

doi:10.3788/gzxb20134212.1482

# 基于热扩芯光纤的 M-Z 滤波器及其在宽带可调谐光纤激光器中的应用

周赢武, 罗志灶

(闽江学院 物理学与电子信息工程系, 福州 350108)

**摘要:**采用氢-氧焰对单模光纤加热的方法制备了热扩芯光纤, 利用所制备的热扩芯光纤制作了一种全光纤 M-Z 干涉滤波器. 将该 M-Z 滤波器嵌入 Sagnac 滤波器中, 构建了一种新型可调谐 Sagnac 干涉滤波器, 其透射谱由 Sagnac 干涉与 M-Z 干涉的非相干叠加而成. 利用该 Sagnac 滤波器, 搭建了宽带可调谐掺铒光纤激光器. 通过调节 Sagnac 滤波器中的偏振控制器, 实现了输出激光的可调谐功能. 实验结果表明: 激光器的输出波长在 1 540.3~1 581.2 nm 范围内可调. 激光输出谱的平坦度优于 2 dB, 激光的边模抑制比超过 45 dB, 而激光的 3 dB 线宽小于 0.1 nm.

**关键词:**热扩芯光纤; M-Z 干涉; Sagnac 滤波器; 光纤激光器

中图分类号: TN248

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)12-1482-4

## Thermally Expanded Core Fiber Based M-Z Filter and Its Application in Widely Tunable Erbium-doped Fiber Laser

ZHOU Ying-wu, LUO Zhi-zao

(Department of Physics and Electronic Information Engineering, Minjiang University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** Thermally expanded core fibers were made by heating a single-mode fiber locally with hydrogen-oxygen flame. An all fiber M-Z filter was fabricated using the thermally expanded core fiber, and it was inserted into a Sagnac filter to make a new structure of tunable fiber Sagnac filter which output spectrum was the uncorrelated superposition between the Sagnac and the M-Z interferences. With the new structure Sagnac fiber filter, a tunable erbium-doped fiber laser was made and investigated experimentally. Tunable output was obtained by adjusting a polarization controller (PC) in the Sagnac interferometer. During the whole tuning process, the laser output wavelength could be tuned from 1 540.3 nm to 1 581.2 nm with the output power flatness better than 2 dB, 3 dB spectral linewidth narrower than 0.1 nm and optical signal-to-noise extinction ratio higher than 45 dB.

**Key words:** Thermally expanded core fiber; M-Z filter; Sagnac filter; Fiber laser

## 0 引言

由于具有输出波长可调、成本低、插入损耗低等优点, 可调谐光纤激光器在光纤传感, 光纤通讯, 仪器测试等领域具有较好的应用前景, 近年来受到业内研究者的广泛关注<sup>[1-5]</sup>. 可调滤波器的应用是实现可调激光输出的重要途径, 因此如何研制高性能可

调谐滤波器成为研究的热点. 目前, 研究者已经研发出了多种不同结构的可调谐光纤滤波器, 例如光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)<sup>[6-7]</sup>、光纤法-珀腔干涉滤波器(Fiber Fabry-Perot, FFP)<sup>[8]</sup>、基于多模光纤的滤波器<sup>[9]</sup>、Sagnac 干涉滤波器<sup>[10-11]</sup>以及声光滤波器<sup>[12]</sup>等. 然而, 利用这些滤波器构建的可调谐激光器要么价格比较贵, 要么输出激光的性能(如激

基金项目: 福建省高校服务海西建设重点项目(No. SHZ09005)资助

第一作者: 周赢武(1968-)男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光通讯技术与器件及光纤传感技术. Email: ywzhou1073@sina.com

收稿日期: 2013-04-22; 录用日期: 2013-07-18

光的线宽、调谐范围以及单波长激射等)不够理想,有待进一步优化.本文利用氢-氧焰对普通商用单模光纤局部加热法制作了热扩芯光纤.将一段单模光纤熔接在两根热扩芯光纤头之间制作了全光纤 M-Z 干涉滤波器.将该滤波器接入 Sagnac 滤波器,构建了一种新型可调谐光纤滤波器.最后利用该 Sagnac 滤波器,搭建了 L 波段宽带可调谐掺铒光纤激光器.

## 1 滤波器的工作原理及其结构

图 1 为热扩芯光纤构成的 M-Z 滤波器结构.热扩芯光纤由普通单模光纤通过氢-氧焰局部加热法制备<sup>[13-14]</sup>.在热扩芯光纤制备好后,利用熔接机将一段长度为  $L_1$  的普通单模光纤和两根热扩芯光纤在热扩芯端熔接,构成如图 1 所示虚线框内的 M-Z 干涉仪结构.

