

飞秒激光在掺Er³⁺“无水”氟碲酸盐玻璃中写入光波导

刘爽^{1,2} 唐文龙^{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1 kHz,中心波长为800 nm,脉冲宽度为120 fs的超短脉冲激光在掺Er³⁺“无水”氟碲酸盐玻璃中利用狭缝整形技术横向刻写了I类和压低圆包层波导。在对波导刻写参数进行系统研究后,得到了两组导光模式较优的波导。利用波导的近场模式强度分布重构了其折射率分布图,得到两类波导最大的折射率增加量分别为 1×10^{-4} 和 1.9×10^{-4} 。用散射法测试了I类波导的传输损耗为1.04 dB/cm;通过测量插入损耗得到压低圆包层波导的传输损耗小于1.88 dB/cm。因此,利用飞秒激光在掺Er³⁺“无水”氟碲酸盐玻璃中刻写的光波导,在集成激光光源制作方面具有很好的应用前景。

关键词 集成光学;光波导;飞秒光刻;狭缝整形;掺Er³⁺“无水”氟碲酸盐玻璃

中图分类号 TN249; TN25

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0413001

Er³⁺: ‘Water-free’ Fluorotellurite Glass Waveguides Written by Femtosecond Laser

Liu Shuang^{1,2} Tang Wenlong^{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 femtosecond laser with repetition rate of 1 kHz, central wavelength of 800 nm and pulse width of 120 fs, Type I (single line) and depressed circular cladding waveguides in Er³⁺ doped ‘water-free’ fluorotellurite glass are transversely written with slit shaping technology, respectively. The impact of the processing conditions on the waveguides’ formation is systematically studied, and the waveguides with better guiding mode are obtained. Refractive index profile is reconstructed by intensity distribution of the near-field mode, and the largest positive refractive index change for Type I waveguide is about 1×10^{-4} , slightly smaller than that (1.9×10^{-4}) of depressed cladding waveguide. By using the scattering technique, the propagation loss of Type I waveguide is about 1.04 dB/cm. The loss of depressed cladding waveguide is less than 1.88 dB/cm by measuring insertion loss. Therefore, Er³⁺ doped ‘water-free’ fluorotellurite glass waveguides inscribed by femtosecond laser are promising candidates for the development of integrated laser resources.

Key words integrated optics; optical waveguide; femtosecond laser writing; slit shaping technology; Er³⁺ doped ‘water-free’ fluorotellurite glass

OCIS codes 130.2790; 320.7090; 160.3380; 140.3390.

收稿日期: 2014-11-05; 收到修改稿日期: 2014-12-09

基金项目: 国家自然科学基金(61223007,61378019)

作者简介: 刘爽(1988—),女,硕士研究生,主要从事飞秒激光写入波导方面的研究。

E-mail: liushuang@opt.ac.cn

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)

1 引 言

自1996年Davis等^[1]首次利用飞秒脉冲激光在玻璃样品中写入光波导以来,飞秒脉冲激光光刻波导技术引起了人们极大的兴趣。相对于离子交换、离子注入等传统的波导制作技术,飞秒光刻波导技术具有简单、灵活、高效率且成本低等特点。当飞秒脉冲激光聚焦到透明材料内部达到一定阈值时,在激光焦点附近很小区域内会产生多光子吸收和雪崩电离等非线性效应,从而在透明材料内部产生永久的折射率变化,故可利用飞秒脉冲激光光刻技术制作三维光子器件^[2],如波导^[3-4]、波导耦合器^[5]、光栅^[6]以及波导激光器^[7]等。根据飞秒脉冲激光写入光波导参数以及激光作用材料的不同,通常将刻写的波导分成三类:1) I类波导,通常是指单线型波导,即飞秒激光在材料中辐射区域诱导的折射率改变量为正,导光区域位于激光损伤线上;2) II类波导,通常是指双线型波导,即飞秒激光在材料中辐射区域诱导的折射率改变量为负,由于应力挤压作用,双线间区域相对于基质材料折射率增加,形成导光区;3) 压低包层波导,飞秒激光在材料中辐射区域诱导的折射率改变量为负,可以通过多次扫描得到一个折射率降低的包层,包层内区域折射率相对增加,形成导光区。

