

飞秒激光在铽镓石榴石中的光刻光波导

龙学文^{1,2} 白晶^{1,2} 刘欣^{1,2} 赵卫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 飞秒激光光刻是一种灵活的三维光子器件制作方法。由于铽镓石榴石具有法拉第效应, 具有广泛的应用, 利用中心波长为 800 nm, 重复频率为 1 kHz 的飞秒激光, 在磁致旋光晶体铽镓石榴石中刻写了双线型和压低圆包层两种光波导, 重构了激光诱导折射率改变的分布和测试了光波导的传输损耗。双线型波导具有偏振依赖的导光特性, 圆包层波导则不存在偏振依赖的导光特性。对于双线型波导, 横电 (TE) 模和横磁 (TM) 模相位完全失配, 在外加磁场下, 导模的偏振面不会发生旋转, 光刻的圆包层波导的导模的偏振面能够发生磁致旋转。铽镓石榴石中的双线型和圆包层波导可以作为波导偏振器和磁旋光器件, 在集成光学上有潜在的应用价值。

关键词 集成光学; 光波导; 飞秒激光光刻; 铽镓石榴石; 法拉第效应; 偏振依赖导光

中图分类号 TN249; TN25 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0432002

Inscription of Waveguides in Terbium Gallium Garnet Using Femtosecond Laser

Long Xuwen^{1,2} Bai Jing^{1,2} Liu Xin^{1,2} Zhao Wei¹ 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-photolithography is a flexible avenue to fabricate three-dimensional photonic devices in transparent materials. Terbium gallium garnet is widely used because of its Faraday rotation. Femtosecond laser operated at 1 kHz with a central wavelength of 800 nm is used to write double line waveguide and circular depressed-cladding waveguide in terbium gallium garnet. The distributions of refractive index change are reconstructed, and propagation losses of the waveguides are measured. Only the double line waveguide shows polarization dependent optical guiding. The magneto-optic response of the waveguides is determined. The rotation of plane of polarization cannot be occurred in double line waveguide under externally applied magnetic field ascribed to the phase mismatch of transvers electric (TE) mode and transverse magnetic (TM) mode. For the circular depressed-cladding waveguide, the plane of polarization is rotated under applied magnetic field. The inscribed double line and circular depressed-cladding waveguide in terbium gallium garnet are candidates for waveguide polarizer and magneto-optic device respectively, which are valuable for integrated optics.

Key words integrated optics; optical waveguide; femtosecond laser writing; terbium gallium garnet; Faraday effect; polarization dependent guiding

OCIS codes 140.3390; 230.7380; 230.2240

收稿日期: 2013-10-22; **收到修改稿日期**: 2013-11-27

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)、国家自然科学基金(61223007)、中国科学院西部之光(0729591213)

作者简介: 龙学文(1977—), 男, 博士研究生, 主要从事飞秒激光光刻光波导方面的研究。E-mail: longxuwen@126.com

导师简介: 程光华(1976—), 男, 博士, 研究员, 主要从事飞秒激光微加工方面的研究。E-mail: gcheng@opt.ac.cn
(通信联系人)

1 引言

自 1996 年 Davis 等^[1]首次报道了飞秒激光在透明材料内光刻光波导结构以来,利用飞秒激光在透明电介质内刻写微缩的三维光子器件引起了人们的极大兴趣^[2]。相对于离子注入、离子交换等传统波导制备技术,飞秒光刻技术具有工艺简单、制作快速、成本低、适用材料广泛等优点。当聚焦到透明介质内部的飞秒激光达到一定阈值后,在焦点附近的有限区域内会产生非线性多光子吸收,这种局部的可控的能量沉积可以在透明介质材料内部诱导折射率的永久改变。当透明材料按设计的方式相对于激光焦点运动,就可以在透明电介质内制作复杂的三维光子结构,比如波导^[3-5]、光栅^[6]、波导耦合器^[7-8]、波导偏振器^[9-11]和波导激光器^[12]等。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。飞秒激光在透明电介质中刻写波导一般有两类刻写方式:I 类刻写(激光焦点诱导的折射率改变量为正,当样品相对于焦点运动后,激光焦点在介质内部刻写出一条导光的轨迹,波导位于激光焦点诱导的轨迹内)和 II 类刻写(激光聚焦区域折射率改变量为负,聚焦区域周围折射率改变量为正,波导位于激光焦点诱导的轨迹边上)。I 类光刻技术通常用在非晶态材料(例如各种玻璃)上制备波导。II 类光刻技术通常用在晶体内制备波导。由于 II 类波导的光传输区域为非激光曝光区域,这类波导能更好地保留材料基质的性质。

