

飞秒激光在掺 Yb³⁺ 磷酸盐玻璃中写入光波导及波导激光器的实验研究

白 晶^{1,2} 龙学文^{1,2} 刘 欣^{1,2} 赵 卫¹ 惠荣庆¹ 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 1 kHz, 中心波长为 800 nm, 脉冲宽度为 120 fs 的飞秒激光在掺 Yb³⁺ 磷酸盐玻璃中刻写光波导, 测试了不同参数下刻写的波导的导光模式, 研究了写入速度和写入脉冲能量对模场直径、波导折射率的影响, 给出了波导形成的写入窗口范围, 对比测试了激光作用区域和未作用区域的荧光光谱特性。实验结果表明, 在采用 20× 显微物镜, 写入速度为 20 μm/s, 写入脉冲能量为 1.8 μJ 时, 所得到的光波导在 976 nm 波段模场直径为 20 μm, 波导区域折射率改变为 2.7×10^{-4} , 飞秒激光作用区域的荧光光谱与基质的荧光光谱几乎完全重合, 荧光特性在飞秒激光作用后保持良好。利用双色镜和 2% 的输出耦合镜构成了法布里-珀罗(F-P)腔掺 Yb³⁺ 波导激光器, 获得了波长为 1031 nm 的连续激光输出, 激光功率为 2.9 mW。

关键词 激光技术; 飞秒激光; 光波导; 掺 Yb³⁺ 磷酸盐玻璃; 波导激光器; 集成光学

中图分类号 TN249; TN25 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0432003

Experimental Study of Femtosecond Laser Written Waveguide in Yb³⁺:Phosphate Glass and Waveguide Laser

Bai Jing^{1,2} Long Xuewen^{1,2} Liu Xin^{1,2} Zhao Wei¹ Hui Rongqing¹ Cheng Guanghua¹

(¹ 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
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Femtosecond laser with repetition rate of 1 kHz, central wavelength of 800 nm and pulse width of 120 fs is used to write waveguides in Yb³⁺:phosphate glass, then near-field modes of waveguide written by different laser parameters are measured. The refractive index changes in the written region and mode field diameter as functions of writing parameters (scanning speed and writing pulse energy) are obtained, which show the writing window of waveguide formation in Yb³⁺:phosphate glass. The fluorescence spectra of the waveguide and the bulk material are tested and compared. Experimental results show that there is no difference in the fluorescence spectra of the waveguide and the bulk material with 20× objective lens, scanning speed of 20 μm/s and pulse energy of 1.8 μJ, the mode field diameter is 20 μm injected at 976 nm, the refractive index change is 2.7×10^{-4} , and the fluorescence properties keep the same after femtosecond laser effect. Stable and continuous wave (CW) Yb³⁺:doped waveguide laser is achieved in a Fabry-Perot cavity configuration by using dichroic mirror and 2% output coupler. An output with power of 2.9 mW at a central wavelength of 1031 nm is obtained.

Key words laser technique; femtosecond laser; optical waveguide; Yb³⁺:phosphate glass; waveguide laser; integrated optics

OCIS codes 320.7090; 230.2240; 140.3390

收稿日期: 2013-11-27; 收到修改稿日期: 2013-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(61223007, 61378019)、中国科学院、国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划(0283457671)、中国科学院西部之光(0729591213)

作者简介: 白 晶(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事飞秒激光写入波导方面的研究。E-mail: bai2000yw@163.com

导师简介: 赵 卫(1963—), 男, 博士, 研究员, 主要从事超快激光技术方面的研究。E-mail: weiz@opt.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: gcheng@opt.ac.cn

1 引言

近年来,飞秒激光脉冲在透明材料内部直写波导(WG)或其他光子器件引起了人们极大的兴趣,相对于传统的离子交换、离子注入等波导制备技术,飞秒光刻技术具有简单、灵活和相对低成本等特点,已经逐渐成为集成光学领域中的新兴技术之一^[1-3]。当飞秒激光被聚焦到透明材料内,达到一定阈值后,在焦点附近的有限区域内会产生多光子电离、雪崩电离等非线性效应,这种局部的能量沉积可以在介质材料内部产生永久的折射率改变,根据材料的不同以及刻写所用激光参数不同,产生的折射率改变或正或负^[4-5]。基于这种技术,已经实现了如波导^[6-10]、波导耦合器^[11-12]、分束器^[13]、光栅^[14]、波导偏振器^[15]和波导激光器^[16-17]等众多三维光子结构。总之,飞秒激光直写光子结构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。