飞秒光刻技术可应用于不同的材料中,常用的基体材料有晶体(如LiNbO₃^[8]、硅^[9]、KGW^[10]以及钛蓝宝石晶体^[11])和玻璃(如熔石英^[12]、磷酸盐^[13]和硼硅酸盐玻璃^[14])。近几年,飞秒激光在碲酸盐玻璃中刻写波导技术引起了人们的关注。2003年,Tokuda等^[15]利用130 fs的脉冲激光在Nb³⁺掺杂碲酸盐玻璃中,第一次纵向刻写了较短长度的I类波导;2005年,Righini等^[16]用超快激光在碲酸盐玻璃中的辐射区域诱导产生了负的折射率改变量,但没有实现波导刻写;2006年,Nandi等^[17]用飞秒激光在掺Er³⁺碲酸盐玻璃中,利用光束非整形技术横向刻写了I类波导;2008年,Fernandez等^[18]用飞秒激光在掺Er³⁺磷-碲酸盐玻璃中,实现I类波导刻写;2010年,Fernandez等^[19]用飞秒激光在Er³⁺/Yb³⁺共掺的磷-碲酸盐玻璃中,分别刻写出有源和无源的I类波导。最近中国科学院西安光学精密机械研究所报道了一种新型的红外激光材料:“无水”氟碲酸盐玻璃^[20-21],它保留了氧化物玻璃物理化学稳定性的同时还具有了可与氟化物和硫系玻璃相比的远至6.1 μm的中红外透过特性,具有好的稀土离子溶解性(质量比达到0.5%)以及较低的固有损耗。在1550 nm处,掺Er³⁺“无水”氟碲酸盐玻璃具有大的吸收截面和发射截面,较长的荧光寿命(约为8.6 ms),以及宽带可调谐的荧光光谱(1400~1650 nm)^[22]。然而,到目前为止没有任何关于飞秒激光在“无水”氟碲酸盐玻璃中刻写波导的报道。

本文利用重复频率为1 kHz,脉冲宽度为120 fs的近红外飞秒脉冲激光,用狭缝整形技术通过横向刻写的方式,在掺Er³⁺“无水”氟碲酸盐玻璃中分别刻写I类和压低圆包层波导。并且利用有限差分法^[23],根据波导的近场模式强度分布分别反推了I类和压低圆包层波导的折射率分布图,其最大的折射率增加量分别为 1×10^{-4} 和 1.9×10^{-4} 。采用散射法^[24-25]测试了I类光波导的传输损耗为1.04 dB/cm;通过测量插入损耗得到压低圆包层波导的传输损耗小于1.88 dB/cm。

2 实验装置

光刻波导的实验装置如图1所示,分别采用重复频率为1 kHz,输出激光中心波长为800 nm,脉冲宽度为120 fs的钛宝石锁模激光再生放大系统(Spitfire, Spectra Physics)以及重复频率为50 kHz,输出激光中心波长为775 nm,脉冲宽度为120 fs的钛宝石锁模激光再生放大系统(Phidia, Uptek Solutions)产生的超短脉冲激光作为光刻光源。通过1/2波片和偏振片来调节用于光刻的激光功率。用计算机控制的快门(Shutter)控制激光脉冲在样品内的曝光时间。实验所用的样品为掺Er³⁺“无水”氟碲酸盐玻璃[该玻璃由中国科学院西安光学精密机械研究所自主生产^[20-22],60TeO₂-30ZnF₂-10NaF(TZNF60,其中TeO₂,ZnF₂,NaF的摩尔分数分别为60%,30%,10%)+Er₂O₃(Er₂O₃的质量分数为0.75%),10 mm×20 mm×2 mm],在1550 nm波长处其折射率约为1.86。将其固定在计算机控制的XYZ三维(3D)精密位移控制平台(Physik Instrumente)上。使用20倍的显微镜(Mitutoyo,工作距离为20 mm,数值孔径NA为0.42)将飞秒脉冲激光聚焦到玻璃内部。实验中分别采用横向狭缝整形以及纵向刻写的方式尝试波导刻写。狭缝整形技术操作简单,通过变换狭缝的宽度来改变激光焦区的光场分布,最终使得单次刻写的波导端面为近圆形分布。当狭缝宽度为500 μm时,波导端面两个正交方向上的尺寸差别最小,波导导光模式最好。横向刻写,即激光传播方向与样品移动方向垂直(刻写激光沿x轴