铽镱石榴石(TGG)是一种磁致旋光晶体。由于法拉第效应,线偏振光通过加有磁场的铽镱石榴石其偏振面会发生旋转,适用波长 400~1100 nm(不包括 470~500 nm)。铽镱石榴石在性能上优于铽掺杂的玻璃。铽镱石榴石的费尔德系数大约是磁旋光玻璃的两倍,导热性比磁旋光玻璃好,热诱导的光束扰动比磁旋光玻璃小。铽镱石榴石是制作法拉第旋光器与隔离器的最佳磁光材料。近年来,国内外相继报道过在铽掺杂的磁旋光玻璃 TG20 内光刻 I 类波导^[13-16],刻写的波导具有法拉第旋光效应,在集成光学领域有着重要的应用前景。目前在磁致旋光晶体铽镱石榴石内光刻波导尚无报道。

本文利用重复频率为 1 kHz 的近红外飞秒激光在铽镱石榴石中刻写双线型和压低的圆包层波导,详细研究了这两种结构的波导的导光特性。实验显示铽镱石榴石上的双线型波导具有偏振依赖的导光特性,偏振方向平行于双线方向的光能够在波导内导通,偏振方向垂直于双线方向的光不能够导通。

由于横电(TE)模和横磁(TM)模相位完全失配,在外加磁场下,双线型波导导模的偏振面不会发生旋转,对于圆包层波导则不存在偏振依赖的导光特性。导模的偏振面在外场下能够发生磁致旋转。铽镱石榴石中的双线型和圆包层波导可以作为波导偏振器和旋光器件,在集成光学上有潜在的应用价值。

2 光刻波导实验介绍

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,重复频率为 1 kHz,最短标称脉冲宽度为 120 fs。通过半波片和格兰棱镜调节用于光刻的激光功率。用计算机控制的快门控制激光脉冲在样品内的曝光时间。实验所用的铽镱石榴石(晶体生长于福晶科技,CASTECH)属于立方晶系,其费尔德系数在 1064 nm 波长处约为 35 rad/(T·m),1064 nm 波长处折射率为 1.954。铽镱石榴石的莫氏硬度为 8,硬度较高,采用蓝宝石抛光液将长方体铽镱石榴石样品六面高光学等级抛光。抛光的样品(尺寸 4.0 mm×5.0 mm×13.0 mm)装在计算机控制的 XYZ 三维精密位移控制平台上。采用 20× 的显微物镜(数值孔径 NA=0.42)聚焦飞秒激光光束到样品表面下 200 μm 处。实验中采用横向方式光刻波导,即样品平移方向垂直于激光传播方向(刻写激光沿 z 轴负方向传播,样品沿 x 轴移动)。刻写了双线型和压低的圆包层两种波导。波导刻写后,把垂直于波导的样品端面再抛光,使波导的两个端面露出样品表面。抛光后双线型和圆包层波导的长度都为 12.6 mm。

