

# 用于 1064 nm 波段的 45° 倾斜光纤光栅的研制及其偏振特性研究

付圣贵 刘晓娟 周柏君

山东理工大学理学院, 山东 淄博 255049

**摘要** 研究分析了 45° 倾斜光纤光栅的工作机理。利用紫外曝光法, 将周期为 1070 nm 的相位模板旋转一定角度后, 在光敏光纤上成功撰写了 45° 倾斜光纤光栅, 通过拼接撰写技术, 撰写的光栅栅区长度为 24 mm。对撰写的 45° 倾斜光纤光栅的偏振依赖损耗特性进行了研究, 在 1064 nm 处偏振依赖损耗值为 11.8 dB, 在 1050~1100 nm 范围内的偏振依赖损耗值保持在 9 dB 以上。导致其偏振依赖损耗值偏低的主要原因为相位模板的周期不匹配以及光栅栅区长度不够。经过优化后该器件可作为光纤起偏器件使用。

**关键词** 光纤光学; 45° 倾斜光纤光栅; 偏振依赖损耗; 相位模板

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.030604

## Fabrication and Polarization-Dependent-Loss Characterization of 45° Tilted Fiber Grating at 1064 nm

Fu Shenggui Liu Xiaojuan Zhou Bojun

School of Science, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China

**Abstract** A 45° tilted fiber grating working at 1064 nm is fabricated successfully in photosensitive fiber by ultraviolet (UV) inscription technique. A phase mask with a period of 1070 nm is rotated by 32.7° to the fiber axis to produce tilted fringes of 45° in the fiber core. The length of the 45° tilted fiber grating is about 24 mm. The polarization dependent loss (PDL) characteristics of the tilted grating are experimentally researched. The PDL value of the 45° TFG is about 11.8 dB at 1064 nm and it keeps higher than 9 dB over a wavelength range of 50 nm from 1150 nm to 1110 nm. According to the theoretical analysis, the main causes of the relatively smaller PDL value of the tilted grating are that the period of the phase mask is not the optimum value and the length is not enough.

**Key words** fiber optics; 45° tilted fiber grating; polarization dependent loss; phase mask

**OCIS codes** 060.2310; 060.3735; 060.2340; 050.2770

## 1 引言

倾斜光纤光栅(TFG)是指在纤芯中形成的折射率调制条纹相对于常规的光纤光栅与光纤横截面具有一定倾斜角度的光纤光栅。由于该倾斜角度的存在, TFG中模式耦合发生了变化, 产生前向传输的纤芯基模与后向传输的纤芯基模之间的耦合、前向传输的纤芯基模与后向传输的包层模式之间的耦合以及当假设光纤包层直径无限大时产生的前向传输的纤芯基模与辐射模之间的耦合<sup>[1]</sup>。

不同的倾斜角度和折射率调制深度又影响了光栅的透射谱特性, 当TFG倾斜角较小时, 光栅透射谱中包含纤芯模谐振峰和一系列离散的包层模谐振峰, 某些倾斜角度时TFG的反射为零, 成为传输型光纤光栅。而且TFG光栅的倾斜方向不同, 其模式耦合也不同, 因此TFG的透射谱中蕴含着与光纤结构和光栅结构相关的丰富信息。利用TFG的这些特点, 经过合适设计的TFG被广泛应用于光放大器的增益平坦<sup>[2]</sup>、波分复用(WDM)通信系统<sup>[3-4]</sup>以及传感技术<sup>[5-7]</sup>等领域。

作为一种比较特殊的倾斜光栅, 具有45°倾斜角的TFG在近几年开始受到关注。研究人员发现45°TFG

收稿日期: 2013-11-04; 收到修改稿日期: 2013-11-28; 网络出版日期: 2014-02-11

基金项目: 国家自然科学基金(11104165, 11304184)

作者简介: 付圣贵(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光纤激光器件方面的研究。E-mail: fushenggui@163.com

具有非常好的偏振特性。2005年,Zhou等<sup>[8]</sup>利用移动扫描相位模板的技术成功写制了1550 nm波段的45°TFG,从理论上进行了研究,并实验证明了该光栅在1510~1610 nm波段具有高达30 dB以上的偏振依赖损耗(PDL)。利用这种特殊的倾斜光纤光栅,他们和Aston大学的Mou等<sup>[9]</sup>合作实现了偏振输出的掺铒光纤激光器,并对其输出特性从理论上和实验上进行了深入研究。Mou等<sup>[10-11]</sup>利用45°TFG进行了被动锁模掺铒光纤激光器的研究,实现了飞秒脉冲输出。Yan等<sup>[12-13]</sup>对于工作于1550 nm波段的45°TFG的写制技术和PDL特性及其应用从理论和实验方面进行了深入的研究,并对保偏光纤上写制的45°TFG的特性进行了研究。研究表明这种新的偏振器件具有结构简单、全光纤化、稳定和偏振度高的特点。

