

doi:10.3788/gzxb20144308.0806003

# 基于 $45^\circ$ 倾斜光纤光栅的线偏振输出掺镱 光纤激光器

付圣贵, 刘晓娟, 魏功祥, 郭立萍, 葛筱璐

(山东理工大学 理学院, 山东 淄博 255049)

**摘 要:** 对工作于 1 064 nm 波段的  $45^\circ$  倾斜光纤光栅的偏振依赖损耗特性与工作机理进行了分析. 利用紫外曝光法, 将周期为 1 070 nm 的常规相位模板旋转  $33^\circ$  后, 在光敏光纤上写制了  $45^\circ$  倾斜光纤光栅, 写制的光栅栅区长度为 12 mm, 在 1 040~1 085 nm 范围内偏振依赖损耗值为 7 dB 左右. 影响其偏振依赖损耗值的主要原因为相位模板的周期不是最佳值和栅区长度不够. 利用写制的  $45^\circ$  倾斜光纤光栅作为起偏器件, 实现了线偏振输出的掺镱光纤激光器, 其激光消光比高于 30 dB, 输出波长为 1 065.4 nm, 3 dB 线宽为 0.08 nm, 最高输出功率 8.7 mW, 可长时间保持高偏振度稳定工作.

**关键词:** 光纤光学; 光纤激光器; 偏振依赖损耗; 倾斜光纤光栅; 相位模板; 偏振; 消光比

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)08-0806003-4

## Polarization Ytterbium-doped Fiber Laser Based on $45^\circ$ Tilted Fiber Grating

FU Sheng-gui, LIU Xiao-juan, WEI Gong-xiang, GUO Li-ping, GE Xiao-lu  
(School of Science, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China)

**Abstract:** The working mechanism and Polarization Dependent Loss (PDL) characteristics of  $45^\circ$  tilted fiber gratings working at 1 064 nm band were researched theoretically and experimentally. The  $45^\circ$  tilted fiber grating was fabricated in photosensitive fiber by UV-inscription technique. A phase mask with a period of 1 070 nm was rotated  $33^\circ$  to the fiber axis to produce tilted fringes of  $45^\circ$  in the fiber core. The length of the  $45^\circ$  tilted fiber grating was about 12 mm. The PDL value was about 7 dB over 1 040 nm to 1 085 nm. According to theoretical analysis, the main causes of the low PDL value was due to the unsuitable pitch and insufficient length of the phase mask. Using the  $45^\circ$  tilted fiber grating as a polarization selective device, a polarized Yb-doped fiber laser was demonstrated. The polarization extinction ratio of the output laser was more than 30 dB. The maximum output power of the fiber laser was 8.7 mW and the center wavelength was 1 065.4 nm with 3 dB line width of 0.08 nm, which can be stable after a long time work.

**Key words:** Fiber optics; Fiber laser; Polarization dependent loss; Tilted fiber grating; Phase mask; polarization; Polarization extinction ratio

**OCIS Codes:** 060.2310; 060.3510; 060.3735; 060.2340; 050.2770

## 0 引言

掺镱光纤激光器近年来得到了人们广泛的关注和研究<sup>[1-2]</sup>. 普通光纤激光器输出激光一般为非偏振光, 偏振度很低. 为了获得偏振激光输出, 常见的方式是利用保偏掺杂光纤作为增益介质或在腔内插入起偏元

件. 考虑到成本因素, 在腔内插入起偏器是一种简单可行的方法. 常见的光纤起偏器采用用双折射晶体、偏振薄膜、双折射光纤缠绕型以及其它特殊形状光纤等<sup>[3-5]</sup>, 但这类起偏器件成本较高, 插入损耗大, 制作工艺复杂. 寻找一种光纤化的高性能起偏器件成为研究热点.

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 11104165, 11304184)和山东省自然科学基金(No. ZR2013FM007)资助

第一作者: 付圣贵(1977-), 男, 副教授, 主要研究方向为光纤激光器. Email: fushenggui@163.com

收稿日期: 2013-12-11; 录用日期: 2014-01-24

<http://www.photon.ac.cn>

倾斜光纤光栅 (Tilted Fiber Grating, TFG) 在传感领域得到比较广泛的研究和应用<sup>[6-9]</sup>. 作为一种比较特殊的倾斜光栅, 45° TFG 具有非常好的偏振特性<sup>[7-8]</sup>, 除了被用于传感领域外, 也被作为偏振器件用于光纤激光器相关领域的研究. 2005 年, Zhou K M 等利用移动扫描相位模板技术成功写制了 1 550 nm 波段的 45° TFG, 实验证明了该光栅在 1 510~1 610 nm 波段具有高达 30 dB 以上的偏振依赖损耗 (Polarization Dependent Loss, PDL)<sup>[10]</sup>. 2007 年该课题组利用 45° 倾斜光纤光栅实现了偏振输出的掺铒光纤激光器<sup>[11-12]</sup>, 随后科研人员利用该器件进行了被动锁模掺铒光纤激光器等多个领域的研究<sup>[13-15]</sup>. 研究表明这种新的偏振器件具有结构紧凑、全光纤化、偏振度高和制作方便等优点.