磷酸盐增益介质玻璃在众多的氧化物激光玻璃中,具有受激发射截面大(约为 $3.5 \times 10^{-20} \sim 4.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$)、抽运效率高、激光振荡阈值低等特点,已经成为研究的热点并且已经得到广泛应用^[18-21]。除此以外,磷酸盐玻璃基质具有对稀土离子 Yb^{3+} 、 Er^{3+} 、 Nd^{3+} 等具有较高的溶解度、较长的荧光寿命(大于1 ms)以及较低的非线性系数($10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$)等优点,有利于满足高掺杂、小体积、紧凑结构等集成光学的要求,是理想的光子器件制作基质,因此在磷酸盐玻璃介质上制作三维光子结构也成为了光子器件制造的一个新兴方向,国际上的诸多研究单位都开展了相关研究。2003年,Chan等^[22]利用800 nm,1 kHz,130 fs的超短脉冲激光在单脉冲能量为 $3.5 \mu\text{J}$,写入速度为 $20 \mu\text{m}/\text{s}$ 的条件下在磷酸盐玻璃内部写入了波导结构,波导区域分布于光刻痕迹两侧,模场尺寸约为 $11 \mu\text{m} \times 7 \mu\text{m}$,在632 nm波段导光为单模;2004年,Taccheo等^[23]利用166 kHz,1040 nm,300 fs的高重复频率超短脉冲激光倍频至520 nm,通过 $100\times$ 高数值孔径物镜聚焦在钕镜共掺磷酸盐玻璃内部写入了光波导,并利用腔外光纤结构实现了1.7 mW的1533 nm连续激光输出;此外,Cerullo等^[24-25]提出了使用柱透镜整形方式和狭缝整形方式,将飞秒激光整形后在磷酸盐激光玻璃内横向写入了光波导,使得在磷酸盐玻璃中刻写横截面圆对称的光波导器件成为了可能。

本文基于狭缝整形的横向刻写方式,利用低重复频率飞秒激光在掺 Yb^{3+} 磷酸盐玻璃中写入波导,详细研究了刻写参数对波导形成的影响,给出了波

导写入窗口范围,利用波导近场模式分布数值计算反推出折射率二维分布,分析了波导折射率和模场直径随写入速度、写入脉冲能量等参数的变化规律;对比测试了激光作用区域和非作用区的荧光光谱,实验结果表明波导写入前后的激光性能几乎没有变化,有利于充分利用磷酸盐基质高掺杂的特性实现波导激光输出;利用双色镜(976 nm高透和1030 nm高反)和2%的耦合输出镜构成了法布里-珀罗(F-P)激光振荡腔,实现了中心波长为1031 nm的连续激光输出,激光功率为2.9 mW。

2 实验介绍

实验装置如图1所示,采用钛宝石锁模激光再生放大系统(Spitfire, Spectra Physics)产生的超短脉冲激光作为光刻光源,输出的激光中心波长为800 nm,光谱宽度为12 nm,重复频率为1 kHz,脉冲宽度为120 fs。用电快门控制激光脉冲在样品上的曝光时间,通过 $1/2$ 波片和偏振片调节脉冲能量。实验所用样品为掺 Yb^{3+} 磷酸盐玻璃(Kigre, 掺杂质量分数为9%, $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$),折射率在1032 nm波长处为1.535,将六面抛光的掺 Yb^{3+} 磷酸盐玻璃样品装在能够沿着平行或垂直于激光传播轴的方向移动的三维精密位移控制平台(Physik Instrumente)上。实验中采用了 $20\times$ 的显微物镜(Mitutoyo,工作距离为20 mm,数值孔径 $NA=0.42$)聚焦激光光束。实验中采用横向的写入方式,即样品平移方向(Y轴)垂直于激光传播方向(Z轴),并且利用狭缝整形方式整形聚焦光斑,以获得圆对称的波导横截面^[22],所用狭缝宽度为 $500 \mu\text{m}$,置于显微物镜入瞳前10 cm处,所提到的波导刻写能量均为狭缝和显微物镜后测得。波导刻写长度为