目前已经发表的工作均围绕1550 nm波段的TFG展开,而另外一种重要的光纤激光器——掺铒光纤激光器——工作于1064 nm波段,并且在多个领域具有重要的应用价值<sup>[14-16]</sup>。目前对可工作于这个波段的45°TFG尚缺乏相应研究。本文在分析45°倾斜光纤光栅工作机理和特点的基础上,用其可在宽带范围内保持偏振依赖损耗特性的优点,利用相位掩模法在光敏光纤上写制了可工作于1064 nm波段的45°TFG,从理论和实验上对其偏振特性进行了深入分析和研究,证明了该器件具有良好的起偏性能,并对影响其PDL特性的因素进行了分析。

## 2 45°倾斜光纤光栅及机理

利用体电流法(VCM)可以方便地对倾斜光纤光栅中的模式耦合情况进行分析。Zhou等<sup>[8]</sup>利用该方法,经过理论分析发现当倾斜角度为45°时,光栅对s偏振和p偏振的光的损耗差别最为明显,p偏振光几乎全部泄漏到光纤外,而s偏振光损耗很小。这样,45°倾斜光纤光栅从功能上可以充当一个起偏器件,入射光经过该器件后只出射某一方向的偏振光,另一偏振方向的光通过包层泄漏到纤外。

45°倾斜光纤光栅的工作机理也可以另一个角度来理解。将45°倾斜光纤光栅看做折射率交替变化的多层电介质,入射光在电介质界面上反射和折射时,一般情况下反射光和折射光都是部分偏振光。当光线的入射角为某特定角时,反射光为线偏振光,其振动方向与入射面垂直,此特定角称为布儒斯特角或起偏角。倾斜光纤光栅为折射率周期性调制的结构,在折射率调制区的分界面上光线发生反射和折射,如果入射光线在分界面上的角度合适的话,将会出现偏振选择现象。

45°倾斜光纤光栅的结构示意图如图1所示,黑色条纹区域为经过紫外曝光的区域,折射率增大,空白区域没有经过紫外曝光折射率保持不变。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。

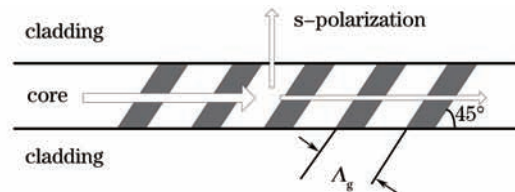


图1 45°倾斜光纤光栅导光示意图

Fig.1 Schematic diagram of a 45°TFG structure

为了获得偏振光输出,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

$$\theta_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right), \quad (1)$$

式中 $n_2$ 和 $n_1$ 分别为折射率调制区域和折射率未调制区域折射率的大小。对于采用紫外曝光法写制的光纤光栅,形成的光致折射率变化非常微小,一般在 $10^{-5}$ ~ $10^{-3}$ 数量级,相对于纤芯原来的折射率可以近似认为 $n_2 \approx n_1$ ,所以对于这种情况下其布儒斯特角应该为45°。可以得知,这样的折射率调制条纹越多,其出射光的偏振度也会越高,且写制的光栅区域长度与出射光的偏振度直接相关。

光纤光栅的写制是利用光敏光纤的光敏性,通过紫外曝光方法,将相位模板相对于光纤轴向旋转一定角度,将入射光的相干场图样写入光纤的纤芯,在纤芯内形成沿轴向具有一定周期的折射率调制结构。

为了在纤芯内获得45°倾斜角折射率调制,放置模板时需要与光纤轴向旋转成一特定角度。因为折射率的影响,在写制光栅的时候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,

因此需要首先确定模板的旋转角度。该角度可由下式得到<sup>[6]</sup>：

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

式中  $\theta_g$  为纤芯内光场条纹与光纤垂直方向的夹角,  $n_{uv}$  为紫外光源在纤芯内的折射率,  $\theta_m$  为模板在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可以计算得到这个角度, 实际写制时还要根据实验结果进行微调。图 2 为模板的干涉条纹在光纤外和在光纤内与光纤横截面的夹角的对应关系曲线, 当模板倾斜角度为 32.7° 时, 获得光纤内部光栅倾斜角度为 45°。

