

飞秒激光在磁旋光玻璃中写入光波导的研究

侯方^{1,2} 李玮楠² 白晶² 周凯明² 龙学文² 惠荣庆² 张孝林¹ 程光华^{2*}

¹ 西安交通大学理学院, 陕西 西安 710049

² 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

摘要 飞秒激光诱导折射率变化提供了一种灵活的三维光子器件制作方法。具有法拉第效应的磁旋光玻璃在集成光学中有广泛的应用前景。研究了1 kHz重复频率的飞秒激光在磁旋光玻璃中刻写光波导的特征,测试了不同刻写参数下波导的导光模式,研究了写入速度和写入功率对波导折射率、模场直径的影响,给出了波导形成的写入窗口范围。实验结果表明,在采用10×显微物镜,写入速度40 μm/s,写入功率3 mW时,获得了980 nm激光处模场直径为10 μm,损耗为1.53 dB/cm的波导,有利于实现波导和单模光纤之间的模式耦合,且波导区域费尔德系数只有轻微减小(约2.8%)。

关键词 激光技术;飞秒激光;光波导;磁旋光玻璃;费尔德系数

中图分类号 TN249; TN25

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201333.0314002

Femtosecond-Laser-Written Waveguide in Magneto-Optical Glass

Hou Fang^{1,2} Li Weinan² Bai Jing² Zhou Kaiming² Long Xuewen²

Hui Rongqing² Zhang Xiaolin¹ Cheng Guanghua²

¹ School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

² 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

Abstract Femtosecond-laser-induced refractive index modification has provided a flexible tool to fabricate three-dimensional photonic devices. Magneto-optical (MO) glass is widely used in integrated optics because of its Faraday rotation. Femtosecond laser at 1 kHz repetition rate is used to write waveguides in MO glass, then near-field modes of waveguides written by different focusing parameters are measured, and the refractive index changes in the written regions and mode field diameters as functions of writing parameters (scanning speed and writing power) are obtained, which show a writing window of waveguide formation in MO glass. Experimental results show that the Verdet constant in the written region only has a slight reduction (about 2.8%) under a special writing parameter set (10×, objective scanning speed 40 μm/s, laser power 3 mW); the loss of the waveguide is 1.53 dB/cm, and its mode field diameter is 10 μm injected by 980 nm, so it is practicable to couple light from fiber into waveguide written by femtosecond laser.

Key words laser technique; femtosecond laser; optical waveguide; magneto-optical glass; Verdet constant

OCIS codes 320.7090; 230.2240; 140.3390

1 引言

飞秒激光是一种峰值功率极高的超短脉冲激

光,在光存储^[1]、光通信^[2]和精密加工等领域有巨大的应用价值。近年来,利用飞秒激光加工^[3~5]透明

收稿日期: 2012-10-09; **收到修改稿日期:** 2012-11-07

基金项目: 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)和中国科学院西部之光人才培养计划(0729591213)资助课题。

作者简介: 侯方(1986—),男,硕士研究生,主要从事飞秒激光写入波导方面的研究。

E-mail: houfang135@stu.xjtu.edu.cn

导师简介: 张孝林(1963—),男,硕士,教授,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: zxl@mail.xjtu.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: gcheng@opt.ac.cn

介质材料引起了人们极大的兴趣。当飞秒激光被聚焦到透明介质内,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、雪崩电离等效应,这种局部的能量沉积可以在介质材料内部产生结构和折射率的永久改变。利用这种机制,可以制作复杂的三维光子结构,比如波导^[6~8]、光栅^[9]、波导耦合器^[10,11]、分束器^[6]、波导偏振器^[12]和波导激光器^[13,14]等。总之,飞秒激光直写光子结构为实现高密度集成光子芯片提供了一种有效手段。