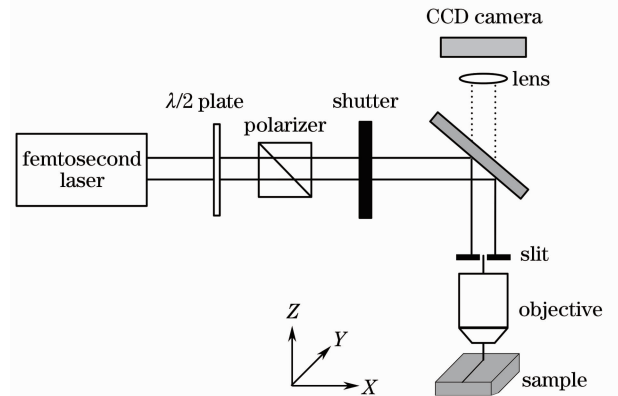


图1 飞秒激光光刻波导实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for femtosecond laser waveguide writing

10 mm,刻写完成之后两端进行抛光处理,抛光后波导长度为 9.6 mm。波导刻写完成后再利用 Olympus BX51 正相对比显微镜(PCM)观察波导的侧面,在这种装置下,灰色背景上的黑色区域代表相对正的折射率改变,而白色区域表示负的折射率改变或者散射中心。近场模式测试采用非相干的发光二极管(LED)白光和 976 nm 的半导体激光作为光源,通过 5× 显微物镜耦合入波导一端,再通过 10× 显微物镜将波导输出端的近场模成像到电荷耦合器件(CCD)上,得到波导的近场光强分布。

3 实验结果及分析

实验中当飞秒激光脉冲宽度小于 300 fs 时,在一定脉冲能量或者刻写速度范围内可以获得正的折射率改变,其中脉冲宽度越短,波导折射率改变越大,导光效果越好,当刻写激光脉宽大于 300 fs 后 PCM 显示刻写区域主要是白色的损伤痕迹,无法获得折射率改变为正的波导,这种现象类似于在熔石英玻璃中刻写波导的实验现象^[7]。下文中刻写波导所采用的脉冲宽度均为激光放大器输出最窄脉宽 120 fs。

3.1 写入速度对波导形成的影响

在激光脉冲能量固定在 1.8 μJ 的条件下,改变不同的刻写速度写入波导,发现在速度小于 5 μm/s 时,刻写波导明显损坏,大于 320 μm/s 时,几乎没有正折射率改变的产生,只有在 10~160 μm/s 的

速度范围内才可以写入光波导。图 2 分别给出了不同速度参数下写入光波导的侧面 PCM 图、波导横截面图和波导近场模式图。从图 2(a1)可以看出,在较低的写入速度 5 μm/s 时,刻写波导已经出现了大部分损伤痕迹(PCM 显示为白色的负折射改变),图 2(b1)中的波导横截面图也显示了相对应的损伤形貌,图 2(c1)中注入激光观察到的波导近场模式未发现导通现象;当写入速度增加至 10 μm/s 后,侧面 PCM 图显示波导为正折射率改变(PCM 显示为黑色痕迹)并且基本均匀,只出现了较小的损伤区域,横截面图也显示波导截面良好,在注入激光后波导导通,近场模式均匀对称,呈近高斯分布,波导近场模式直径约为 20 μm(峰值的 1/e² 全宽度);继续增加刻写速度发现在 20~160 μm/s 这个区间内波导均匀一致性良好,无损伤痕迹出现,近场模式图显示波导导光性质良好;当速度增至 320 μm/s 后,PCM 图片几乎观察不到正折射率改变,对应的位置在注入激光后也未发现导光模式,说明在这个速度时已经不足以产生折射率的改变。在 10~160 μm/s 速度增加的过程中,随着刻写速度增加,正折射率改变量在逐渐减小(由 PCM 显示的波导侧视图灰度定性观察,文中稍后会利用波导近场模式反推折射率改变进行定量讨论),波导横截面的尺寸也相应的减小,而对应的波导近场模式直径由 20 μm 逐渐增加到 30 μm。