的正方向传播,而样品沿 z 轴的正方向移动);纵向刻写,即激光传播方向与样品移动方向平行(刻写激光沿 x 轴的正方向传播,样品沿 x 轴的正方向移动)。利用Olympus BX51正相位对比显微镜(PCM)实时从侧面对飞秒激光辐射区域进行成像,用CCD相机拍摄得到其PCM图片,图中黑色代表正的折射率改变,白色代表负的折射率改变或者散射中心。将非相干的LED白光和976 nm的半导体激光作为耦合光源来测试波导的近场模式强度分布,用非球面镜(焦距 $f=15.29$ mm)将976 nm激光耦合到波导的一端,另一端用一个10倍显微镜将波导输出端成像到电荷耦合器件(CCD)上,得到波导的近场模式图。

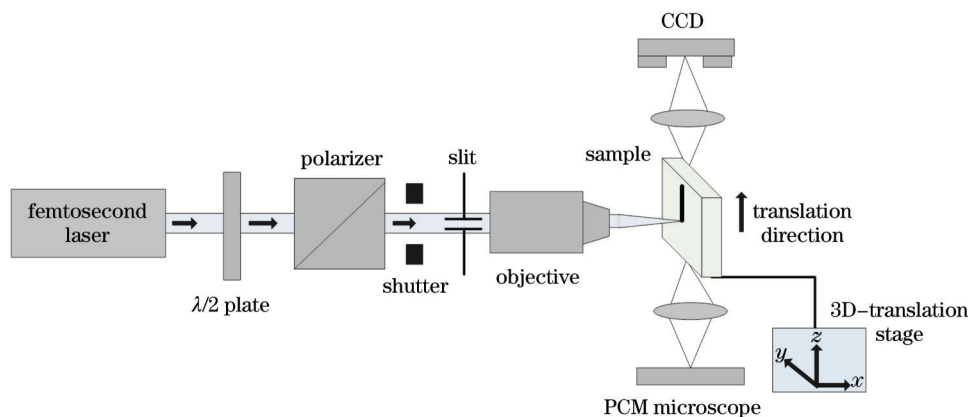


图1 飞秒激光光刻波导实验装置图

Fig.1 Experimental setup for femtosecond laser waveguide writing

3 实验结果及分析

对于重复频率为50 kHz的飞秒脉冲激光,利用纵向刻写方式,只能写出较短长度(小于1 mm)的波导;横向刻写时,无法用狭缝将飞秒激光光束成功整形,因此利用重复频率为50 kHz的飞秒脉冲激光在掺 Er^{3+} “无水”氟磷酸盐玻璃中无法实现波导刻写。对于重复频率为1 kHz的飞秒脉冲激光,利用纵向刻写方式,同样也只能写出较短长度的波导;而利用狭缝整形技术通过横向刻写方式,可以写出较长长度的波导。因此,用狭缝整形技术通过横向刻写方式尝试在掺 Er^{3+} “无水”氟磷酸盐玻璃中刻写波导。实验发现样品的激光刻写阈值约为 $1 \mu\text{J}$ 。当聚焦到玻璃内部的激光脉冲能量低于 $7 \mu\text{J}$ 时,在一定的波导刻写速度范围内,可在掺 Er^{3+} “无水”氟磷酸盐玻璃中写入I类波导;当聚焦到玻璃内部的激光脉冲能量高于 $7 \mu\text{J}$ 时,在一定的波导刻写速度范围内,可在掺 Er^{3+} “无水”氟磷酸盐玻璃中写入压低圆包层波导。