)~(g2) near field mode images of waveguides with different writing speeds at the writing depth of 35 μm and the writing pulse energy of 1.0 μJ

逐渐变好,但由近场模式图可以看出波导的近场模式还是呈现近长条形分布;当速度增加到 600 $\mu\text{m/s}$ 时导光效果最好,近场模式呈现相对均匀对称的近高斯型分布;随着速度的继续增加,近场模式图显示波导的导光效果变差。因此,只有刻写速度控制在 400~800 $\mu\text{m/s}$ 之间才能写出导光性能较好的光波导。

以上实验结果表明,在双线间距为 35 μm ,激光脉冲能量为 1.0 μJ ,刻写速度为 600 $\mu\text{m/s}$ 的参数下刻写的光波导导光性能最好,如图 5(f1)和(f2)所示。利用该波导近场模式重构了该波导横截面折射率的二维分布^[23],如图 6 所示双线型光波导损伤痕迹上的折射率较基底减小,双线之间区域的折射率较基底增加,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 $\Delta n=1.5\times 10^{-4}$ 。利用散射法测得该光波导的传输损耗为 1.56 dB/cm ^[24]。

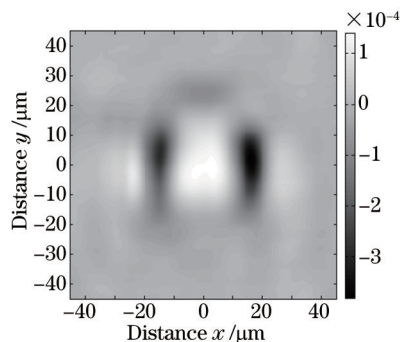


图 6 对应于图 5(f)的波导折射率二维分布图

Fig.6 Calculated refractive index distribution of the waveguide shown in Fig.5 (f)

5 波导偏振导光特性研究

选取激光脉冲能量为 1.0 μJ ,刻写速度为 600 $\mu\text{m/s}$,双线间距为 35 μm 的参数下刻写的双线型光波导来研究波导的偏振导光特性。图 7 是该双线型光波导的横截面图和相应的近场模式图,图中的箭头方向为耦合激光(波长为 976 nm)的偏振方向,图 7(b)表明双线型光波导能导通偏振方向平行于双线方向的偏振光,图 7(c)说明双线型光波导不能导通偏振方向垂直于双线方向的偏振光。这是因为在飞秒激光脉冲刻写双线型光波导过程中,由于飞秒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,激光脉冲能量转移到了晶格上,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,使得激光作用区域的折射率降低,而双线之间的区域由于受到挤压产生了应力双折射^[25],不同偏振方向的光对应的折射率不同,图 7(b)中偏振方向的激光对应的折射率高于基质,因此能够导通,而图 7(c)中偏振方向的激光对应的折射率低于基质,所以不能导通。利用这一特性可以做成波导偏振器,这在集成光学里有着巨大的应用前景。

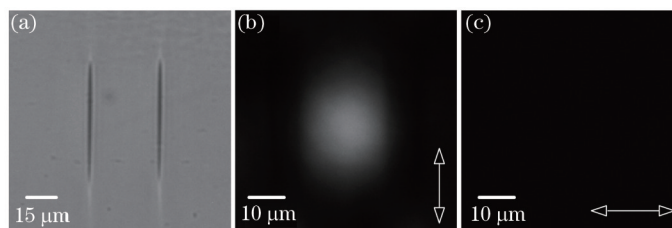


图 7 双线型波导的横截面图和近场模式图。(a) 双线结构波导的横截面图; (b) 耦合激光偏振方向平行于双线时对应的近场模式; (c) 耦合激光偏振方向垂直于双线时对应的近场模式

Fig.7 Cross-section images and near field modes of the double line waveguide. (a) Cross-section images of double line waveguide; (b) near field mode of coupled laser with polarization parallel to the double line; (c) near field mode of coupled laser with polarization perpendicular to the double line

6 结 论

利用重复频率为 50 kHz 的近红外飞秒激光在掺 Yb^{3+} 磷酸盐玻璃上刻写双线型光波导。通过对激光焦斑成丝痕迹的分析选取了初始刻写参数窗口范围。并在该窗口范围内刻写双线型波导,最终获得了在掺