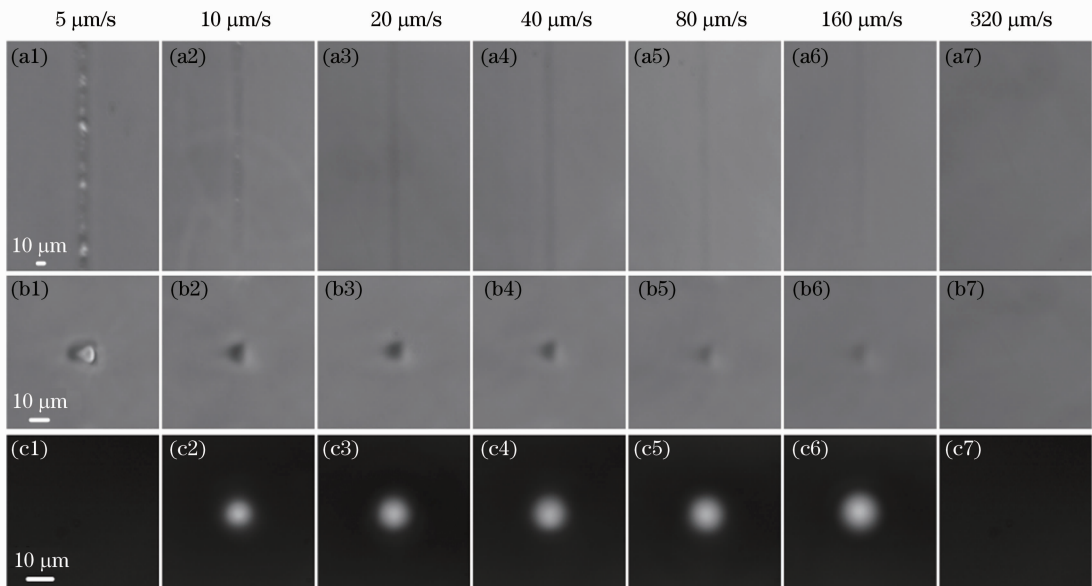


图 2 脉冲能量为 1.8 μJ 时,不同写入速度下(a)波导的侧面 PCM 图、(b)波导横截面图和(c)波导近场模式图
Fig. 2 (a) Side view PCM images, (b) end view images and (c) near field mode images of waveguides with different writing speed parameters and 1.8 μJ pulse energy

为了定量分析波导的折射率改变量,利用有限差分的方法通过波导近场模式反推波导折射率分布^[26]。图3为利用图2(c2)所示的近场模式强度分布图(脉冲能量为 $1.8\ \mu\text{J}$,刻写速度为 $10\ \mu\text{m/s}$)得到的波导区域折射率改变量分布图,从图中可以看出波导中心区域折射率改变最大,边缘逐渐减小,原因是聚焦激光光束能量呈高斯分布,中心区域的峰值功率最大,单位时间积累的能量最多,诱导的折射率变化最大,最大的折射率变化量为 $\Delta n=3.0\times 10^{-4}$,折射率分布为圆形区域,直径约为 $10\ \mu\text{m}$,这与图2中PCM图片所示黑色痕迹尺寸一致。

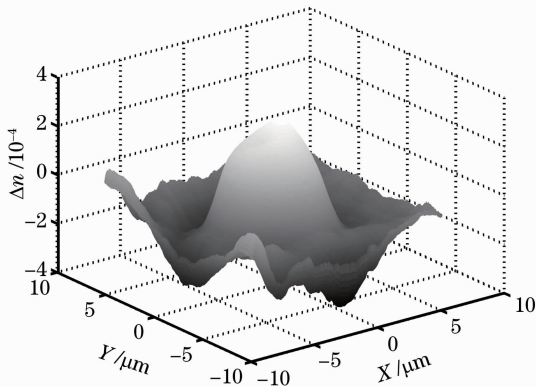


图3 $20\times$ 聚焦物镜, 脉冲能量为 $1.8\ \mu\text{J}$, 刻写速度为 $10\ \mu\text{m/s}$ 时波导折射率改变量分布图