磁旋光玻璃也叫法拉第(Faraday)旋光玻璃,是一种新兴的功能材料,由于其自身的 Faraday 效应,在磁光隔离器^[15]、环形器^[16]、磁光调制器、激光开关、延迟器、磁光信息处理系统、强磁场和高压传输线上的电流测量传感器等磁光器件中已被广泛应用。除此之外,由于其在可见光及近红外波段的透射率较高,磁旋光玻璃也被大量应用于大功率激光输出控制中。因此,在磁旋光介质上制作三维光子结构也成为了光子器件制造的一个热点,在集成光学领域有着重要的应用前景。2007年,Shih等^[17]利用800 nm,25 MHz,60 fs的超短脉冲激光在单脉冲能量为10 nJ,写入速度为10 mm/s的条件下在磁旋光玻璃内部写入了波导结构,波导直径为8 μm ,在632 nm波段导光为多模,在1550 nm波段导光为单模。2011年Liu等^[18]用1 kHz的钛宝石再生放大激光,通过狭缝整形在磁旋光玻璃中横向写入了光波导,通过重复写入方式他们得到直径为3~5 μm 的光波导。

本文利用低重复频率飞秒激光在磁旋光玻璃(中国科学院西安光学精密机械研究所自行研制)中刻写波导,详细研究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,控制写入参数可以实现波导和光纤的模式匹配;测试得到波导写入前后的费尔德系数 V 只有微小的变化,有利于充分利用 Faraday 效应在磁旋光玻璃中制作集成光子器件。实验结果显示3种不同数值孔径的显微物镜聚焦刻写都得到了较宽的写入窗口范围。

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150 fs。用电快门控制激光脉冲在样品上的曝光时间。通过半波片和偏振片调节脉冲能量。将六面抛

光的磁旋光玻璃样品(尺寸3 mm \times 10 mm \times 16 mm)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。实验中分别采用了5 \times (工作距离为34 mm,数值孔径 $NA=0.14$)、10 \times (工作距离为33.5 mm, $NA=0.28$)以及20 \times (工作距离为20 mm, $NA=0.42$)的显微物镜(Mitutoyo)聚焦激光光束。实验中采用纵向写入方式,即样品平移方向平行于激光传播方向(沿 Z 轴)。在Olympus BX51正相位对比显微镜(PCM)下观察写入波导的侧面,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LED白光和980 nm的激光作为光源,通过显微物镜(5 \times)耦合入波导一端,再通过显微物镜(10 \times)将波导输出端的近场强度成像到电荷耦合器件(CCD)上,得到波导的近场光强分布。实验所用磁旋光玻璃为 $\text{Tb}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ 系列,其费尔德系数在632.8 nm处约为 $-75 \text{ rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$,在1064 nm波长处约为 $-21.8 \text{ rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$,折射率 $n_0=1.688$ 。

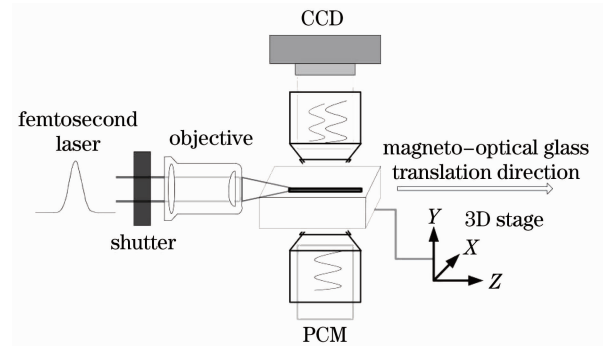


图1 飞秒激光光刻波导实验装置图。图中箭头为样品移动方向

Fig.1 Experimental setup for femtosecond laser waveguide writing. The arrow marks the motion direction of the sample

3 实验结果及分析

3.1 波导写入参数及测试

使用10 \times 的显微物镜在磁旋光玻璃中纵向写入光波导。分别用固定为3 mW和在5~640 $\mu\text{m}/\text{s}$ 间变化的写入速度以及固定为40 $\mu\text{m}/\text{s}$ 的写入速度和在1~8 mW范围内变化的激光功率写入了光波导。图2给出了不同参数下写入光波导的PCM图。图2(a)是写入功率为3 mW时,不同写入速度下波导的PCM图;图2(b)给出了写入速度为40 $\mu\text{m}/\text{s}$ 时,

