

飞秒激光在钛蓝宝石晶体中刻写双线型波导的研究

刘 爽^{1,2} 刘 欣^{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 钛蓝宝石晶体作为一种重要的激光介质,具有宽带的吸收光谱及宽带可调谐的发射光谱等特性,使其在集成光学中有广泛的应用前景。这里利用重复频率为1 kHz,中心波长为800 nm,脉冲宽度为120 fs的飞秒脉冲激光在钛蓝宝石晶体中横向刻写双线型波导,系统地研究了激光写入晶体深度、刻写速度以及波导双线间距对波导导光情况的影响,在写入激光脉冲能量为2 μJ ,写入深度为175 μm ,刻写速度为90 $\mu\text{m/s}$,波导双线间距为26 μm 的条件下,得到一组导光模式较优的双线波导并发现其具有偏振导光现象。利用波导的近场模式强度分布重构了其折射率分布图,得到最大的折射率增加量为 1.9×10^{-4} 。用散射法测试了光波导的传输损耗为1.82 dB/cm。

关键词 集成光学;光波导;飞秒光刻;钛蓝宝石晶体;偏振导光

中图分类号 TN249; TN25

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0203001

Study of Ti: Sapphire Double Line Waveguide Written by Femtosecond Laser

Liu Shuang^{1,2} Liu Xin^{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 Ti: sapphire crystal is one of the most important materials as a laser medium, due to its broad absorption band and widely tunable output band, therefore it has wide application in integrated optics. By femtosecond laser with repetition rate of 1 kHz, central wavelength of 800 nm and pulse width of 120 fs, double line waveguide in Ti: sapphire crystal is transversely written. The impacts of the processing conditions, i.e., inscribing depth, writing speed and the track distance on the waveguide formation are systematically studied, and the waveguide with better guiding mode is achieved when laser pulse energy is 2 μJ , inscribing depth is 175 μm , writing speed is 90 $\mu\text{m/s}$ and the distance between two tracks is 26 μm . And the double line waveguide shows polarization dependent optical guiding. Based on the near-field mode intensity, the refractive index profile of the optical waveguide is reconstructed, and the max positive refractive index change is about 1.9×10^{-4} . In addition, by using the scattering technique, the propagation loss of the waveguide is 1.82 dB/cm.

Key words integrated optics; optical waveguide; femtosecond laser writing; Ti: sapphire crystal; polarization dependent guiding

OCIS codes 320.7090; 160.3380; 130.2790; 140.3390

收稿日期: 2014-07-24; 收到修改稿日期: 2014-08-25

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

传统的钛蓝宝石波导制作技术,如脉冲激光沉积^[1]、反应离子刻蚀^[2]、离子扩散^[3]以及离子注入^[4],通过以上技术可以制作平面波导,但其散射损耗较大;用质子注入^[5]的方法可以制作嵌入式波导。然而以上提到的所有制作波导的技术均需要几个加工步骤,费时且成本较高。1996年 Davis 等^[6]首次利用飞秒脉冲激光在玻璃材料中光刻波导^[6],该技术简单、灵活且成本低,从此飞秒光刻波导技术引起了人们极大的兴趣。飞秒光刻技术可应用于不同的材料中,普通的玻璃,如熔石英^[7]、磷酸盐^[8]和硼硅酸盐玻璃^[9],还可以用于一些晶体中,如 LiNbO₃^[10]、硅^[11]、KGW^[12]以及钛蓝宝石晶体^[13]。2004年 Apostolopoulos 等^[14]揭开了飞秒光刻钛蓝宝石波导的序幕,当飞秒激光聚焦到晶体材料内部达到一定阈值时,就会由于非线性多光子吸收和雪崩电离,形成微等离子体并把能量传递到晶格,破坏晶格,导致焦点材料发生膨胀,折射率降低,焦点周围材料由于受到挤压,折射率增加,从而在晶体材料中产生了永久的折射率变化。因此可以利用飞秒激光直写技术制作三维光子器件^[15],如波导^[16-17]、波导耦合器^[18]、光栅^[19]以及波导激光器^[20]等。