本文利用相位掩模法写制了可工作于 1 064 nm 波段的 45° 倾斜光纤光栅, 研究了其偏振特性, 并利用研制的 45° TFG 作为偏振器件进行了掺铒光纤激光器的研制.

## 1 45° 倾斜光纤光栅及特性

当自然光在电介质界面上的入射角满足布儒斯特角条件时, 其反射光和折射光为线偏振光, 振动方向与入射面垂直. 倾斜光纤光栅具有偏振选择特性的原理与此相同. 目前常用的写制倾斜光纤光栅的方法是将相位模板与光纤轴向旋转一定角度, 利用光敏光纤的光敏性, 通过紫外曝光, 将入射光的相干场图样写入纤芯, 在纤芯内形成沿轴向具有一定周期的折射率调制结构. 当折射率调制条纹与光场传播垂直方向存在一定角度时, 入射光在折射率调制区分界面上将会发生反射和折射, 如图 1.

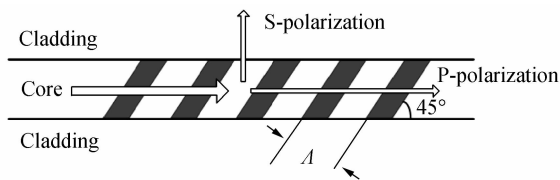


图 1 45° 倾斜光纤光栅导光示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a 45° TFG structure

获得偏振光输出需要光场入射角度满足布儒斯特角, 根据斯涅耳定律, 布儒斯特角大小为

$$\theta_B = \arctan(n_2/n_1) \quad (1)$$

式中,  $n_1$  为纤芯中未经紫外曝光区域的折射率,  $n_2$  为经曝光后调制区域的折射率. 采用紫外曝光的方法形成光致折射率变化是非常微小的, 一般在  $10^{-5} \sim 10^{-3}$  数量级, 相对于纤芯原来的折射率可以近似认为  $n_2 \approx n_1$ , 根据式(1), 其布儒斯特角为 45°.

为了获得 45° 倾斜角折射率调制, 相位模板需要与光纤轴向成一定的旋转角度. 由于折射率的影响, 相位

模板形成的光场相干条纹进入纤芯内部后与轴向的角度将会发生一定改变, 所以需要首先确定模板的旋转角度, 该角度可由式(2)计算得到<sup>[16]</sup>

$$\theta_g = \frac{\pi}{2} - \arctan\left[\frac{1}{n_w \tan \theta_m}\right] \quad (2)$$

式中,  $\theta_g$  为纤芯内光场条纹与光纤垂直方向的夹角,  $n_w$  为紫外光源在纤芯内的折射率,  $\theta_m$  为光纤外的光场条纹与光纤垂直方向的夹角. 根据 193 nm 紫外激光在石英光纤中的折射率值可以计算得到这个角度, 实际写制时还需根据实际测量结果进行微调. 写制时我们将相位模板旋转, 使外部光场条纹与光纤轴向垂直方向夹角为 33° 左右, 使用的相位模板的周期为 1.07  $\mu\text{m}$ . 光栅写制光源为 193 nm ArF 准分子激光器, 使用光纤为 Nufern PS-1060 光敏光纤.

图 2 为利用相位掩模法写制的光纤光栅的显微照片, 栅区长度约为 12 mm. 从图中可以看见清晰的折射率调制条纹, 其倾角与轴向为 45°, 由于实验中存在人为操作误差, 实际测量角度稍有偏差, 对其偏振特性没有明显影响.