二者各有优缺点:I类波导,其制作方法简单,较易得到单模导光模式的波导,且波导传输损耗较小,但其模场直径难于控制以达到实际需求;压低圆包层波导,波导导光区域为非激光曝光区域,使得波导很好地保留了材料基质的性质,其折射率改变量较易控制,且可通过变换波导刻写参数以及压低包层的形状的方式来调整波导的模式以满足实验需求,但其制作过程需要多次扫描,复杂且耗时,波导的传输损耗也较大。

3.1 飞秒脉冲激光写入I类波导

将重复频率为50 kHz的飞秒脉冲激光聚焦到玻璃样品中,变换不同的激光写入参数以及波导刻写方式,发现在掺 Er^{3+} “无水”氟磷酸盐玻璃中始终无法实现I类波导刻写。图2是利用重复频率为50 kHz的飞秒脉冲激光在玻璃中静态打点($1 \mu\text{J}$ 激光脉冲能量)以及纵向扫描损伤线($1 \mu\text{J}$ 激光脉冲能量,100 $\mu\text{m}/\text{s}$ 刻写速度)的PCM图。图2中显示的激光刻写损伤线为白色,这说明在激光损伤线上折射率低于玻璃基质的折射率,无法实现I类波导刻写。

对于重复频率为1 kHz的飞秒脉冲激光,当聚焦到玻璃样品中的激光脉冲能量低于 $7 \mu\text{J}$ 时,在5~100 $\mu\text{m}/\text{s}$ 的波导刻写速度范围内,在激光损伤痕迹上可得到正的折射率改变量,该情况下适合写入I类波导,波导导光区域位于激光刻写轨迹上。图3(a)为波导侧面PCM图,图中显示激光刻写轨迹为黑色,这说明激光损伤痕迹上的折射率高于玻璃基质的折射率;图3(b)为利用白光耦合时所得到的波导端面图;图3(c)为该波导的近场模式分布图,该模式分布均匀,呈近高斯分布,模场直径约为33.3 μm 。图3中的波导为经过实验研究所得到的—

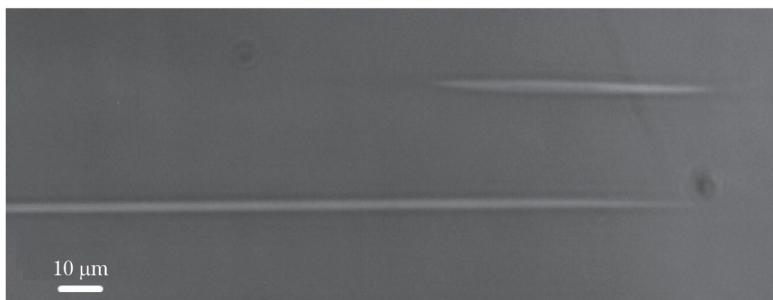


图2 利用重复频率为 50 kHz 的飞秒脉冲激光静态打点以及纵向扫描损伤线的 PCM 图

Fig.2 PCM image of static and longitudinally scanned conditions by femtosecond laser with 50 kHz repetition rate