钛蓝宝石晶体是一种使用广泛的固态激光材料,这归因于它良好的热传导、机械以及光学特性。除此之外钛蓝宝石晶体还具有宽带的吸收光谱(400~650 nm)以及宽带可调谐的发射光谱(670~1100 nm)^[21],并且可以产生低于 10 fs 脉宽的超短脉冲^[22]。双线型波导制作方法快速、简单;波导导光区域为双线间非激光曝光区域,使得波导能更好地保留材料基质的性质,同时钛蓝宝石双线波导具有良好的热稳定性,且其折射率改变量较易控制。基于钛蓝宝石晶体以及钛蓝宝石波导所具有的特性,使得钛蓝宝石晶体在集成光学领域有着很广泛的应用前景。

本文采用横向刻写的方式,利用低重复频率的飞秒脉冲激光在钛蓝宝石晶体中分步刻写双线波导,详细地研究了飞秒脉冲激光在晶体中写入深度、刻写速度以及波导双线间距对波导导光情况的影响,得到了一组导光模式较优的双线波导。实验中发现钛蓝宝石双线型波导具有偏振导光特性^[23],偏振方向平行于波导截面双线方向的激光可以导通,偏振方向垂直于双线方向的激光不能导通。利用有限差分法^[24],根据波导的近场模式强度分布反推了波导的折射率分布图。采用散射法^[25-26]测试了波导的传输损耗,其传输损耗为 1.82 dB/cm。

2 实验介绍

光刻波导实验装置如图 1 所示,采用钛蓝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,脉冲宽度为 120 fs。通过 1/2 波片和偏振片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。实验所用的样品为钛蓝宝石晶体(Ti³⁺: 0.1% weight fraction, 10 mm×10 mm×2 mm),其光轴平行于 z 轴,将其固定在计算机控制的 XYZ 三维精密位移控制平台上。使用 20 倍的显微物镜(Mitutoyo, 工作距离为 20 mm,数值孔径 NA=0.42)将飞秒脉冲激光聚焦到晶体内部。实验中采用横向方式分步刻写双线光波导,即激光传播的方向与样品的移动方向垂直(刻写激光沿 x 轴的正方向传播,而样品沿着 z 轴的正方向移动)。利用 Olympus BX51 正相位对比显微镜

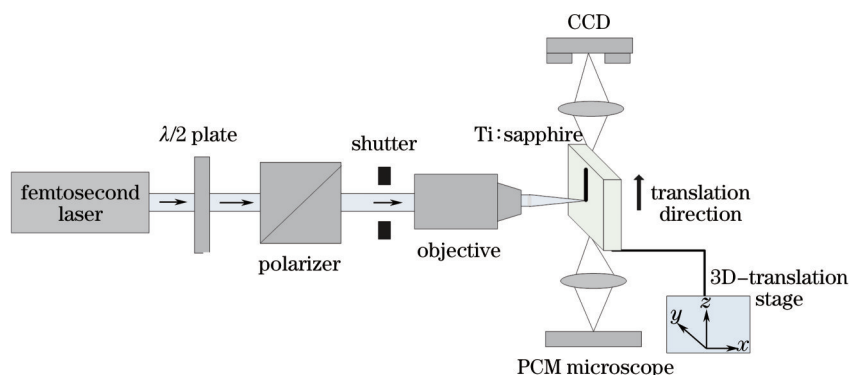


图 1 飞秒激光光刻波导实验装置图

Fig.1 Experimental setup for femtosecond laser waveguide writing

(PCM)观察波导的端面。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($f=15.29$ 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,得到波导的近场模式图。

3 实验结果及分析

实验中发现钛蓝宝石晶体的激光刻写阈值约为 $1 \mu\text{J}$,当聚焦到晶体中的激光脉冲能量超过 $3 \mu\text{J}$ 时,激光作用区域损坏明显,故该晶体可写入光波导的激光脉冲能量窗口很小, $2 \mu\text{J}$ 为较适宜的波导刻写参数,所以实验中固定激光脉冲能量为 $2 \mu\text{J}$ 写入光波导。从飞秒脉冲激光在钛蓝宝石晶体中的写入深度、刻写速度以及波导双线间距三个不同加工条件对波导导光情况的影响进行详细地研究。