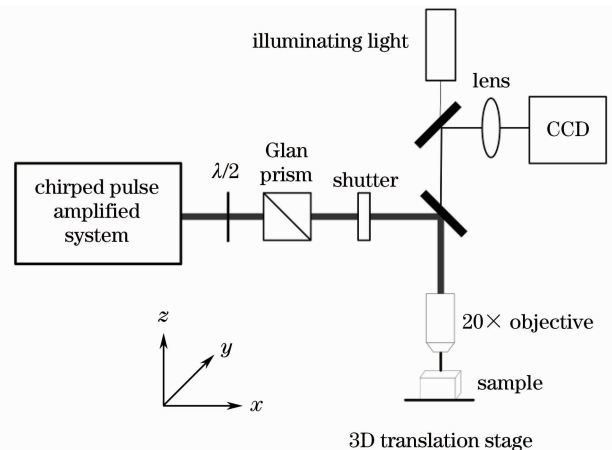


图 1 飞秒激光光刻波导实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for femtosecond laser waveguide writing

图2为双线型波导和圆包层波导的光学透射显微图片。图2(a)和(b)视场相同。写入激光由图片顶端自上而下入射。用于刻写的 $20\times$ 显微物镜后的激光脉宽为230 fs。对于双线型波导,样品移动速度为 $50\ \mu\text{m/s}$,单脉冲能量为 $7\ \mu\text{J}$ 。激光刻写的两根轨迹相距 $20\ \mu\text{m}$, z 方向的成丝长度为 $25\ \mu\text{m}$ 。由于和材料作用的激光焦区发生了多光子吸收,能量转移到晶格,诱导了晶格缺陷致使与焦区作用的材料发生膨胀,因此激光刻写轨迹上折射率是降低的,同时双线之间的区域由于受到挤压,折射率将会增加。双线之间的区域是导通区域。对于圆包层波导,包层由20根刻线构成,分布在一个直径为 $24\ \mu\text{m}$ 的圆柱面上,为了避免激光通过以前刻写的修正区域,采取先刻下半个柱面,再刻上半个柱面。为了减小成丝长度,样品移动速度增加到 $300\ \mu\text{m/s}$,单脉冲能量减少到 $3\ \mu\text{J}$ 。

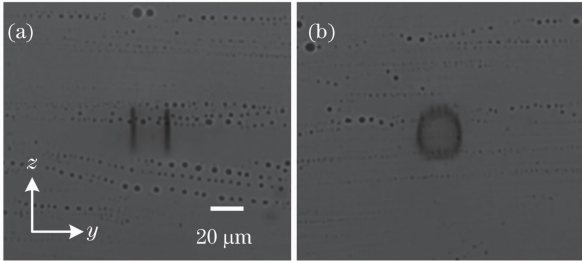


图2 波导端面的光学透射显微图片。(a)双线结构;
(b)圆包层结构

Fig. 2 Optical transmission micrograph at the end of the waveguides. (a) Double line structure; (b) circular cladding structure

3 波导的测试

近场模测试采用980 nm的激光作为光源,通过非球面镜(焦距为15.29 mm)耦合入波导一端,再通过 $10\times$ 显微物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。图3为双线型波导的近场模图,图中箭头表示被耦合激光的偏振方向。图3(a)表明该双线型波导导通垂直方向偏振(TE)激光,图3(b)表明水平方向偏振(TM)激光不能够导通。因此该结构相当于一个波导偏振器。造成该双线型波导偏振依赖导光的原因是与焦区作用的材料发生膨胀,产生应力双折射,对于双线之间区域,偏振方向平行于慢轴的光对应的折射率高于基质的折射率,偏振方向垂直于慢轴的光对应的折射率低于基质的折射率。图4为圆包层波导的近场模图。由于圆包层波导具有圆对称性,所以支