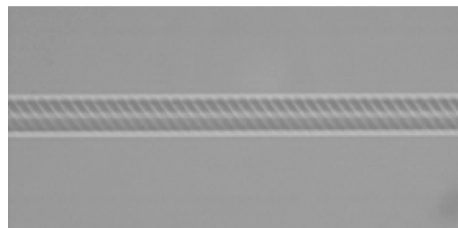


图 2 写制的倾斜光纤光栅显微照片

Fig. 2 Microscopy image of the TFG

根据耦合模理论, 倾斜光纤光栅的偏振依赖损耗 (Polarization Dependent Loss, PDL) 值与栅区的长度有关, 长度越长其 PDL 值越高, 由于相位模板尺寸的限制, 写制的光栅长度偏短. 另外光栅的周期对应最佳耦合波长, 由于单独定制模板价格昂贵, 实验中采用了模板周期为 1 070 nm 的模板, 由于 193 nm 紫外光在纤芯中的折射率约为 1.56, 由相位匹配条件对应的最佳工作波长应为 940 nm 左右. 虽然铒离子的增益谱没有与该波长相对应, 但是前期研究表明该器件具有很宽的工作波长范围, 在 1 064 nm 波段仍然可以具有较好 PDL 特性.

为了研究写制的光栅对光的偏振依赖特性, 利用掺铒光纤搭建了宽带光源作为光源进行了测试. 该宽带光源光谱平坦区域为 1 040~1 085 nm. 测量装置如图 3, 宽带光源发出的光经过起偏器变为偏振光, 由偏

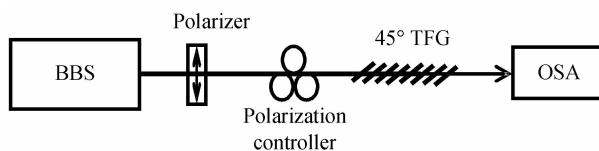


图 3 光栅 PDL 测量装置

Fig. 3 Experimental setup for measuring PDL

振控制器改变偏振方向后耦合进入45°TFG,从而获得该器件的PDL值。

实验中使用的光谱仪型号为AQ6370B,波长分辨率为0.02 nm,测试结果如图4,内插图为利用宽带光源进行PDL测量的实际光谱图。从图中可以看出,写制的45°TFG的PDL值随波长变化有所起伏,在1040~1085 nm范围内,PDL值在6.2~7.9 dB范围内变化,其原因可能是由于光纤包层和空气界面上少量光没有完全出射引起的扰动。测量结果表明,对应于1064 nm波长激光的PDL值为7.16 dB。

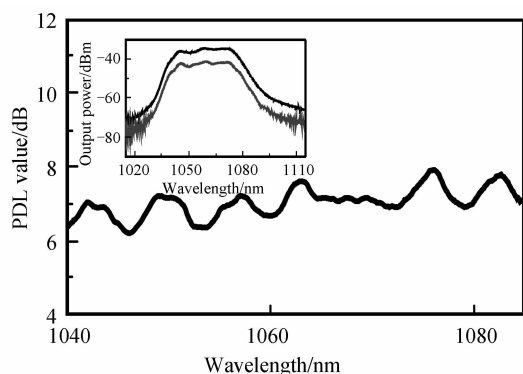


图4 45°TFG的PDL值随波长变化曲线

Fig. 4 PDL profiles of the 45° TFG

Km Zhou等写制的工作在1550 nm、50 mm长45°TFG上的PDL值可达30 dB以上<sup>[10]</sup>。本文写制的倾斜光纤光栅的PDL值偏低的主要原因是:1)由于相位模板限制,该相位模板所对应的最佳波长为940 nm,该器件没有工作于最佳波长;2)写制的光栅栅区长度较短,如果使用更大尺寸的模板将会得到明显改善。

## 2 偏振输出掺镱光纤激光器实验及结果

利用写制的45°倾斜光纤光栅作为起偏器件,进行了偏振输出的掺镱光纤激光器的研制。图5为系统光路图,采用环形腔结构。激光增益介质为单模掺镱光纤,纤芯和包层分别为6 μm和125 μm,长度为1 m,对915 nm激光的吸收率为20 dB/m。泵浦源为976 nm半导体激光器,最高输出功率为120 mW。光纤隔离器保证腔内光的单方向振荡,利用环形器在光路中接入窄