3.1 写入深度对光刻波导导光的影响

为了研究飞秒脉冲激光写入钛蓝宝石晶体的深度变化对波导导光情况的影响,实验中保持刻写双线波导的激光脉冲能量为 $2 \mu\text{J}$,刻写速度为 $50 \mu\text{m/s}$,波导双线间距为 $30 \mu\text{m}$,考虑到激光在晶体中的折射,将飞秒激光聚焦到晶体内部的实际深度从 $70\sim 280 \mu\text{m}$ 等间隔刻写。如图2所示,分别给出了不同写入深度波导的横截面图和相应的波导耦合近场模式分布图。从波导截面图可以看出,当激光实际聚焦到晶体中的深度为 $175 \mu\text{m}$ 时,波导端面双线刻痕均匀性较好;同时从波导耦合近场模式图也可以看出,随着激光写入晶体内部深度的增加,波导近场模式分布逐渐变好,当激光实际聚焦到晶体中的深度为 $175 \mu\text{m}$ 时,波导近场模式分布均匀,呈近高斯分布,其近场模式直径约为 $18.3 \mu\text{m}$ ($1/e^2$ 半峰全宽),当写入深度超过 $175 \mu\text{m}$ 后,波导近场模式分布又开始变差。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 $175 \mu\text{m}$ 时,激光刻写痕迹均匀性较好,其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,聚焦到晶体中的能量更为集中,从而可以解释波导端面损伤线上下均匀、波导导光模式较好这一实验现象。实验中为了避免晶体表面杂质以及刻透晶体时其表面损伤对波导导光的影响,光刻时没有刻透晶体的表面,波导的一端距离晶体表面 $500 \mu\text{m}$,波导长度均为 5mm 。

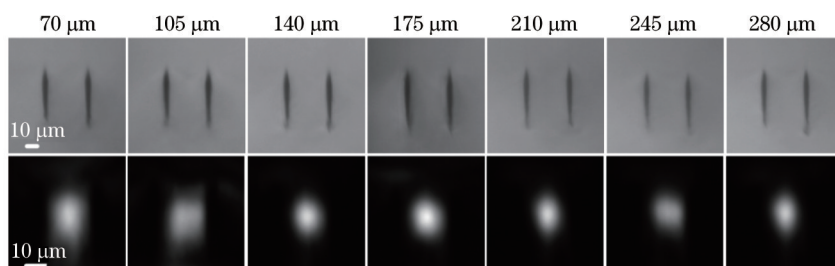


图2 激光脉冲能量为 $2 \mu\text{J}$,刻写速度为 $50 \mu\text{m/s}$,波导双线间距为 $30 \mu\text{m}$,不同写入深度下波导横截面图和波导近场模式图

Fig.2 End view images (top row) and near field mode images (bottom row) of waveguides written at different inscribing depths,

$2 \mu\text{J}$ pulse energy, $50 \mu\text{m/s}$ writing speed and $30 \mu\text{m}$ track distance