持各个方向偏振的导通。图4(a)和(b)表明该圆包层波导能导通两个偏振方向正交的激光。

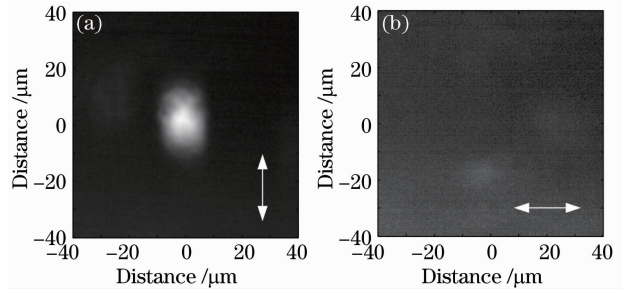


图3 双线型波导的近场模。(a)耦合垂直(z 方向)偏振980 nm激光所得的近场模;(b)耦合水平(y 方向)偏振980 nm激光所得的近场模

Fig. 3 Near-field modes of the double line waveguide. (a) Near-field mode for injected 980 nm radiation with vertical polarization; (b) near-field mode for injected 980 nm radiation with horizontal polarization

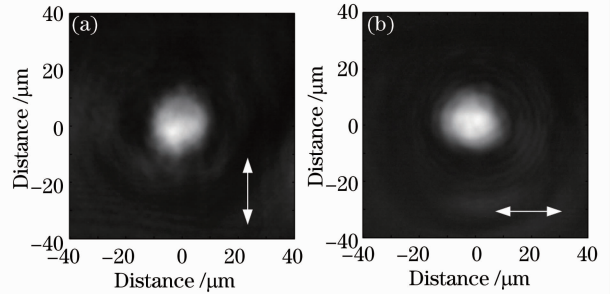


图4 圆包层波导的近场模。(a)耦合垂直(z 方向)偏振980 nm激光所得的近场模;(b)耦合水平(y 方向)偏振980 nm激光所得的近场模

Fig. 4 Near-field modes of the circular cladding waveguide. (a) Near-field mode for injected 980 nm radiation with vertical polarization; (b) near-field mode for injected 980 nm radiation with horizontal polarization

根据近场模重构了波导的折射率改变量的分布^[17]。图5(a)为双线型波导的折射率相对基质改变量的分布,图5(b)为根据圆包层波导竖直偏振方向的模式,反推的折射率改变量的分布。水平偏振方向的模式反推的折射率分布与图5(b)相近。双线型波导和圆包层波导的折射率修正达到了 10^{-4} 量级,与大多数材料内诱导的折射率改变量级一致。根据 Clausius-Mosotti 公式的微分形式^[18]

$$\frac{\Delta V}{V} = -\frac{6n}{(n^2 + 2)(n^2 - 1)} \Delta n, \quad (1)$$

式中 n 为基质的折射率。焦区的相对体积变化达到了 10^{-4} 量级。

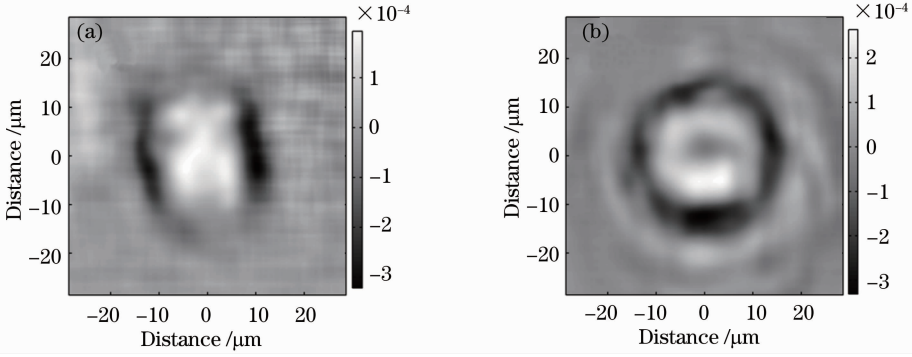


图 5 (a)通过近场模[图 3(a)]反推的双线型波导的折射率分布；(b)通过近场模[图 4(a)]反推的圆包层波导的折射率分布

Fig. 5 (a) Calculated relative refractive index distribution of the double line waveguide corresponding to the near-field mode presented in Fig. 3 (a); (b) calculated relative refractive index distribution of the circular cladding waveguide corresponding to the near-field mode presented in Fig. 4(a)