不同写入功率下波导的 PCM 图。可以看出波导在磁旋光玻璃中有很宽的写入窗口。当激光功率在

2~4 mW, 写入速度为 10~40 $\mu\text{m/s}$ 时, 写入的波导特性良好。

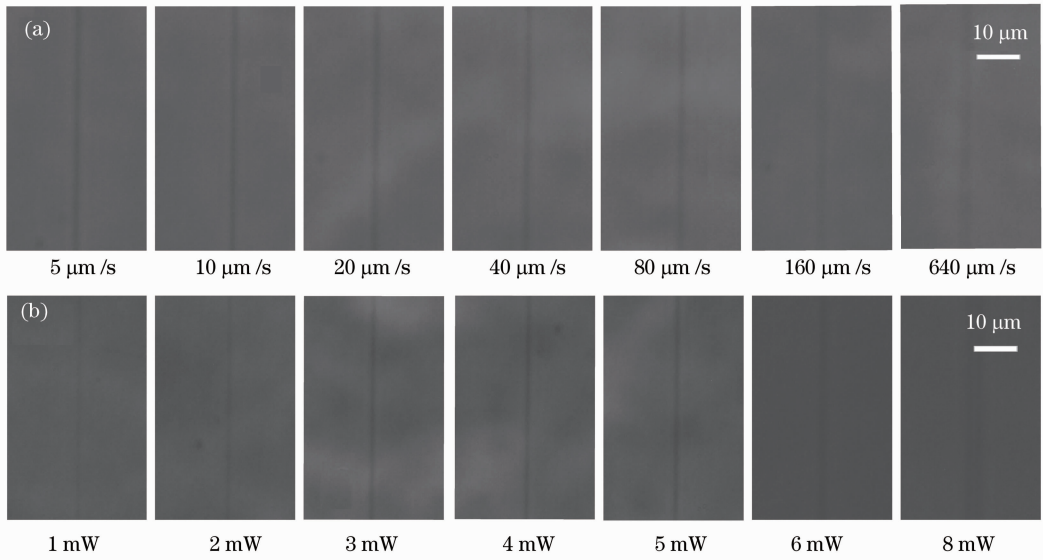


图 2 不同写入参数下波导的 PCM 图。(a)写入功率为 3 mW, 不同写入速度;
(b)写入速度为 40 $\mu\text{m/s}$, 不同写入功率

Fig. 2 PCM images of waveguides with different writing parameters. (a) Different scanning speeds at 3 mW writing power; (b) different writing powers at 40 $\mu\text{m/s}$ scanning speed

图 3 给出了由水平偏振(平行于 X 轴)的激光脉冲写入的波导的侧视 PCM 图、白光近场模式图和 980 nm 激光近场模式图以及对应的折射率分布图, 其中写入功率为 3 mW, 写入速度为 40 $\mu\text{m/s}$, 波导长度为 3 mm, 折射率分布图是通过有限差分的方法^[19]由图 3(c)反推得到的。可以看出波导导光性能良好, 激光模场大小约为 10 μm ; 波导中心区域

的折射率变化最大, 原因是激光光束呈高斯分布, 中心区域的峰值功率最大, 单位时间积累的能量最多, 诱导的折射率变化更大, 最大的折射率变化 $\Delta n = 4.5 \times 10^{-4}$ 。参照图 3 中波导的写入参数, 在磁旋光玻璃中写入了多根光波导, 通过截断法测得波导的平均损耗为 1.53 dB/cm。

图 4(a)中给出了当写入激光功率为 2 mW 时,

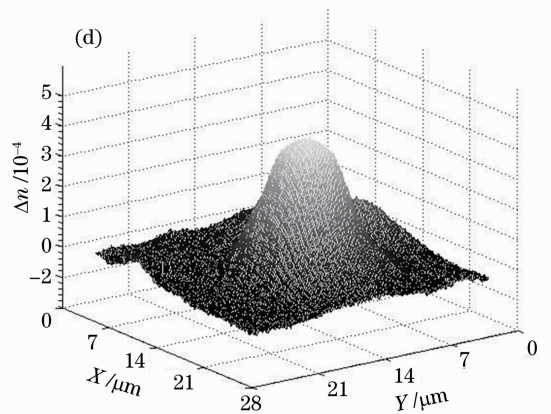
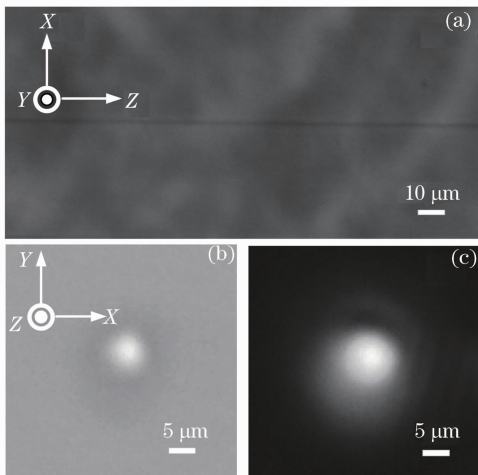