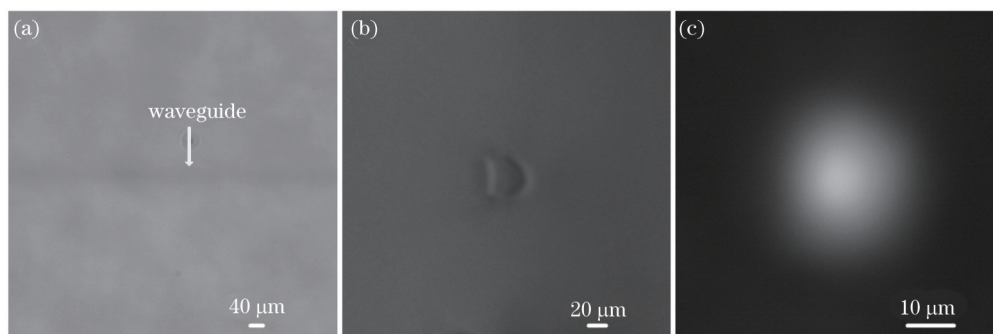


图3 导光模式较优的 I 类波导 (a) 侧面 PCM 图、(b) 端面图以及 (c) 相应的近场模式分布图

Fig.3 (a) Profile PCM, (b) cross-section and (c) corresponding near field mode images of Type I waveguide with better guiding mode

组导光模式较优的波导,其写入激光脉冲能量为 5 μJ,激光刻写速度为 10 μm/s。这里需要提到的一点是加工波导所用的聚焦物镜具有消球差的功能,而实验显示激光刻写深度为 175 μm 时,激光刻写痕迹均匀性较好,此刻写量度刚好为显微镜的消球差距离,此时飞秒激光聚焦的光斑球差最小,聚焦到玻璃中的能量更为集中,所刻波导的导光模式较好,故实验中刻写波导时飞秒激光实际写入玻璃内的深度均为 175 μm。并且实验中为了避免玻璃表面杂质以及刻透玻璃时其表面损伤对波导导光情况的影响,光刻时没有刻透玻璃的表面,波导的一端距离玻璃表面 100 μm,波导长度均为 5 mm。

为了从折射率改变量定量地分析波导性能,利用有限差分法^[23],根据波导的近场模式强度分布反推了其折射率分布图。该方法中波导的折射率改变量可以表示为

$$\Delta n(x,y) = \sqrt{n_s^2 - \frac{1}{k^2 E(x,y)} \nabla_t^2 E(x,y)} - n_s, \quad (1)$$

式中 n_s 为掺 Er^{3+} “无水”氟磷酸盐玻璃的折射率, k 为真空中的波数, E 为归一化的波导电场强度, ∇_t^2 是作用在 x 和 y 两个分量上的拉普拉斯算符。由(1)式可以看出,波导的折射率改变量与波导引导模的场分布之间存在着直接的关系。图4为利用上述有限差分法,通过导光模式较优波导(5 μJ 激光脉冲能量, 10 μm/s 刻写速度)的近场模式强度分布反推得到的波导区域折射率分布(RID)图。从图4中可以看出波导中心区域折射率改变量最大,而边缘处折射率改变量逐渐减小。这是由于聚焦到玻璃内部的激光脉冲能量呈高斯分布,中心区域能量的峰值功率最高,单位时间聚焦到玻璃内的能量最多,由此诱导的折射率改变量最大,最大的折射率增加量为 1×10^{-4} 。

传输损耗是判定波导性能优劣的另一重要指标。注入波导的光能量会随着波导传输距离的增大而减小,故可以用波导的传输损耗来衡量光能量在波导中的衰减程度。波导的传输损耗包括散射损耗、吸收损耗以及模式转换损耗等,而对于飞秒激光刻写的波导来说,其散射损耗基本上占了总损耗的百分之九十^[26]。引起波导传输损耗的原因主要有两个方面:1)玻璃样品本身的不均匀性,可以通过选择光学质量较高的玻璃基质来避免这一点;2)飞秒激光刻写波导过程中引入了材料缺陷,可以通过变化飞秒激光写入波导的参数来减小波导的散射损耗。飞秒激光刻写的波导,其散射损耗一般在零点几个 dB/cm 到几个 dB/cm 之间。利用散射损耗法^[24-25]来测量 I 类波导的传输损耗,该方法中波导的损耗系数 α (单位为 cm^{-1}) 与波导的传输损耗