3.2 刻写速度对光刻波导导光的影响

为了研究飞秒激光不同刻写速度对波导导光情况的影响,在实验中固定飞秒脉冲能量为 $2 \mu\text{J}$,实际写入晶体深度为 $175 \mu\text{m}$,波导双线间距为 $30 \mu\text{m}$ 刻写波导。实验中发现,当刻写速度低于 $30 \mu\text{m/s}$ 时,激光辐射区域损坏明显;当刻写速度大于 $140 \mu\text{m/s}$ 时,晶体上没有出现明显的损伤痕迹,这是由于聚焦到晶体上的能量没有达到钛蓝宝石晶体的折射率改变阈值,因此选择在 $30\sim 110 \mu\text{m/s}$ 速度范围内等间隔刻写波导。如图3所示,分别给出了不同刻写速度波导的横截面图和相应的波导耦合近场模式分布图。从波导耦合近场模式图可以看出,当刻写速度为 $30 \mu\text{m/s}$ 时,波导模场位于波导双线间接近中心很窄的区域内;当刻写速度逐渐增大时,波导模场面积逐渐增大,并且导光模式逐渐变好;当刻写速度达到 $110 \mu\text{m/s}$ 时,波导近场模式呈现明显的多模分布。这是由于当刻写速度越小时,单位时间内聚焦到晶体上的能量较大,所刻写损伤线产生的应力就越大,双线间晶体折射率改变量较大,波导集中在中间区域导光;当刻写速度逐渐增大时,单位时间内聚焦到晶体上的能量相对较小,刻痕产生的应力相应减小,使得双线间晶体折射率改变量降低,波

导模场面积增大,波导近场模式逐渐变好,当刻写速度为 90 $\mu\text{m/s}$ 时,波导近场模式分布均匀,呈近高斯分布,模场直径约为 17.5 μm 。

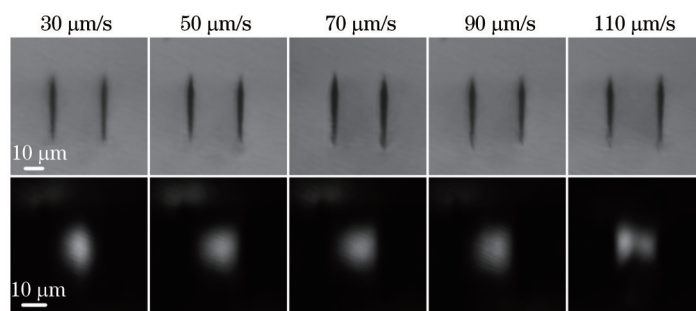


图3 脉冲能量为 2 μJ ,写入深度为 175 μm ,波导双线间距为 30 μm ,不同刻写速度下波导横截面图和波导近场模式图
Fig.3 End view images (top row) and near field mode images (bottom row) of waveguides in the case of different writing speeds, 2 μJ pulse energy, 175 μm inscribing depth and 30 μm track distance

3.3 双线间距对波导导光的影响

为了研究不同双线间距对波导导光情况的影响,实验中固定飞秒脉冲能量为 2 μJ ,实际写入晶体深度为 175 μm ,刻写速度为 90 $\mu\text{m/s}$,在 24~34 μm 双线间距范围内等间隔刻写波导,如图 4 所示,分别给出了刻写不同双线间距波导的横截面图和相应的波导耦合近场模式分布图。从波导耦合近场模式图可以看出,当双线间距为 24 μm 时,波导模场呈现狭长形椭圆分布;当双线间距逐渐增加时,波导模场面积逐渐增大,且导光模式逐渐变好;当双线间距超过 34 μm 时,波导导光变弱。这是由于当双线间距较小时,双线间产生的应力较大,导致的折射率增加量较大,波导对激光的限制能力较强,其近场模式分布靠近损伤线且不均匀,会产生较大的散射损耗,并且由于实验中使用的 976 nm 耦合光源的光斑为近圆高斯分布,该类型波导不利于实现波导与耦合光源间的高效率耦合;随着波导双线间距逐渐增加,波导对激光的限制能力变弱,波导的模场面积逐渐增大,波导近场模式分布逐渐变好;当双线间距进一步增大,双线间产生的应力较小,引起折射率增量较小,波导对光的限制能力减弱,波导导光性能降低。

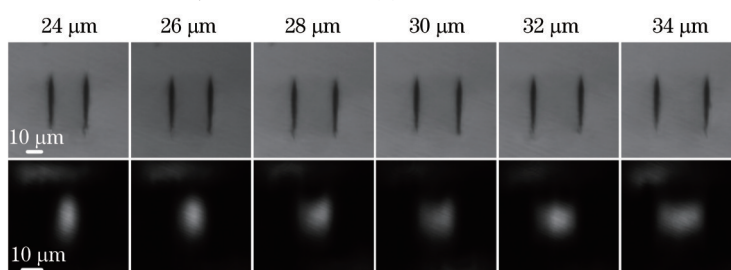


图4 脉冲能量为 2 μJ ,写入深度为 175 μm ,刻写速度为 90 $\mu\text{m/s}$,不同双线间距的波导横截面图和波导近场模式图
Fig.4 End view images (top row) and near field mode images (bottom row) of waveguides with different track distances, 2 μJ pulse energy, 175 μm inscribing depth and 90 $\mu\text{m/s}$ writing speed