图 3 为写制光栅时, 相位模板形成的干涉场条纹在光纤内部和外部形成的条纹情况。

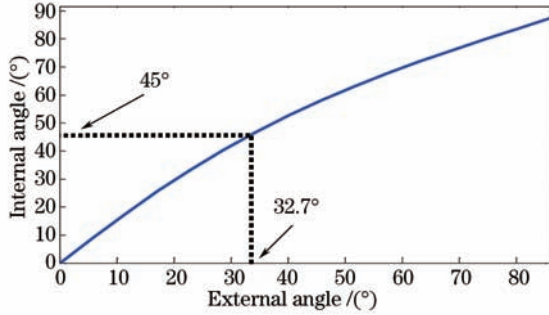


图 2 光纤光栅倾斜角度与模板-光纤横截面夹角关系图  
Fig.2 Plot of internal angle against external angle for TFG fabrication

由图 3 可知,

$$\Lambda = \frac{\Lambda_g}{\cos \theta_{int}} = \frac{\Lambda_{ext}}{\cos \theta_{ext}}, \quad (3)$$

式中  $\Lambda_g$  为光栅内部干涉条纹的间距,  $\Lambda_{ext}$  为光纤外激光干涉场的条纹间距,  $\theta_{int}$  和  $\theta_{ext}$  分别为光纤外部干涉条纹和光纤内部干涉条纹与光纤垂直方向的夹角。

因此有

$$\Lambda_g = \frac{\Lambda_{ext} \cos \theta_{int}}{\cos \theta_{ext}}, \quad (4)$$

$$\Lambda_{ext} = \frac{\Lambda_{PM}}{2}, \quad (5)$$

式中  $\Lambda_{PM}$  为相位模板的周期。根据相位匹配条件, 可以得到相位模板的参数。

### 3 45°倾斜光纤光栅的写制

写制时将相位模板旋转, 使光场条纹与光纤轴向垂直方向夹角约为 33°, 使用的相位模板的周期为 1070 nm。光栅写制光源为 193 nm ArF 准分子激光器, 使用的光纤为 Nufern PS-1060 光敏光纤。图 4 为写制倾斜光纤光栅时相位模板与光敏光纤的相对位置示意图。根据前面的理论分析, 根据理论计算, 为了获得 45° 倾斜光纤光栅, 在光栅写制时模板的倾斜角度应该为 32.7°, 但是这个角度与紫外光在光纤中的实际折射率有关, 计算时采用的数据不一定与实际值完全吻合, 另外在实际写制中, 由于人为操作误差, 调整的角度也会存在一定偏差。因此往往需要在写制完毕后利用显微镜观察所写制光栅的折射率条纹情况, 根据实际情况再对模板的倾斜角度进行微调。

由于单独定制模板价格昂贵, 我们采用了模板周期为 1070 nm 的模板。193 nm 紫外光在纤芯中的折射率约为 1.56, 其相应的最佳工作区域没有与镱离子的增益谱完全相对应, 但是前期研究表明该器件具有很宽的工作波长范围, 在 1064 nm 波段仍然可以具有较好的 PDL 特性。

图 5 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, 其倾角与轴向约为 45°, 由于实验中人为操作误差, 实际写制光栅的倾斜角度与预定值有 1° 左右的偏差, 根据实际测量结果, 倾斜角度稍有偏差对其偏振特性没有明显影响。倾斜光纤光栅的 PDL 值

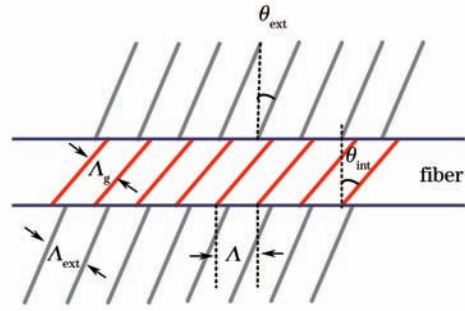


图 3 相位模板参数与倾斜光纤光栅参数示意图  
Fig.3 Illustration of fringes distortion and a 45° TFG structure