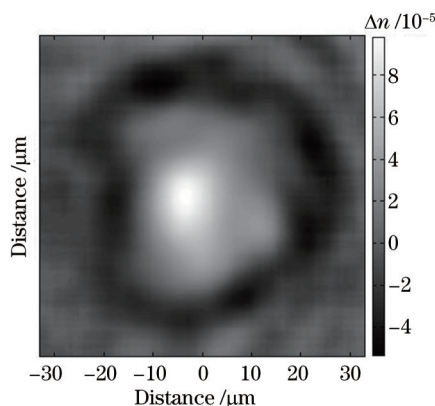


图4 激光脉冲能量为 5 μJ,写入深度为 175 μm,刻写速度为 10 μm/s,狭缝宽度为 500 μm 的 I 类波导区域折射率分布图
Fig.4 Calculated RID of Type I waveguide. The writing laser pulse energy is 5 μJ, inscribing depth is 175 μm, writing speed is 10 μm/s and the width of the slit is 500 μm

α' (单位为 dB/cm)之间存在着如下的关系:

$$\alpha' = \frac{10}{\ln 10} \alpha \approx 4.343\alpha. \quad (2)$$

搭建了一套波导散射损耗测试系统,将 976 nm 的半导体激光经过准直透镜($f=7.5$ mm)进行准直后,用非球面镜($f=15.29$ mm)将 976 nm 激光耦合到波导的一端,用一个 10 倍显微物镜将波导输出端成像到 CCD 上用来观察波导的耦合情况,同时用一个 4 倍显微物镜将波导侧面散射线成像到另一 CCD 上,得到波导的散射光图片,最后将散射光图片上的数据进行线性拟合。由图 5 可以得到波导的损耗系数 $\alpha=0.24$ cm⁻¹,故波导的传输损耗 $\alpha'=1.04$ dB/cm。

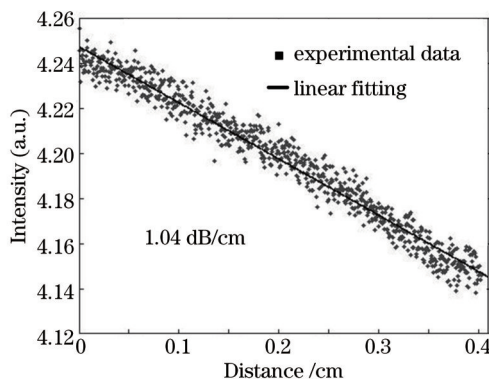


图5 利用散射法测得 I 类波导的传输损耗

Fig.5 Measured propagation loss of Type I waveguide by using the scattering technique

3.2 飞秒脉冲激光写入压低圆包层波导

对于重复频率为 50 kHz 的飞秒脉冲激光,在玻璃样品中也无法实现压低包层波导的刻写。而对于重复频率为 1 kHz 的飞秒脉冲激光,当聚焦到玻璃样品中的激光脉冲能量高于 7 μJ 时,在 100~200 μm/s 的波导刻写速度范围内,激光损伤痕迹上可得到负的折射率改变量,故可以通过多次扫描来刻写压低圆包层波导。图 6(a)为实验得到的导光模式较优的压低圆包层波导(10 μJ 激光脉冲能量,200 μm/s 刻写速度,175 μm 实际写入玻璃深度,圆包层由 10 根相互平行的刻线组成,分布在半径为 15 μm 的圆柱面上)的端面 PCM 图,可以看到,激光曝光区域所诱导的损伤痕迹显示为白色,表明损伤痕迹上的折射率低于玻璃基质的折射率,支持该结构导光,波导导光区域为由包层围起的圆形区域。图 6(b)为该波导对应的近场模式分布图,该模式分布均匀,模场直径约为 23.0 μm。利用有限差分法,由波导的近场模式分布图反推了该压低圆包层波导的折射率分布图,如图 7 所示,得到该波导最大的折射率增加量为 1.9×10^{-4} ,压低圆包层处最大的折射率减小量为 1.7×10^{-4} 。