Fig. 3 Calculated refractive index change distribution of the waveguide with $1.8\ \mu\text{J}$ pulse energy, $10\ \mu\text{m/s}$ scanning speed, and $20\times$ objective lens

利用上述反推波导折射率分布的方法,图4给出了在写入激光脉冲能量固定为 $1.8\ \mu\text{J}$ 时,波导区域折射率改变量随写入速度的变化关系。可以看出随着写入速度的增大,折射率改变量逐渐减小,这是

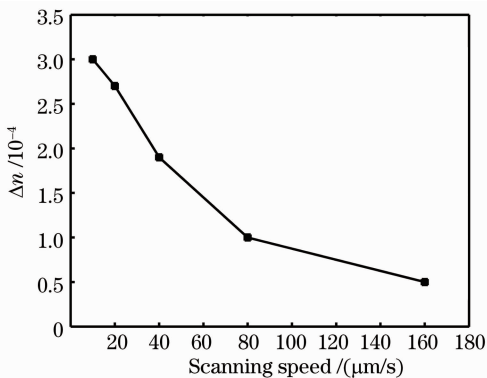


图4 写入激光能量为 $1.8\ \mu\text{J}$ 时折射率变化大小与写入速度的关系

Fig. 4 Refractive index change versus scanning speed with writing pulse energy of $1.8\ \mu\text{J}$

由于写入速度增加导致单位长度接受的激光脉冲个数相对减少,折射率改变也相应降低,波导对激光的限制能力也变弱,从而出现了模场直径逐渐增加的现象。当速度增大至 $160\ \mu\text{m/s}$ 时,折射率改变量降至 0.5×10^{-4} ,在图2中对应的PCM侧面图也显示波导折射率改变不再明显。

由于实验中采用的是低重复频率 $1\ \text{kHz}$ 的飞秒脉冲激光,热累积效应可以忽略,实验过程中飞秒激光导致材料折射率变化的物理机制可以通过色心模型理论解释:掺 Yb^{3+} 磷酸盐玻璃样品在飞秒激光的作用下产生了非线性的电离过程(多光子电离),进而在作用区域产生了高能量的等离子体,而高能量的等离子体又通过电子-声子耦合将能量从等离子体中转移到材料的晶格中,磷酸盐玻璃样品在吸收能量之后,内部的P-O键发生断开,产生了磷氧空穴中心(POHC)和 PO^{3-} ,而前者即为色心的主要组分,飞秒激光作用区域内大量的色心结构则改变了材料的折射率(通过Kramers-Kronig机制)。

3.2 写入激光脉冲能量对波导形成的影响

为了研究激光脉冲能量对波导形成的影响,在实验中将写入速度固定为 $20\ \mu\text{m/s}$,在 $1.0\sim 3.0\ \mu\text{J}$ 的激光脉冲的能量范围内刻写光波导,发现在写入脉冲能量小于 $1.6\ \mu\text{J}$ 时,没有折射率改变,而当写入脉冲能量大于 $2.0\ \mu\text{J}$ 时,激光作用区域出现了明显的损伤现象,只有在一个很小的能量窗口范围 $1.6\sim 2.0\ \mu\text{J}$ 内才能写出质量较好的波导。CCD相机所拍摄的波导近场模式图片也显示在这个能量区间内波导的导光模式良好。与3.1节所述方法相同,通过波导近场模式反推出了波导区域的折射率分布,表1给出了不同写入脉冲能量时所刻写波导的折射率改变量。当脉冲能量为 $1.6\ \mu\text{J}$ 时,折射率改变量仅为 9.6×10^{-5} ,当脉冲能量低于 $1.6\ \mu\text{J}$,没有折射率改变出现,这是由于这是由于脉冲能量过低,没有达到掺 Yb^{3+} 磷酸盐玻璃的折射率改变阈值;随着写入脉冲的能量的增大,折射率改变量逐渐增大,当脉冲能量增大至 $2.0\ \mu\text{J}$ 时,折射率改变量增加至 4.9×10^{-4} ,继续增加脉冲能量出现了损伤痕迹,这是由于脉冲能量超过了掺 Yb^{3+} 磷酸盐玻璃的损伤阈值。通过上述分析也可以看出磷酸盐基质玻璃的非线性诱导折射率阈值和损伤阈值间隔很小,如果希望通过飞秒激光产生波导就需要在一个很小的能量窗口范围内进行波导刻写,这也对刻写激光脉冲的稳定性提出了较高的要求。