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^[24],根据波导的近场模式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 为钛蓝宝石晶体的折射率, 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 5 为利用有限差分法得到的波导的折射率分布图,双线间波导区域最大的折射率增加量为 1.9×10^{-4} ,而波导损伤线处最大的折射率减小量为 0.8×10^{-4} ,折射率降低的两条损伤线作为一个壁垒以及双线之间折射率增加的区域共同支持了该结构导光。图中显示的波导双线间距与实际刻写波导的双线间距相符。该波导为经上述详细研究最终得到的导光模式较优的一组波导,其写入飞秒脉冲能量为 2 μJ ,写入深度为

175 μm ,刻写速度为 90 $\mu\text{m/s}$,波导双线间距为 26 μm 。将 976 nm 半导体激光器作为耦合光源,利用散射法^[25-26]测试该波导的传输损耗为 1.82 dB/cm。

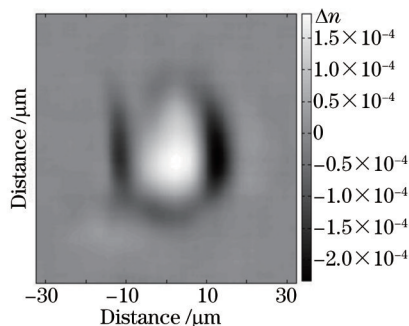


图5 脉冲能量为 2 μJ ,写入深度为 175 μm ,刻写速度为 90 $\mu\text{m/s}$,双线间距为 26 μm 的双线波导折射率分布图
Fig.5 Relative refractive index distribution of the waveguide. Writing pulse energy is 2 μJ , inscribing depth is 175 μm , writing speed is 90 $\mu\text{m/s}$ and the distance between two tracks is 26 μm

3.4 偏振导光

使用 976 nm 半导体激光作为测试光源,将激光通过焦距为 7.5 mm 的准直透镜进行准直,经格兰棱镜起偏,旋转 1/2 波片,分别将竖直与水平偏振光经 15.29 mm 焦距的非球面镜耦合到波导中,最后通过 10 倍的成像透镜将波导近场模式图成像到 CCD 上,如图 6 所示,图(a)为波导端面图,图(b)和(c)表明与波导端面双线方向平行的竖直方向偏振(TE)激光能够导通,而与双线方向垂直的水平方向偏振(TM)激光不能够导通,图中箭头方向代表注入激光的偏振方向。发生上述现象是由于当飞秒激光聚焦到钛蓝宝石晶体中时,飞秒激光辐射区域晶体体积发生膨胀,产生应力双折射^[23]作用,促使双线间注入竖直方向偏振激光产生的折射率高于晶体基质的折射率,故光导通;而注入水平方向偏振激光时,其产生的折射率低于晶体基质的折射率,故不导光,从而在波导双线间形成了偏振导光区,钛蓝宝石双线型波导就相当于一个波导偏振器。

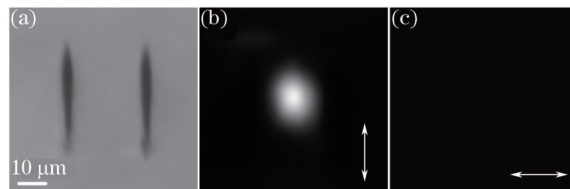


图6 (a) 导光模式较优的双线波导端面图; (b) 耦合竖直偏振光时所得的波导近场模式图;
(c) 耦合水平偏振光时所得的波导近场模式图

Fig.6 (a) Cross-section of waveguide with better guiding mode; (b) near field mode for injected laser radiation with vertical polarization; (c) near field mode for injected laser radiation with horizontal polarization