波导的传输损耗通过截断法测量。图 6 显示了波导的插入损耗随波导长度的变化关系。圆圈代表耦合垂直偏振激光对应的插入损耗，棱形代表耦合水平偏振激光对应的插入损耗。图中线性拟合直线的斜率表示了传播损耗 (dB/cm)。纵坐标截距表示由模场失配和波导两端菲涅耳反射带来的耦合损耗。由图 6 可知双线型波导的传输损耗为 1.1 dB/cm。

圆包层波导对竖直偏振激光的损耗为 1.8 dB/cm，对水平偏振激光为 1.9 dB/cm。圆包层波导的损耗比双线型稍大，这可能是由于圆包层由多根损伤轨迹构成，对激光的散射要强于双线型波导。由于集成光学里，波导长度往往为数个毫米，以上波导损耗的量级是可以接受的。

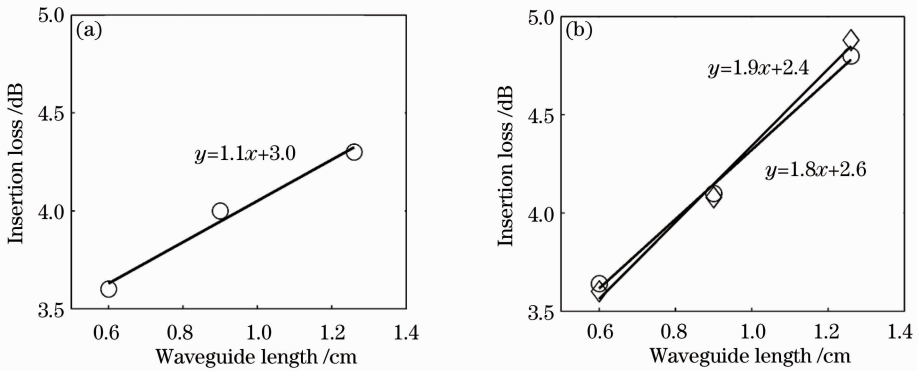


图 6 (a)双线型波导和(b)圆包层波导的插入损耗随波导长度的变化

Fig. 6 (a) Insertion loss of the double line waveguide and (b) the circular cladding waveguide versus different waveguide lengths

4 波导旋光特性的研究

磁致旋光晶体是功率激光系统中抗激光反馈必备的光学元件之一，在较低的磁场强度下获得较大的旋转角度，可用于制作磁光隔离器。体介质中偏振面旋转的角度可以表示为

$$\theta_F = V_B \int_0^L B(x) dx, \quad (2)$$

式中 θ_F 为通过长度为 L 的样品偏振面旋转的角度， V_B 为体介质的费尔德常数， B 为轴向磁感应强度。

在磁光波导中，TE-TM 模式转换效率由下式表示^[15,19]

$$R = \frac{I_{TM}}{I_0} = \frac{\theta_F^2}{\theta_F^2 + \left(\frac{\Delta\beta}{2}\right)^2} \sin^2 \sqrt{\theta_F^2 + \left(\frac{\Delta\beta}{2}\right)^2}, \quad (3)$$

式中 I_0 为不加磁场时 TE 模的强度， $\Delta\beta$ 为 TE 模和 TM 模传播常数差。当 $\Delta\beta=0$ ，(3)式退化为体介质的情况。对于铽镓石榴石内光刻的双线型波导，只支持 TE 模，相位完全失配，在外加磁场下偏振面不