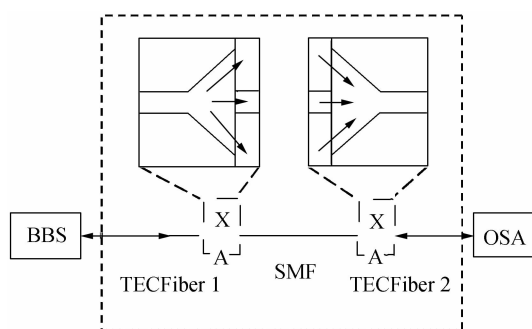


图 1 M-Z 滤波器结构

Fig. 1 Schematic diagram of the thermally expanded core fiber M-Z filter

由图 1 可知,在左端熔接点处,由左边单模光纤传输过来光信号的能量部分耦合到单模光纤的包层,激发出包层模,而另一部分能量沿单模光纤的纤芯向前传输.经过长度为  $L_1$  的单模光纤后,在第二个熔接点处,部分包层模耦合进纤芯,并与纤芯模发生干涉.一般情况下,当热扩芯光纤扩芯端的模场直径较大时,在光纤的包层将激发出多个包层模,这些包层模在第二个熔接点处进入输出光纤的纤芯,和纤芯模发生干涉,导致滤波器输出谱的均匀性受到破坏.但是通过控制热扩芯光纤扩芯端的模场直径,可以减少所激发包层模的数量,使进入包层的能量主要集中在一个包层模上,因此可近似认为只有一个包层模和纤芯模发生干涉<sup>[15]</sup>.这样,利用双光束干涉原理,得到该 M-Z 滤波器的透射特性可表示为

$$T_1 = 1 - \frac{4\rho}{(1+\rho)^2} \sin^2 \left( \frac{\pi(n_c^{\text{eff}} - n_{\text{cl}}^{\text{eff}})L_1}{\lambda} \right) \quad (1)$$

式中,  $\rho$  是包层模和纤芯模的振幅比,  $n_c^{\text{eff}}$ 、 $n_{\text{cl}}^{\text{eff}}$  分别是纤芯模和包层模的有效折射率,而  $\lambda$  是光波的波长.

将热扩芯光纤 M-Z 滤波器接入 Sagnac 滤波器中,构成一种新型 Sagnac 滤波器,其结构如图 2. 该

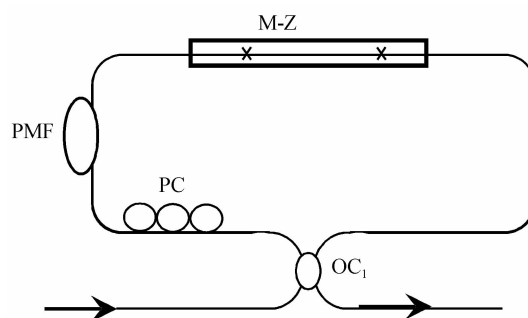


图 2 包含有热扩芯光纤滤波器的 Sagnac 滤波器的结构  
Fig. 2 Sagnac filter incorporating a piece of PMF and a thermally expanded core fiber MZ

Sagnac 滤波器由一个 3 dB 光纤耦合器( $OC_1$ )、一段长度为  $L_2$  的普通单模保偏光纤(Polarization Maintaining Fiber, PMF),一个偏振控制器(PC)和一个上述热扩芯光纤 M-Z 滤波器构成.由图 2 可知,当图中左端输入的光波经过  $OC_1$  后,分成两部分光,这两部分光以相反的方向传输,由于偏振控制器的作用,这两部分光将产生相位差,其大小由保偏光纤的长度与其双折射的乘积决定.当这两部分的光返回到  $OC_1$  时将产生 Sagnac 干涉.由于热扩芯光纤 M-Z 滤波器的存在,该结构的输出谱是 Sagnac 干涉叠加 M-Z 干涉.并且这两种干涉是非相干性的叠加.利用琼斯矩阵,可以得到如图 2 所示的 Sagnac 干涉滤波器,其透射率的表达式为

$$T = \left[ 1 - \frac{4\rho}{(1+\rho)^2} \sin^2 \left( \frac{\pi(n_c^{\text{eff}} - n_{\text{cl}}^{\text{eff}})L_1}{\lambda} \right) \right] \cdot \sin^2 \theta \cos^2 \left( \frac{\pi B L_2}{\lambda} \right) \quad (2)$$

式中,  $\theta$  是 PC 的旋转角,  $B$  是保偏光纤双折射的值.

由式(1)、(2)可知,该 Sagnac 干涉滤波器的透射谱不是平滑的正弦曲线,而是叠加了另一个由 M-Z 干涉引起的另一个正弦曲线(一般情况下, M-Z 的干涉周期设计需远小于 Sagnac 的自由光谱范围).当  $\rho$  值不同时,主要影响 M-Z 干涉引起正弦曲线的可见度,但并不影响 Sagnac 的条纹.因此,当 PC 的角度  $\theta$  为某个值时,在一个 Sagnac 的自由光谱范围,有个小的正弦峰(由 M-Z 干涉引起)对应的损耗最小,改变角度  $\theta$ ,对应最小损耗的小峰的波长位置也相应改变.也就是说最小损耗的小峰对应的波长是可调谐的.