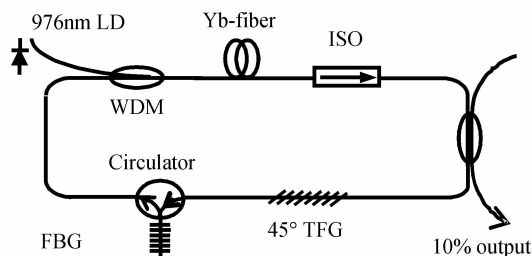


图5 基于45°TFG的偏振掺镱光纤激光器光路

Fig. 5 Experimental setup of polarization Yb-doped fiber laser of 45° TFG

带光纤布拉格光栅保证激光的窄线宽输出,将写制的45°TFG熔接到光路中充当起偏器件。

图6为泵浦功率为80 mW时激光器的输出光谱,由图可知输出激光的信噪抑制比在50 dB以上,激光中心波长为1065.4 nm,谱线的3 dB线宽为0.08 nm,在泵浦功率为100 mW时获得8.7 mW的输出功率。系统光-光转换功率相对较低,除了腔内光学器件如隔离器、倾斜光纤光栅和环形腔等带来的损耗外,另一个原因为输出端利用90:10耦合器的10%端输出,输出比例偏低,对于获得高输出功率不利。当系统采用90%耦合端输出时,输出功率可以得到较大提高,但其输出激光光谱的线宽增加。经过合理设计优化,系统的光-光转换效率可以得到提高。

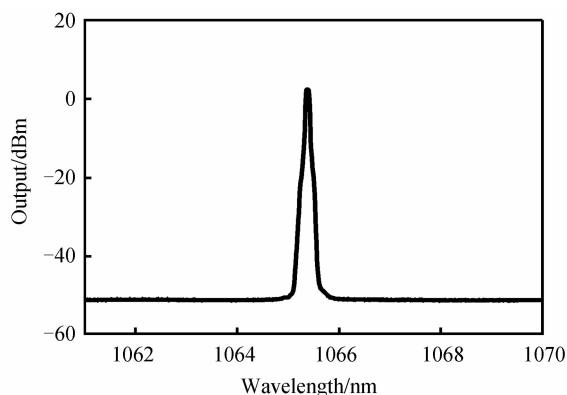


图6 光纤激光器输出光谱

Fig. 6 Output spectrum of the fiber laser

为了测量输出激光的偏振度,进行了激光的消光比实验,测量实验装置如图7。系统输出的激光由偏振控制器改变其偏振方向后耦合进入光纤检偏器,仔细调节偏振控制器,当输出激光的偏振方向与检偏器偏振方向一致时,获得输出功率最大,当输出激光的偏振方向与检偏器偏振方向垂直时得到的输出功率最小,二者之间的差值即为该输出激光的偏振消光比。在实验中,获得了输出功率最高和最小时的激光光谱,如图8。

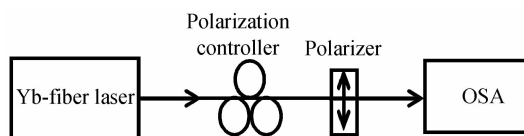


图7 输出激光的消光比测量方式示意图

Fig. 7 Schematic of polarization extinction ratio measurement system

由图8可知,虽然写制的45°倾斜光纤光栅的PDL值只有7.16 dB,但是在光纤激光器中,腔内光子经过多次振荡选择,输出激光的消光比仍然超过了30 dB,偏振度可达99.9%,考虑到测量时偏振控制器带来的微小损耗波动,其偏振度仍可达99.5%以上,表明该系统的输出激光为高偏振度的线偏振光。为了测量该偏振激光系统的稳定性,在三个小时内每隔十分钟进

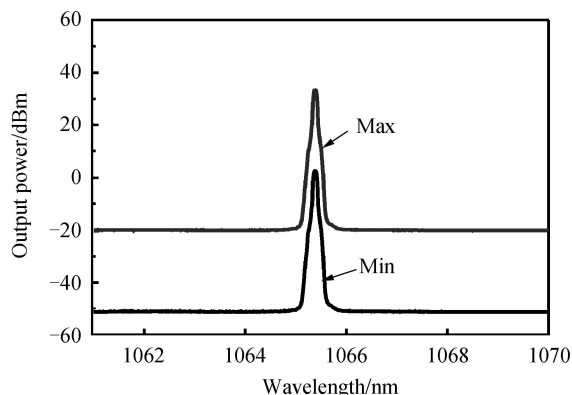


图8 输出激光消光比测量曲线

Fig. 8 Polarization extinction ratio measurement result of the output laser

行一次测量,多次测量结果表明该系统输出偏振激光的消光比非常稳定,偏振度波动范围在1%之内,证明了该器件可以作为一种优良的光纤起偏器件在掺镱光纤激光器中得到广泛应用。