图 3 10× 聚焦物镜, 写入功率为 3 mW, 写入速度为 40 $\mu\text{m/s}$ 时波导的 (a) 侧视 PCM 图、(b) 白光和 (c) 980 nm 激光的近场模式图以及 (d) 对应的折射率分布图

Fig. 3 (a) PCM image, near-field modes injected by (b) white light and (c) 980 nm laser radiation, and (d) calculated relative refractive index distribution of the waveguide written with 10× objective, 3 mW writing laser power and 40 $\mu\text{m/s}$ scanning speed

折射率改变随写入速度的变化关系。可以看出随着写入速度的增大,折射率改变减小,这是由于写入速度越大,单位长度所获得的脉冲能量就越少,导致波导折射率改变越小。当写入速度在 $320\sim 640\ \mu\text{m/s}$ 之间时,折射率改变较小(小于 1.0×10^{-4}),对写入速度不敏感,曲线趋于一条平行于横坐标轴的直线。图 4(b)中给出了写入速度为 $30\ \mu\text{m/s}$ 时折射率改变随写入功率的变化关系,当写入功率小于 $5\ \text{mW}$ 时,折射率改变随着写入功率的增大而增加,这是因

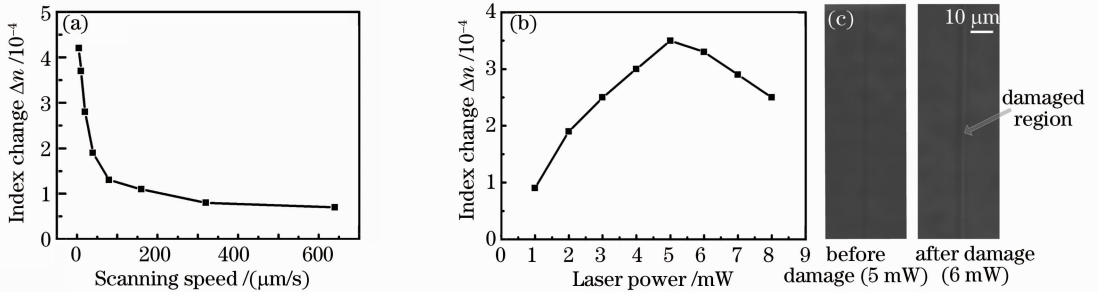


图 4 (a)折射率改变随写入速度和(b)写入功率的变化关系图以及(c)损伤前后波导的 PCM 图

Fig. 4 Refractive index change as a function of (a) scanning speed and (b) writing laser power, and (c) PCM images of waveguides before and after damage

选用 $5\times$ 的显微物镜,固定写入速度为 $40\ \mu\text{m/s}$,在 $1\sim 12\ \text{mW}$ 的激光功率,沿 X 方向写入了光波导;固定激光功率为 $5\ \text{mW}$,在 $5\sim 640\ \mu\text{m/s}$ 的写入速度下写入了光波导。实验表明当激光功率在 $2\sim 5\ \text{mW}$,写入速度为 $10\sim 30\ \mu\text{m/s}$ 时,写入的波导特性良好。使用 $20\times$ 的聚焦物镜,固定写入速度为 $40\ \mu\text{m/s}$,在 $1\sim 6\ \text{mW}$ 的激光功率下写入了光波导;固定激光功率为 $3\ \text{mW}$,在 $5\sim 640\ \mu\text{m/s}$ 的写入速度下,也写入了光波导,发现当激光功率在 $2\sim 4\ \text{mW}$,写入速度为 $10\sim 40\ \mu\text{m/s}$ 时写入的波导特性良好。从上面的实验结果可以得出,用 $5\times$ 和 $20\times$ 的显微物镜在磁旋光玻璃中写入光波导同样有很宽的窗口范围。