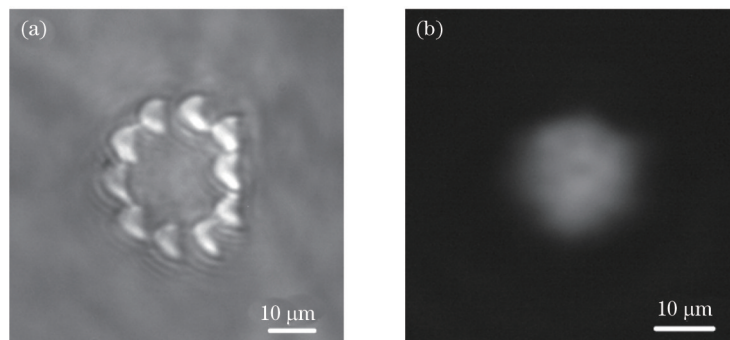


图6 导光模式较优的压低圆包层波导端面PCM图和对应的波导近场模式分布图

Fig.6 Cross-section PCM image of depressed circular cladding waveguide with better guiding mode and its near field mode image

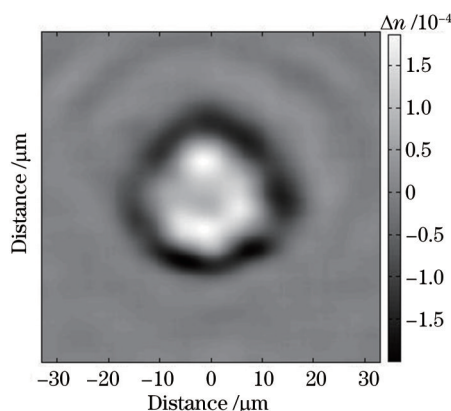


图7 激光脉冲能量为10 μJ,写入深度为175 μm,刻写速度为200 μm/s,圆包层半径为15 μm的压低圆包层波导折射率分布图

Fig.7 Calculated RID of depressed circular cladding waveguide. The writing laser pulse energy is 10 μJ, inscribing depth is 175 μm,

writing speed is 200 μm/s, circular cladding radius is 15 μm

实验中通过测量插入损耗得到压低圆包层波导(10 μJ激光脉冲能量,175 μm写入深度,200 μm/s刻写速度,15 μm圆包层半径)的传输损耗。将60 mW的532 nm绿光经 $f=7.5$ mm的准直镜准直后,通过 $f=15.29$ mm的非球面镜将激光耦合入波导的一端,在波导的另一端用功率计测得从波导输出的功率为40 mW,通过计算得到波导的插入损耗(插入损耗为传输损耗、菲涅耳反射损耗、耦合损耗之和)约为1.76 dB,去掉波导两端各约为9%(0.41 dB)的菲涅耳反射损耗,则波导耦合损耗与传输损耗的和约为0.94 dB,由于波导的耦合损耗必然存在,故可知波导的传输损耗小于0.94 dB,即波导单位长度传输损耗小于1.88 dB/cm。

4 结 论

利用重复频率为1 kHz,中心波长为800 nm,脉冲宽度为120 fs的超短脉冲激光在掺 Er^{3+} “无水”氟碲酸盐玻璃中利用狭缝整形技术通过横向刻写方式成功实现了I类和压低圆包层波导的刻写。经过对波导刻写参数进行系统的研究,得到了两组导光模式较优的波导。两组波导的最大折射率增量分别为 1×10^{-4} 和 1.9×10^{-4} 。I类波导的传输损耗为1.04 dB/cm,压低圆包层波导的传输损耗小于1.88 dB/cm。