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,为了增强栅区长度,可以采用拼接的方法连续写制多段光栅<sup>[8]</sup>。通过调整曝光光斑和模板位置的方法进行了对接式的写制,由于在调整过程中需要精确控制栅区位置,另外一定要保证写制区域与原来不能有相对转动,拼接写制了2段,总的栅区长度为24 mm。更多拼接时,发现测量效果不佳,损耗也比较大,可能是受实验条件限制,调整光路时相对位置有所错位导致的。

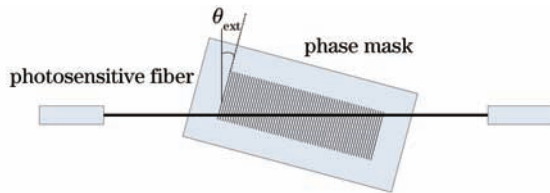


图4 模板与光纤相对位置示意图

Fig.4 Arrangement of phase mask and the photosensitive fiber

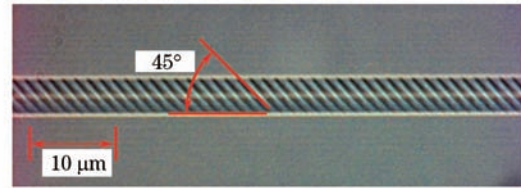


图5 实验写制的倾斜光纤光栅显微照片

Fig.5 Microscopy image of the TFG

为了研究写制的光栅对光的偏振依赖选择特性,利用掺铒光纤搭建了宽带光源(BBS)进行测试。测量装置如图6所示,宽带光源发出的光首先经过一个起偏器变为偏振光,由偏振控制器(PC)改变其偏振方向,耦合进入45°倾斜光纤光栅,通过光谱分析仪(OSA)测试写制的TFG对不同偏振方向光的损耗特性,从而获得该器件的偏振依赖损耗的大小。

实验中使用的光谱分析仪型号为AQ6370B,波长分辨率为0.02 nm。测试结果如图7所示,图中两条曲线分别为调整偏振控制器时得到的宽带光源输出功率最大和最小时的光谱曲线,二者之差即为对应的PDL值。

从图7中可以看出,写制的45°TFG的PDL值随波长变化有所起伏。根据光谱仪采集的数据,在1064 nm处,其PDL值为11.8 dB。随着波长的变化,其PDL值也有所起伏,究其原因,一方面是器件本身对波长具有一定依赖性,另一方面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。经过测量,写制的倾斜光纤光栅引起的附加损耗约为1.2 dB。倾斜光纤光栅的PDL值偏低的主要原因有:由于相位模板限制,写制的光栅没有对应于其最佳工作区域;写制的光栅栅区长度较短,而在进行多段拼接时带来损耗增加和栅区错位的问题。如果使用更大尺寸的模板和购置精密的调整设备,写制的光栅的PDL特性将会得到明显改善。

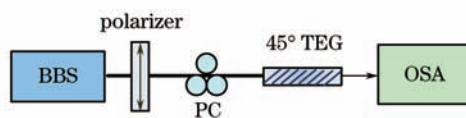


图6 45°倾斜光纤光栅PDL测量装置示意图

Fig.6 Experimental setup for measuring PDL of 45° TFG

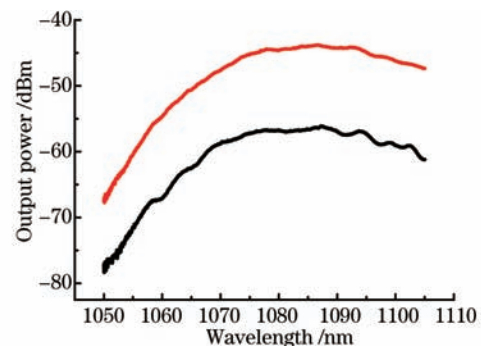


图7 利用宽带光源测试的45°TFG的PDL值随波长变化曲线

Fig.7 PDL profiles of the 45° TFG

## 4 结 论

对45°TFG的偏振特性和写制方式进行了系统的分析和研究,分析了影响PDL值的主要因素,采用紫外激光相位掩模法成功写制了45°TFG,利用两段拼接写制技术,制成的光栅栅区达到24 mm,对应于1064 nm处的PDL值为11.8 dB。受实验中写制光栅使用的相位模板的限制,我们制作的光栅并没有工作于最佳波长,另外栅区长度也不够长,如果采用合适参数的相位模板,可望制作出性能更为优异的工作于1064 nm波段的45°TFG。鉴于课题组已经成功地将1550 nm波段的45°TFG用于掺铒光纤激光器相关研究<sup>[9]</sup>,可