表 1 中给出了模场直径和写入参数的对应关系,耦合激光波长为 $980\ \text{nm}$,"—"表示写入区域已损坏,没有模场。 $5\times$ 物镜写入波导模场大小为 $10\sim 18\ \mu\text{m}$, $10\times$ 物镜写入波导模场大小为 $7\sim 13\ \mu\text{m}$, $20\times$ 物镜写入波导模场大小为 $4\sim 9\ \mu\text{m}$,可以看出随着显微物镜倍数的增大,由于聚焦光斑直径减小,导致在磁旋光玻璃中写入的波导直径越来越小,模场直径越来越小,此外在同样写入功率下,显微物镜倍数越大,焦斑的能流密度更大,折射率改变更大,束缚激光的能力更强。表 1 还显示,在固定写入功率为 $3\ \text{mW}$ 时,模场直径随着写入速度的增大而增

为写入功率越大,介质在单位时间内所吸收的脉冲能量越多,致使折射率改变增大,但当激光功率大于 $5\ \text{mW}$ 时,折射率改变不再增加,反而开始减小,对应在实验中观察到的现象是模场光斑直径增大,其原因是当功率较大时,写入区域已开始损伤,波导折射率改变减小,波导束缚光的能力减弱。图 4(c)中给出了损伤前后波导的 PCM 比较图片,显示当功率为 $6\ \text{mW}$ 时,写入的波导周围已开始出现了损坏,箭头所示白色痕迹为损伤区域。

大,这是因为随着写入速度的增加折射率改变会减小,束缚光的能力减弱。在比较慢的写入速度下,单位长度上会有更多的脉冲重叠,所以引起折射率的改变更大;另一方面,慢的扫描速度会导致折射率改变的区域增大,这会导致相反的结果,即模场直径增大。但实验结果表明前者对模场直径影响可能较后者更大。在固定写入速度为 $30\ \mu\text{m/s}$ 时,使用 $10\times$ 和 $20\times$ 显微物镜写入,模场直径随着写入功率的增大也有增大的趋势,原因可能是写入功率的增加引起了折射率改变区域的增大,即波导直径增大,虽然随着写入功率的增大折射率改变有所增加,但是没有波导直径增加对模场直径的影响大。

由以上分析可知,可以使用不同倍数的显微物镜聚焦激光光束,控制写入功率和写入速度从而改变磁旋光玻璃中波导模场的大小。常见单模光纤的芯径为 $8\sim 10\ \mu\text{m}$,虽然在不同的工作波长光纤模场直径有所不同,但模场直径都在 $10\ \mu\text{m}$ 附近。实验采用 $10\times$ 显微物镜,写入功率 $3\ \text{mW}$,写入速度 $40\ \mu\text{m/s}$ 时,获得了 $980\ \text{nm}$ 处激光模场直径为 $10\ \mu\text{m}$ 的光波导,非常容易实现与单模光纤的耦合。所以选择合适的显微物镜,控制写入参数,可以达到光纤和波导的模式匹配,这为将来制作光波导隔离器提供了技术支持。

表1 模场直径大小与写入参数的对应关系

Table 1 Mode field diameters corresponding to writing parameters

| | Writing laser power is 3 mW, different scanning speeds (in $\mu\text{m/s}$) | | | | | | Scanning speed is 30 $\mu\text{m/s}$, different writing laser powers (in mW) | | | | |
|--|--|------|------|------|------|------|---|------|------|------|------|
| | 5 | 10 | 20 | 40 | 80 | 160 | 1 | 2 | 4 | 6 | 8 |
| Mode field diameter (5 \times) / μm | 10.6 | 11.2 | 13.9 | 15.7 | 17.2 | 18.6 | 18.0 | 16.5 | 13.0 | 13.3 | 17.7 |
| Mode field diameter (10 \times) / μm | 7.1 | 7.9 | 8.7 | 10.0 | 11.1 | 12.9 | 8.3 | 7.7 | 8.1 | 10.2 | 12.9 |
| Mode field diameter (20 \times) / μm | 4.3 | 5.0 | 5.2 | 6.3 | 8.0 | 9.1 | 4.5 | 4.6 | 5.3 | 5.7 | — |