会发生旋转。而在铽镱石榴石内光刻的小芯径的圆对称压低包层波导,两个正交模式的相位失配可以忽略,在外加磁场下可以发生旋光效应。图7为波导旋光测试实验装置示意图。将准直的980 nm激光通过格兰棱镜起偏,用4×显微物镜将激光耦合进圆对称压低包层波导的左端,再由10×的显微物镜将波导输出端的模场成像到CCD上,然后旋转检偏格兰棱镜,当起偏格兰棱镜和检偏格兰棱镜正交时,发生消光。此时沿激光传播方向加入磁场(轴向磁感应强度约为0.45T),CCD拍到出现近场模式,说明偏振面发生旋转。当检偏格兰棱镜转过 12.0° 后,再次发生消光。这说明激光经过加有磁场的波导之后,它的偏振面发生了 12.0° 的旋转,且此时的偏振消光比为18 dB。在相同的外场下,去掉耦合透镜和成像透镜,让激光通过体介质,偏振面发生了 12.4° 旋转,比波导的情况旋转角度稍大,这可能是由于两个正交模的传播常数略有差异所致。对于双线型波导,实验中没有观察到偏振面的旋转,和理论预期一致。铽镱石榴石中的双线型和圆包层波导可以作为波导偏振器和旋光器件,在集成光学上有潜在的应用价值。

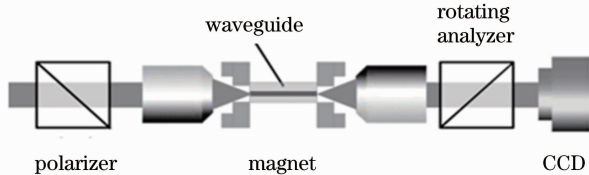


图7 波导旋光测试装置图

Fig. 7 Experimental setup for measuring rotation of the waveguide

5 结 论

利用低重复频率的飞秒激光在磁致旋光晶体铽镱石榴石中刻写了双线型和压低的圆包层波导。根据近场模重构了飞秒激光在铽镱石榴石内诱导的折射率改变的分布。使用截断法测量了波导的传输损耗。实验结果表明双线型波导具有偏振依赖的导光特性,由于TE模和TM模相位完全失配,在外加磁场下,双线型波导的导模的偏振面不会发生旋转。对于圆对称包层波导,两个正交模式的相位失配可以忽略,导模的偏振面能在外加磁场下发生旋转。铽镱石榴石中的双线型和圆包层波导可以作为波导偏振器和旋光器件,在集成光学上有潜在的应用价值。

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 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.
- 3 G Cerullo, R Osellame, S Taccheo, *et al.*. Femtosecond micromachining of symmetric waveguides at $1.5 \mu\text{m}$ by astigmatic beam focusing [J]. *Opt Lett*, 2002, 27(21): 1938–1940.
- 4 Jing Bai, Xuewen Long, Xin Liu, *et al.*. Embedded optical waveguides fabricated in SF10 glass by low-repetition-rate ultrafast laser [J]. *Appl Opt*, 2013, 52(30): 7288–7294.
- 5 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.
- 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): 2690–2692.
- 7 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.
- 8 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.
- 9 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.
- 10 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.
- 11 Wang Yuerong, Li Yi, Wang Sijia, *et al.*. Directly writing single polarization microstructure waveguide in fused silica by high repetition rate femtosecond 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.
- 12 S Taccheo, G Della Valle, R Osellame, *et al.*. Er: Yb-doped waveguide laser fabricated by femtosecond laser pulses [J]. *Opt Lett*, 2004, 29(22): 2626–2628.
- 13 T Shih, R Gattass, C Mendonca, *et al.*. Faraday rotation in femtosecond laser micromachined waveguides [J]. *Opt Express*, 2007, 15(9): 5809–5814.
- 14 Qiang Liu, M Ams, P Dekker, *et al.*. Laser written waveguides in magneto-optical glass [J]. *IQEC/CLEO Pacific Rim*, 2011, 1995–1997.
- 15 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.
- 16 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.

17 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): 1348–1352.

18 J Burghoff, S Nolte, A Unnermann. Origins of waveguiding in

femtosecond laser-structured LiNbO₃ [J]. *Appl Phys A*, 2007, 89(1): 127–132.

19 P K Tien, D P Schinke, S L Blank. Magneto-optics and motion of the magnetization in a film-waveguide optical switch [J]. *J Appl Phys*, 1974, 45(7): 3059–3068.

栏目编辑: 韩 峰