表 1 写入速度为 20 $\mu\text{m/s}$ 时,波导折射率改变量与写入激光能量的对应关系

Table 1 Refractive index changes corresponding to different writing laser energies when scanning speed is 20 $\mu\text{m/s}$

Writing laser energy / μJ	Refractive index change
1.5	No waveguide
1.6	9.6×10^{-5}
1.7	1.9×10^{-4}
1.8	2.7×10^{-4}
1.9	3.8×10^{-4}
2.0	4.9×10^{-4}
2.1	Breakdown

3.3 飞秒激光对荧光光谱的影响

掺 Yb³⁺ 磷酸盐玻璃是理想的主动激光介质,具有高掺杂、荧光光谱范围宽、增益稳定等良好的特性。为了研究掺 Yb³⁺ 磷酸盐玻璃样品的荧光特性在激光作用前后的是否受到影响,搭建了一套荧光光谱测量实验装置用于测量波导区域及激光未作用区域(基质)的荧光光谱特性,将单模光纤输出的 976 nm 的半导体抽运光通过焦距 $f=7.5$ mm 的非球面透镜(A375TM-B, Thorlabs)准直,然后利用另一个 $f=18.4$ mm 非球面镜(C280TME-B, Thorlabs)耦合入所刻波导,在波导侧面使用数值孔径 $NA=0.22$ 的多模光纤跳线(AFS105/125Y)收集由半导体抽运光激励后产生的荧光,再通过光谱仪(AQ6370C)记录光纤中探测到的荧光光谱信息。

图 5 给出了在相同的抽运条件下,未写入波导区域和波导区域(写入脉冲能量为 1.8 μJ ,写入速度为 20 $\mu\text{m/s}$)的归一化荧光光谱,可以看出飞秒激光作用区域的荧光光谱与基质的荧光光谱相比几乎没有改变,光谱形状相似,增益峰值位置相同,代表抽运吸收波段的增益凹陷位置也相同,说明了波导区

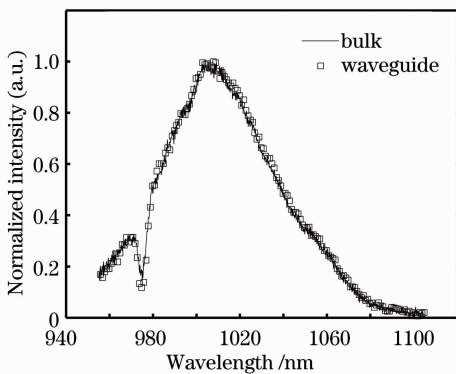


图 5 波导区域和基质在 976 nm 抽运光激励时产生的荧光光谱对比

Fig. 5 Fluorescence spectral comparison of waveguide and the bulk material with 976 nm pump light

域的荧光性质在激光作用之后仍然保持很好,这也为下一步实现波导激光器提供了有力的保证。

3.4 F-P 腔波导连续激光输出实验

3.1 节中的近场模式测量表明写入脉冲能量为 1.8 μJ ,速度分别为 20、40、80、160 $\mu\text{m/s}$ 时,所刻波导导光模式良好,选取这一组波导进行波导激光实验。波导激光实验中所用波导样品两端都要进行精细抛光,处理之后样品面型为 $\lambda/10$,表面质量等级为 20~10,这样可以降低抽运光的耦合损耗,同时也尽量减小由于表面质量不高所产生的腔镜和波导样品之间的空隙,从而降低激光腔内损耗。