4 结 论

采用重复频率为 1 kHz,中心波长为 800 nm,脉宽为 120 fs 的超短脉冲激光在钛蓝宝石晶体中横向刻写双线型波导,系统地研究了激光实际写入晶体深度、刻写速度以及波导双线间距对波导导光情况的影响,最终得到了一组导光模式较优的波导,其写入激光脉冲能量为 2 μJ ,实际写入晶体深度为 175 μm ,刻写速度为 90 $\mu\text{m/s}$,波导双线间距为 26 μm ,同时在实验中发现该波导具有偏振导光现象。利用有限差分法反推了该波导的折射率分布图,得到波导最大的折射率增量为 1.9×10^{-4} ,利用散射法测得其传输损耗为 1.82 dB/cm。

参 考 文 献

- 1 A A Anderson, R W Eason, L M B Hickey, *et al.*. Ti: sapphire planar waveguide laser grown by pulsed laser deposition[J]. Opt Lett, 1997, 22(20): 1556-1558.
- 2 A Crunteanu, M Pollnau, G Jänchen, *et al.*. Ti: sapphire rib channel waveguide fabricated by reactive ion etching of a planar waveguide[J]. Appl Phys B, 2002, 75: 15-17.
- 3 V Apostolopoulos, L M B Hickey, D A Sager, *et al.*. Gallium-diffused waveguides in sapphire[J]. Opt Lett, 2001, 26(20): 1586-1588.

- 4 L D Morpeth, J C McCallum, D N Jamieson. Structural characterisation of Ti:sapphire regions formed by localised high-energy implantation of Ti and O ions[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B, 2001, 181(1-4): 372-376.
- 5 L Laversenne, P Hoffmann, M Pollnau, *et al.*. Designable buried waveguides in sapphire by proton implantation[J]. Appl Phys Lett, 2004, 85(22): 5167-5169.
- 6 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.
- 7 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.
- 8 Bai Jing, Long Xuewen, Liu Xin, *et al.*. Femtosecond laser written waveguide in Yb³⁺:phosphate glass and waveguide lasing[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 34(4): 0432003.
白 晶, 龙学文, 刘 欣, 等. 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[J]. 光学学报, 2013, 34(4): 0432003.
- 9 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.
- 10 L Gui, B 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.
- 11 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.
- 12 S M Eaton, C A Merchant, R Lyer, *et al.*. Raman gain from waveguides inscribed in KGd(WO₄)₂ by high repetition rate femtosecond laser[J]. Appl Phys Lett, 2008, 92(8): 081105.
- 13 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.
- 14 V Apostolopoulos, L Laversenne, T Colomb, *et al.*. Femtosecond-irradiation-induced refractive-index changes and channel waveguiding in bulk Ti³⁺:sapphire[J]. Appl Phys Lett, 2004, 85(7): 1122-1124.
- 15 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.
- 16 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. 飞秒激光在铽镱石榴石中的光刻光波导[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0432002.
- 17 X Long, J Bai, X 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.
- 18 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.
- 19 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.
- 20 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.
- 21 P F Moulton. Tunable solid-state lasers[J]. IEEE Proc, 1992, 80(3): 348-364.
- 22 A Stingl, M Lenzner, C Spielmann, *et al.*. Sub-10-fs mirror-dispersion-controlled Ti:sapphire laser[J]. Opt Lett, 1995, 20(6): 602-604.
- 23 J Burghoff, S Nolte, A Tünnermann. Origins of waveguiding in femtosecond laser-structured LiNbO₃[J]. Appl Phys A, 2007, 89(1): 127-132.
- 24 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.
- 25 S V Rao, K Moutzouris, M Ebrahimzadeh, *et al.*. Measurements of optical loss in GaAs/Al₂O₃ nonlinear waveguides in the infrared using femtosecond scattering technique[J]. Opt Commun, 2002, 213(4-6): 223-228.
- 26 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.