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 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.
- 4 Long Xuewen, Bai Jing, Liu Xin, *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.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 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.
- 8 Li Gui, Baoxi Xu, T C Chong. Microstructure in lithium niobate by use of focused femtosecond laser pulses [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, 16(5): 1337–1339.
- 9 Wang Jixiang, Ran Lingling, Kong Degui, *et al.*. Microstructures on the surface of Si induced by femtosecond laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(s1): s114002.
王积翔, 冉玲玲, 孔德贵, 等. 飞秒激光在硅表面诱导微结构[J]. *光学学报*, 2014, 34(s1): s114002.
- 10 S M Eaton, C A Merchant, R Lyer, *et al.*. Raman gain from waveguides inscribed in $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ by high repetition rate femtosecond laser [J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 92(8): 081105.
- 11 C Grivas, C Corbari, G Brambilla, *et al.*. Tunable, continuous–wave Ti:sapphire channel waveguide lasers written by femtosecond and picosecond laser pulses [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(22): 4630–4632.
- 12 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.
- 13 Bai Jing, Long Xuewen, Liu Xin, *et al.*. Femtosecond laser written waveguide in Yb^{3+} : phosphate glass and waveguide lasing [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.
- 14 A M Streltsov, N F Borrelli. Study of femtosecond–laser–written waveguides in glasses [J]. *J Opt Soc Am B*, 2002, 19(10): 2496–2504.
- 15 Y Tokuda, M Saito, M Takahashi, *et al.*. Waveguide formation in niobium tellurite glasses by pico– and femtosecond laser pulses [J]. *J Non–Crystal Solids*, 2003, 326: 472–475.
- 16 G C Righini, I Banyasz, S Barneschi, *et al.*. Laser irradiation, ion implantation and e–beam writing of integrated optical structures [C]. *SPIE*, 2005, 5840: 649–657.
- 17 P Nandi, G Jose, C Jayakrishnan, *et al.*. Femtosecond laser written channel waveguides in tellurite glass [J]. *Opt Express*, 2006, 14(25): 12145–12150.
- 18 T T Fernandez, G D Valle, R Osellame, *et al.*. Active waveguides written by femtosecond laser irradiation in an erbium–doped phospho–tellurite glass [J]. *Opt Express*, 2008, 16(19): 15198–15205.
- 19 T T Fernandez, S M Eaton, G Della Valle, *et al.*. Femtosecond laser written optical waveguide amplifier in phospho–tellurite glass [J]. *Opt Express*, 2010, 18(19): 20289–20297.
- 20 A Lin, A Rysanyanskiy, J Toulouse. Fabrication and characterization of a water–free mid–infrared fluorotellurite glass [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(5): 740–742.
- 21 H Zhan, Z Zhou, J He, *et al.*. Intense 2.7 μm emission of Er^{3+} –doped water–free fluorotellurite glass [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(16): 3408–3410.
- 22 H Zhan, A Zhang, J He, *et al.*. Enhanced 2.7 μm emission of Er/Pr–codoped water–free fluorotellurite glasses [J]. *J Alloys Compd*, 2013, 582: 742–746.
- 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 K Moutzouris, S V Rao, M Ebrahimzadeh, *et al.*. Measurements of optical loss in $\text{GaAs}/\text{Al}_2\text{O}_3$ nonlinear waveguides in the infrared using femtosecond scattering technique [J]. *Opt Commun*, 2002, 213: 223–228.
- 25 Y Okamura, S Yoshinaka, S Yamamoto. Measuring mode propagation losses of integrated optical waveguides: A simple method [J]. *Appl Opt*, 1983, 22(23): 3892–3894.
- 26 L Tong, R R Gattass, I Maxwell, *et al.*. Optical loss measurements in femtosecond laser written waveguides in glass [J]. *Opt Commun*, 2006, 259(2): 1–5.