波导激光器采用如图 6 所示的 F-P 直线腔结构,1030 nm 高反和 980 nm 高透的双色镜 DM1 和 2% 的 1030 nm 耦合输出镜(OC)构成了激光腔镜。波导激光器的抽运光采用 976 nm 的半导体抽运光(LD-LU0980M500),尾纤为单模光纤(HI1060, Corning),准直透镜 L1 为焦距 $f=7.5$ mm 的非球面镜,耦合透镜 L2 为焦距 $f=18.4$ mm 的非球面镜,将尾纤输出的 976 nm 激光准直后耦合入波导,这里需要指出的是,由于所使用器件都存在损耗,下文中所提到的抽运功率均为光在通过准直透镜、耦合透镜以及双色镜之后的测量值(即最终到达波导左端的抽运功率)。当波导内注入 976 nm 激光后会发出蓝色的上转换荧光,这是一个简单直观地判别抽运耦合效果的现象,如果波导中抽运光耦合越好,那么贯穿整个波导都会发出蓝色上转换荧光,可以通过此现象仔细调节波导位置达到耦合效率最佳。在波导右端采用焦距 $f=18.4$ mm 的另一非球面透镜 L3 将波导输出的光准直输出至 45° 双色镜(DM2)(1030 nm 反射,976 nm 透射),滤掉输出光中的未吸收完全的抽运光成分,将反射光耦合至光谱仪(AQ6370C)以及功率计进行测量。实验中发现脉冲能量为 1.8 μJ ,速度为 20、40、80、160 $\mu\text{m/s}$ 写入条件下获得的波导都可以获得连续激光输出,

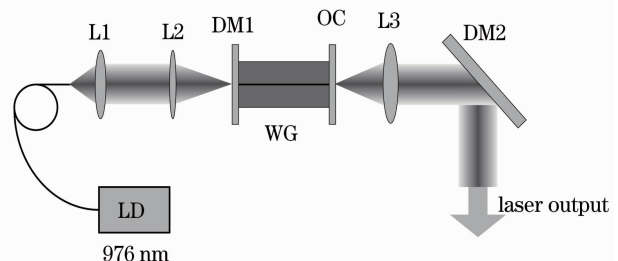


图 6 波导激光器实验装置示意图

Fig. 6 Schematic setup of waveguide laser

其中速度为 $20 \mu\text{m/s}$ 写入的波导,激光抽运阈值最低为 330 mW ,在抽运功率升至 330 mW 时出现了连续激光输出,当抽运功率升至最大 400 mW 时,连续激光输出功率为 2.9 mW ,中心波长为 1031 nm ,如图 7 所示,激光输出稳定。实验中利用 532 nm 的激光(远离吸收光谱波段)测试了脉冲能量为 $1.8 \mu\text{J}$,速度为 $20 \mu\text{m/s}$ 写入波导的插入损耗, 532 nm 的激光光束直径为 1.6 mm ,利用 50 mm 的非球面透镜耦合入波导,在波导另一端利用远场测试波导输出功率,波导左端绿光功率为 50 mW 时,右端测得输出功率为 30 mW ,波导插损(插损为耦合损耗、传输损耗和非涅耳反射损耗之和)约为 2.2 dB ,减去波导两端各 4% (0.178 dB) 左右的菲涅耳反射损耗,耦合损耗和传输损耗就约为 1.85 dB ,由于存在耦合损耗,可以由此推断波导传输损耗小于等于 1.85 dB ,波导单位长度传输损耗小于等于 1.95 dB/cm ,对比常见的熔石英波导传输损耗(小于等于 0.5 dB),此波导的传输损耗略大,这也是激光阈值较高的原因之一。

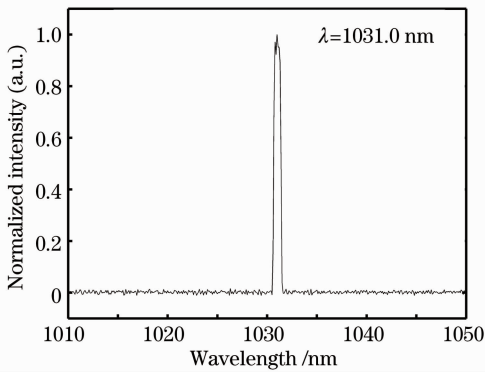


图 7 波导激光器输出光谱图(中心波长为 1031 nm)

Fig. 7 Output spectrum of the waveguide laser (central wavelength is 1031 nm)