### 3 结论

对工作于1064 nm波段的45°TFG进行了系统的研究,分析了影响PDL值的主要因素,并采用紫外激光相位掩模法成功撰写了45°TFG,对其偏振依赖损耗特性进行了实验研究,利用该器件作为光纤起偏器研制了偏振输出的掺镱光纤激光器,其中心波长在1065.4 nm,3 dB线宽0.08 nm,输出激光的消光比高于30 dB,可以长时间稳定工作。45°TFG作为偏振器件具有完全光纤化、结构紧凑、成本低和偏振性能好等优点。由于相位模板的限制,制作的光栅并没有工作于最佳波长,栅区长度也不够长,如果采用合适参量的相位模板,可以制作出性能更为优异的工作于1064 nm波段的45°TFG。

**致谢:**感谢英国Aston大学光电子课题组的Mou C B博士在前期合作期间进行的与该论文有关的有益讨论。

#### 参考文献

- [1] SUN Hong, WEI Kai-hua, QIAN Kai, *et al.* Gain switched all-fiberized pulse Yb fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(1): 43-47.  
孙宏, 魏凯华, 钱凯, 等. 一种基于增益调制技术的全光纤化脉冲Yb光纤激光器[J]. *光子学报*, 2013, **42**(1): 43-47.
- [2] QIAN Kai, WEI Kai-hua, CHEN Tao, *et al.* All fiberized supercontinuum laser source based on “figure of eight” cavity mode-locked Yb fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013,

**42**(5): 521-525.

钱凯, 魏凯华, 陈滔, 等. 基于八字腔锁模Yb光纤激光器的超连续谱激光光源[J]. *光子学报* 2013, **42**(5): 521-525.

- [3] FETH J, CHANG C. Metal-clad fiber-optic cutoff polarizer [J]. *Optic Letters*, 1986, **11**(6): 386-388.
- [4] DYOTT R B, BELLO J, HANDEREK V A. Indium-coated D-shaped-fiber polarizer [J]. *Optics Letters*, 1987, **12**(4): 287-289.
- [5] KOPP V, GENACK A. Chiral fibres: Adding twist [J]. *Nature Photonics*, 2011, **5**: 470-472.
- [6] CAUCHETEUR C, SHEVCHENKO Y, SHAO L, *et al.* High resolution interrogation of tilted fiber grating SPR sensors from polarization properties measurement [J]. *Optics Express*, 2011, **19**: 1656-1664.
- [7] ALBERT J, SHAO L, CAUCHETEUR C. Tilted fiber Bragg grating sensors [J]. *Laser Photonics Reviews*, 2013, **7**(1): 83-108.
- [8] ZHENG J, DONG X, ZU P, *et al.* Magnetic field sensor using tilted fiber grating interacting with magnetic fluid [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(15): 17863-17868.
- [9] MIAO Yin-ping, LIU Bo, LIU Jian, *et al.* Tilted fiber Bragg grating used for relative humidity sensor [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, **21**(7): 978-982.  
苗银萍, 刘波, 刘健, 等. 基于倾斜光纤光栅的相对湿度传感 [J]. *光电子·激光*, 2010, **21**(7): 978-982.
- [10] ZHOU K, SIMPSON G, CHEN X, *et al.* High extinction ratio in-fiber polarizer based on a 45°-tilted fiber Bragg grating [J]. *Optic Letters*, 2005, **30**(11): 1285-1287.
- [11] MOU C, CHEN X, ZHOU K, *et al.* Realisation of single polarisation state of fibre ring laser by tilising intracavity 45° tilted fibre bragg grating [C]. International Topic Meeting on Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides, Quebec, Canada, 2007: JWA46.
- [12] MOU C, ZHOU K, ZHANG L, *et al.* Characterization of 45° tilted fiber grating and its polarization function in fiber ring laser [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2009, **26**(10): 1905-1911.
- [13] MOU C, WANG H, BALE B, *et al.* All-fiber passively mode-locked femtosecond laser using a 45°-tilted fiber grating polarization element [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(18): 18906-18911.
- [14] YAN Z, MOU C, WANG H, *et al.* All-fiber polarization interference filters based on 45°-tilted fiber gratings [J]. *Optical Letters*, 2012, **37**(3): 353-355.
- [15] YAN Z, MOU C, ZHOU K, *et al.* UV-inscription, polarization-dependant loss characteristics and applications of 45 tilted fiber gratings [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, **29**(18): 2715-2524.
- [16] MIHAILOV S, WALKER P, LU P, *et al.* UV-Induced polarization-dependant loss (PDL) in tilted fiber Bragg grating: Application of a PDL equalizer [C]. IEEE Proceeding of Optoelectronics, 2002, **149**(56): 211-216.