3.2 飞秒激光对费尔德系数的影响

磁旋光玻璃是高功率、大口径光束的激光系统中抗激光反馈必备的光学元件之一,其在较低的磁场强度下可获得较大的旋转角度,可用于制作磁光隔离器。角度偏转大小可以用公式表示为

$$\theta = \int V H_l dl,$$

式中 θ 为偏振光旋转角度, V 为费尔德系数, H_l 为轴向磁场强度, l 为光程。为了研究飞秒激光对磁旋光玻璃的旋光特性的影响,搭建了一套实验装置用于测量磁旋光玻璃的旋光特性,在未写入波导的条件下,测量了 Faraday 旋转角度的大小;写入波导之后,再次测量 Faraday 旋转角度的大小。实验中的写入功率为 3 mW,写入速度为 20 $\mu\text{m/s}$,写入长度为 1 cm。比较两次 Faraday 旋转角度的大小,可获得费尔德系数的变化情况。实验装置原理图如图 5 所示,其中旋转起偏器(RA)安装在一个旋转支架上,用来检测波导输出端的激光偏振方向。具体测量过程如下。

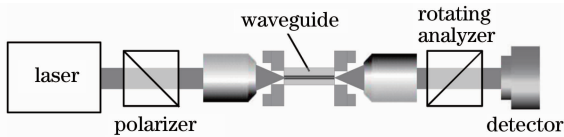


图5 旋光测试装置图

Fig. 5 Experimental setup for measuring Faraday rotation

将准直的 980 nm 激光经过起偏器起偏后,直接(不经过玻璃样品两端的显微透镜)经过磁旋光玻璃传输,沿激光传播方向加入磁场,轴向磁场强度约为 0.25 T,通过旋转 RA 来调节探测器接收到的信号,保持探测器的示数为 0,记录磁场加入前后 RA 的角度 θ_1 和 θ_2 ,得到 RA 的角度之差 $\theta_2 - \theta_1 = 3.6^\circ$,这说明激光经过加有磁场的磁旋光玻璃之后,它的偏振方向发生了 3.6° 的旋转。用 10 \times 的显微物镜将 980 nm 的激光耦合入波导左端,再由 10 \times 的显微物镜将波导右端的信号收集到探测器上,沿波导

方向加入同样强度的磁场,同样保持探测器的示数为 0,记录磁场加入前后 RA 的角度 θ_3 和 θ_4 ,得到 RA 的角度之差 $\theta_4 - \theta_3 = 3.5^\circ$,这说明激光经过加有磁场的波导之后,偏振方向发生了 3.5° 的旋转。可以看出在同样的条件下,激光偏振方向经过波导区域后的旋光角度略小于经过非波导区域的旋光角度。

从上面的实验结果可以得到,飞秒激光与磁旋光玻璃相互作用的过程对磁旋光玻璃的旋光性质影响很小,波导写入前后,费尔德系数只有很轻微的减小(约 2.8%)。Li 等^[20]也得出磁旋光玻璃在与飞秒激光作用得到单模波导后费尔德系数有所减小的结论,约减小 20%,其写入功率为 0.12 mW,写入速度为 100 $\mu\text{m/s}$ 。相比本实验的结果,20%的减小偏大,原因有两方面:1)写入参数不同,2)实验中用到的磁旋光玻璃的各组分所占比例不同。费尔德系数减小过大会影响磁旋光玻璃的旋光性能,本实验中既实现了飞秒激光在磁旋光玻璃中写入光波导,同时也不会过大地改变波导区域的旋光性能,这为今后制作集成旋光器件如光波导隔离器等提供了有力的保证。