4 结 论

通过超短脉冲激光在掺 Yb^{3+} 磷酸盐玻璃中刻写波导的实验研究,获得了波导折射率和模场直径随写入速度,写入功率等参数的变化规律,给出了波导刻写窗口范围。研究了激光作用区域和非作用区的荧光光谱,实验表明波导写入前后的荧光光谱特性保持良好。基于 F-P 腔结构,搭建了掺 Yb^{3+} 磷酸盐玻璃光波导连续激光器,腔镜分别采用 976 nm 高透和 1030 nm 高反的双色镜和 2% (1030 nm) 的输出镜,实验测试得到激光器中心光谱为 1031 nm ,输出功率为 2.9 mW 。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 S Nolte, M Will, J Burghoff, *et al.*. Femtosecond waveguide writing; a new avenue to three-dimensional integrated optics [J]. *Appl Phys A*, 2003, 77(1): 109–111.
- 3 R S Taylor, C Hnatovsky, E Simova, *et al.*. Ultra-high resolution index of refraction profiles of femtosecond laser modified silica structures [J]. *Opt Express*, 2003, 11(7): 775–781.
- 4 H Zhang, S M Eaton, P R Herman. Low-loss type II waveguide writing in fused silica with single picosecond laser pulses [J]. *Opt Express*, 2006, 14(11): 4826–4834.
- 5 S M Eaton, H Zhang, P R Herman, *et al.*. Heat accumulation effects in femtosecond laser-written waveguides with variable repetition rate [J]. *Opt Express*, 2005, 13(12): 4708–4716.
- 6 M Will, S Nolte, B N Chichkov, *et al.*. Optical properties of waveguides fabricated in fused silica by femtosecond laser pulses [J]. *Appl Opt*, 2002, 41(21): 4360–4364.
- 7 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.
- 8 Wang Yuerong, Li Yi, Wang Sijia, *et al.*. Directly writing single polarization microstructure waveguide in fused silica by high repetition rate femto-second laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(12): 1203002.
汪月容, 李 毅, 王思佳, 等. 高重复频率飞秒激光烧蚀熔融石英制作单偏振微结构波导[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1203002.
- 9 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 类波导的偏振依赖光学研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0532001.
- 10 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.
- 11 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.
- 12 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.
- 13 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): 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 Photonica 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 G Della Valle, S Taccheo, R Osellame, *et al.*. $1.5 \mu\text{m}$ single longitudinal mode waveguide laser fabricated by femtosecond laser writing [J]. *Opt Express*, 2007, 15(6): 3190–3194.
- 17 Y Tan, F Chen, J R Vázquez de Aldana, *et al.*. Continuous wave laser generation at 1064 nm in femtosecond laser inscribed Nd:

- YVO₄ channel waveguides [J]. Appl Phys Lett, 2010, 97(3): 031119.
- 18 C Jiang, H Liu, Q Zeng, *et al.*. Yb³⁺ phosphate laser glass with high emission cross-section [J]. J Phys Chem Solids, 2000, 61(8): 1217–1223.
- 19 X Zou, K Itoh, H Toratani. Transmission loss characteristics of fluorophosphate optical fibers in the ultraviolet to visible wavelength region [J]. J Non-Cryst Solids, 1997, 215(1): 11–20.
- 20 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. 低温下掺镱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.
- 21 Zhang Wei, Zhu Jianqiang. Experimental investigation on surface/subsurface damage of Nd-doped phosphate glass [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(2): 268–272.
张伟, 朱健强. 磷酸盐钕玻璃表面/亚表面损伤特性实验研究 [J]. 光学学报, 2008, 28(2): 268–272.
- 22 J Chan, T Huser, S Risbud, *et al.*. Waveguide formation in phosphate glasses using femtosecond laser pulses [J]. Appl Phys Lett, 2003, 82(15): 2371–2373.
- 23 S Taccheo, G D Valle, R Osellame, *et al.*. Er³⁺: Yb-doped waveguide laser fabricated by femtosecond laser pulses [J]. Opt Lett, 2004, 29(22): 2626–2628.
- 24 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.
- 25 M Ams, G D Marshall, D J Spence, *et al.*. Slit beam shaping method for femtosecond laser direct write fabrication of symmetric waveguides [J]. Opt Express, 2005, 13(15): 5676–5681.
- 26 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: 史敏