以预见本文所研制的器件可以用于偏振输出的掺镱光纤激光器的研究。

### 参考文献

- 1 Erdogan T, Sipe J E. Tilted fiber phase gratings[J]. *J Opt Soc Am A*, 1996, 13(2): 296-313.
- 2 Emmanuel Kerrinckx, Arif Hidayat, Pierre Niay, *et al.*. Suppression of discrete cladding mode resonances in fiber slanted Bragg gratings for gain equalization[J]. *Opt Express*, 2006, 14(4): 1388-1394.
- 3 Galina Nemova, Jessica Chauve, Raman Kashyap. Design of sidetap fiber Bragg grating filters[J]. *Opt Commun*, 2006, 259(2): 649-654.
- 4 H S Park, S H Yun, I K Hwang, *et al.*. All-fiber add-drop wavelength-division multiplexer based on inter-modal coupling[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2001, 13(5): 460-462.
- 5 Jiang Qi, Hu Debo. A comparative study of refractive index sensors based on bare TFBG and SPR-TFBG[J]. *Laser & Optoelectron Progress*, 2012, 49(8): 080602.  
蒋奇, 胡德波. 基于倾斜光纤光栅及其表面等离子体效应的折射率传感比较研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(8): 080602.
- 6 Mihailov S J, Walker P B, Lu P, *et al.*. UV-induced polarisation-dependent loss (PDL) in tilted fiber Bragg grating: application of a PDL equaliser[C]. *IEE Proc Optoelectron*, 2002, 149(5-6): 211-216.
- 7 Wei Shilei, Zhang Weigang, Fan Hongjian, *et al.*. Study on spectral properties of tilted long-period fiber grating written by high-frequency CO<sub>2</sub> laser pulses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0806006.  
魏石磊, 张伟刚, 范弘建, 等. 高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲写制的倾斜长周期光纤光栅光谱特性研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0806006.
- 8 Zhou K M, Simpson G, Chen X F, *et al.*. High extinction ratio in-fiber polarizers based on 45° tilted fiber Bragg gratings [J]. *Opt Lett*, 2005, 30(11): 1285-1287.
- 9 Mou C B, Chen X F, Zhou K M, *et al.*. Realisation of single polarisation state of fibre ring laser by utilising intracavity 45° tilted fibre Bragg grating[C]. 2007 International Topic Meeting on Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides, 2007. JWA46.
- 10 Mou C B, Zhou K M, Zhang L, *et al.*. Characterization of 45°-tilted fiber grating and its polarization function in fiber ring laser[J]. *J Opt Soc Am B*, 2009, 26(10): 1905-1911.
- 11 Mou C B, Wang H, Bale B G, *et al.*. All-fiber passively mode-locked femtosecond laser using a 45°-tilted fiber grating polarization element[J]. *Opt Express*, 2010, 18(18): 18906-18911.
- 12 Yan Z J, Mou C B, Wang H S, *et al.*. All-fiber polarization interference filters based on 45°-tilted fiber gratings[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(3): 353-355.
- 13 Yan Z J, Mou C B, Zhou K M, *et al.*. UV-inscription, polarization-dependant loss characteristics and applications of 45° TFBG[J]. *J Lightwave Technol*, 2011, 29(18): 2715-2724.
- 14 Zhang Cheng, Luo Zhengqian, Wang Jinzhang, *et al.*. Dual-wavelength mode-locked Yb-doped fiber laser based on the interaction of graphene and fiber-taper evanescent field[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(6): 0602006.  
张成, 罗正钱, 王金章, 等. 熔锥光纤倏逝场作用石墨烯双波长锁模掺镱光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, 39(6): 0602006.
- 15 Liu Jiang, Wu Sida, Wang Ke, *et al.*. Passively mode-locked and Q-switched Yb-doped fiber lasers with graphene-based saturable absorber[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(8): 0802001.  
刘江, 吴思达, 王科, 等. 基于石墨烯可饱和吸收体的被动锁模、被动调 Q 掺镱光纤激光器[J]. *中国激光*, 2011, 38(8): 0802001.
- 16 An Hongbo, Niu Lihong, Su Binghua, *et al.*. Experimental study on intra-cavity frequency-doubling at 532 nm in an Yb-doped fiber laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(7): 071403.  
安宏波, 牛丽红, 苏秉华, 等. 掺镱双包层光纤激光器内腔倍频绿光实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(7): 071403.