4 结 论

利用低重复频率飞秒激光在磁旋光玻璃中刻写波导,详细研究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,测试了波导在 980 nm 处的激光导光模式。实验结果表明 3 种不同数值孔径的显微物镜聚焦刻写都得到了较宽的写入窗口范围。在采用 10 \times 显微物镜,写入功率 3 mW,写入速度 40 $\mu\text{m/s}$ 的写入条件下得到了损耗为 1.53 dB/cm,980 nm 处的激光模场直径为 10 μm 的波导,非常有利于实现波导和光纤间的模式匹配,且折射率改变区域的费尔德系数只有轻微下降(约 2.8%)。基于此未来能够制作光波导隔离器。

参 考 文 献

- 1 Zhong Minlin, Fan Peixun. Applications of laser nano-manufacturing technologies[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0601001
钟敏霖, 范培迅. 激光纳米制造技术的应用[J]. 中国激光, 2011, **38**(6): 0601001
- 2 Cao Lan, Yan Xiaona, Dai Ye *et al.*. Space-to-time conversion by femtosecond spectrum holography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 0609001
曹 澜, 阎晓娜, 戴 晔 等. 利用飞秒脉冲光谱全息实现空域信息向时域信息的转换[J]. 光学学报, 2012, **32**(6): 0609001
- 3 Wu Wenwei, Xu Jiaming, Chen Hongyan. Simulation of optical model base on micro-cones structure of "black silicon" [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603029
吴文威, 徐嘉明, 陈宏彦. "黑硅"表面特殊锥状尖峰结构的制备及其光学模型仿真[J]. 中国激光, 2011, **38**(6): 0603029
- 4 Zhang Weigang, Liu Zhuolin, Yin Limei. Femtosecond laser micro-machined V-shaped fiber micro-cavity and its interference spectrum characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0706007
张伟刚, 刘卓琳, 殷丽梅. 飞秒激光刻蚀 V 型光纤微腔及其干涉谱特性[J]. 光学学报, 2011, **31**(7): 0706007
- 5 Cheng Jie, Yang Minghong, Wang Min *et al.*. Mach-Zehnder interference hydrogen sensor based on femtosecond laser processing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(7): 0706001
成 洁, 杨明红, 王 闵 等. 基于飞秒激光加工的马赫-曾德尔干涉氢气传感器[J]. 光学学报, 2012, **32**(7): 0706001
- 6 D. Homoelle, S. Wielandy, A. L. Gaeta *et al.*. Infrared photosensitivity in silica glasses exposed to femtosecond laser pulses[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(18): 1311~1313
- 7 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): 1938~1940
- 8 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
- 9 G. D. Marshall, M. Ams, M. J. Withford. Direct laser written waveguide-Bragg gratings in bulk fused silica [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(18): 2690~2692
- 10 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): 42~44
- 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 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
- 13 S. Taccheo, V. G. Della, R. Osellame *et al.*. Er: Yb-doped waveguide laser fabricated by femtosecond laser pulses[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(22): 2626~2628
- 14 G. D. Valle, R. Osellame, G. Galzerano *et al.*. Passive mode locking by carbon nanotubes in a femtosecond laser written waveguide laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(23): 231115
- 15 Y. Shoji, T. Mizumoto, H. Yokoi *et al.*. Magneto-optical isolator with silicon waveguides fabricated by direct bonding[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(7): 071117
- 16 H. Dotsch, N. Bahlmann, O. Zhuromskyy *et al.*. Applications of magneto optical waveguides in integrated optics: review[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(1): 240~253
- 17 T. Shih, R. Gattass, C. Mendonca *et al.*. Faraday rotation in femtosecond laser micromachined waveguides[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(9): 5809~5814
- 18 Qiang Liu, M. Ams, P. Dekker *et al.*. Laser written waveguides in magneto-optical glass [C]. IQEC/CLEO Pacific Rim, 2011. 1995~1997
- 19 I. Mansour, F. Caccavale. An improved procedure to calculate the refractive index profile from the measured near-field intensity [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(3): 423~428
- 20 Yudong Li, Xiangyang Gao, Meiling Jiang *et al.*. Fabrication of magneto-optical microstructure by femtosecond laser pulses[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2012, **10**(10): 102201

栏目编辑: 王晓琰