Yb³⁺磷酸盐玻璃上刻写双线型光波导的参数写入窗口范围,即双线间距为35~45 μm,激光脉冲能量为0.8~1.2 μJ,刻写速度为400~800 μm/s才能写出导光良好的光波导。且实验发现,在双线间距为35 μm,激光脉冲能量为1.0 μJ,刻写速度为600 μm/s的刻写参数下写入的光波导导光性能最优。测试了最优光波导的近场模式并利用近场模式反推获得了光波导的折射率二维分布,光波导区域折射率相对于基质改变量的最大值为1.5×10⁻⁴。利用散射法测得最优光波导的传输损耗为1.56 dB/cm。发现了双线型光波导具有偏振依赖导光现象,只能导通偏振态平行于双线方向的激光。

参 考 文 献

- 1 M Shirk, P Molian. A review of ultrashort pulsed laser ablation of materials[J]. J Laser Appl, 1998, 10(1): 18-28.
- 2 R G Rafaelf, M Eric. Femtosecond laser micromachining in transparent materials[J]. Nature Photonics, 2008, 2: 219-225.
- 3 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.
- 4 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.
- 5 M Lenzner, J Kruger, S Sartania, *et al.*. Femtosecond optical breakdown in dielectrics[J]. Phys Rev Lett, 1998, 80(18): 4076-4079.
- 6 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.
- 7 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.
- 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 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 B, 2011, 103(2): 1-4.
- 10 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. 飞秒激光在钽镓石榴石中的光刻光波导[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0432002.
- 11 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.
- 12 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.
- 13 Liu J, Zhang Z, Chang S, *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): 315-319.
- 14 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.
- 15 Lin Ling, Yang Xiaojun, Bai Jing, *et al.*. Femtosecond laser photoinscription of waveguide polarizer[J]. Acta Photonic Sinica, 2011, 40(6): 818-822.
林 灵, 杨小君, 白 晶, 等. 飞秒激光光刻波导偏振器[J]. 光子学报, 2011, 40(6): 818-822.
- 16 J Siebenmorgen, T Calmano, K Petermann, *et al.*. Highly efficient Yb:YAG channel waveguide laser written with a femtosecond laser [J]. Opt Express, 2010, 18(15): 16035-16041.
- 17 R Mary, S J Beecher, G Brown, *et al.*. Compact, highly efficient ytterbium doped bismuthate glass waveguide laser[J]. Opt Lett, 2012, 37(10): 1691-1693.
- 18 Dai Shixun, Hu Lili, Liu Zhuping, *et al.*. Spectrum and laser properties of ytterbium doped phosphate glass at low temperature[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(5): 627-631.
戴世勋, 胡丽丽, 柳祝平, 等. 低温下掺铽磷酸盐激光玻璃的光谱和激光特性[J]. 光学学报, 2002, 22(5): 627-631.
- 19 C Jiang, H Liu, Q Zeng, *et al.*. Yb: phosphate laser glass with high emission cross-section[J]. J Phys Chem Solids, 2000, 61(8):

- 1217–1223.
- 20 M Ams, P Dekker, G D Marshall, *et al.*. Monolithic 100 mW Yb waveguide laser fabricated using the femtosecond–laser direct-write technique[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(3): 247–249.
- 21 G Cerullo, R Osellame, S Taccheo, *et al.*. Femtosecond micromachining of symmetric waveguides at 1.5 μm by astigmatic beam focusing[J]. *Opt Lett*, 2002, 27(21): 1938–1941.
- 22 Bai Jing, Long Xuewen, Liu Xin, *et al.*. Experimental study of femtosecond laser written waveguide in Yb^{3+} : phosphate glass and waveguide laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0432003.
白 晶, 龙学文, 刘 欣, 等. 飞秒激光在掺 Yb^{3+} 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 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.
- 24 S V Rao, K Moutzouris, M Ebrahimzadeh, *et al.*. Measurements of optical loss in GaAs/ Al_2O_3 nonlinear waveguides in the infrared using femtosecond scattering technique[J]. *Opt Commun*, 2002, 213: 223–228.
- 25 J Burghoff, S Nolte, A Tunnermann. Origins of waveguiding in femtosecond laser-structured LiNbO_3 [J]. *Appl Phys A*, 2007, 89(1): 127–132.

栏目编辑: 张 雁