## 2 实验结果及分析

由分析可知,热扩芯光纤 M-Z 滤波器是将一段单模光纤和两根热扩芯光纤的扩芯端熔接而成.但是,如果热扩芯光纤扩芯端的模场直径太大,将导致在所构成的 M-Z 滤波器中参与干涉的包层模过多,干涉谱不均匀.因此为了获得滤波器近似正弦状的

透射谱,制备了相应的热扩芯光纤.

图3为制作热扩芯光纤的实验装置.系统所用的火焰为氢-氧焰,火焰宽度约5 mm,火焰头可在计算机的控制下左右移动(扫描),系统两个平台(Stage<sub>1</sub>, Stage<sub>2</sub>)用于固定光纤.

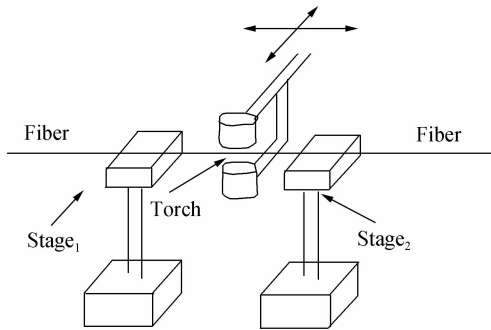


图3 制作热扩芯光纤的系统

Fig. 3 The schematic diagram for the fabrication of thermally expanded core fiber

实验中所用光纤为康宁单模光纤.在制备之前,先将3.5 cm长的光纤涂覆层剥除,并用酒精清洗干净后利用图3所示的系统进行制备.普通的单模光纤纤芯是掺了锗离子的,而包层材料是纯SiO<sub>2</sub>,因此当单模光纤某个局部在氢-氧焰加热下,锗离子将向包层扩散,结果使得该局部光纤的纤芯变大.因此加热时间的长短,将严重影响热扩芯光纤的模场直径.实验中,通过不断试制后发现,在利用火焰头对单模光纤扫描加热的情况下,加热时间为30 min时,所制作的热扩芯光纤用于制备M-Z滤波器所得的透射谱最接近正弦曲线,并且消光比可以达到2 dB以上.

加热30 min后,关闭火焰,自然冷却到室温,利用光纤切割刀,将其在加热的中心位置切断,即制作成了热扩芯光纤.然后利用光纤熔接机,将一根长度为L<sub>1</sub>的单模光纤与上述两根热扩芯光纤的热扩芯端熔接,构成基于热扩芯光纤的M-Z干涉滤波器.

图4给出了利用所制备的热扩芯光纤制作的

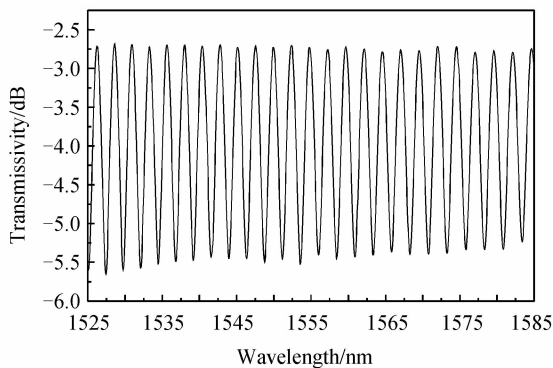


图4 热扩芯光纤M-Z干涉滤波器的透射谱

Fig. 4 The transmission spectrum of the fabricated thermally expanded core fiber M-Z Interference

M-Z干涉滤波器的透射谱,其中L<sub>1</sub>=23.5 cm.由图4可知,该透射谱很接近正弦曲线,与理论分析类似.正弦曲线的周期为2.3 nm(由M-Z干涉滤波器中单模光纤的长度L<sub>1</sub>决定,当所用单模光纤的长度加长时,该周期将变小),意味着芯模和包层模的有效折射率差为4.5 × 10<sup>-3</sup>.透射谱的损耗约为2.6 dB,而消光比约为2.8 dB.

当M-Z干涉滤波器制备好后,将其接入Sagnac滤波器中,得到如图2所示滤波器了.实验中,保偏光纤的长度为13 cm,其双折射大小B=3.7 × 10<sup>-4</sup>.由分析可知,这种新型Sagnac滤波器的透射谱是由两种干涉谱的非相干叠加而成.图5给出了该Sagnac滤波器的透射谱.图中各条曲线分别对应PC的不同转角θ.由图5可知,由M-Z干涉引起的周期为2.3 nm的正弦谱受到由Sagnac干涉所导致的正弦条纹的调制,Sagnac干涉的自由光谱范围为52.4 nm,而其消光比大于20 dB;对于不同的θ值,都有个局部峰的损耗是最小的,与理论分析结果一致.

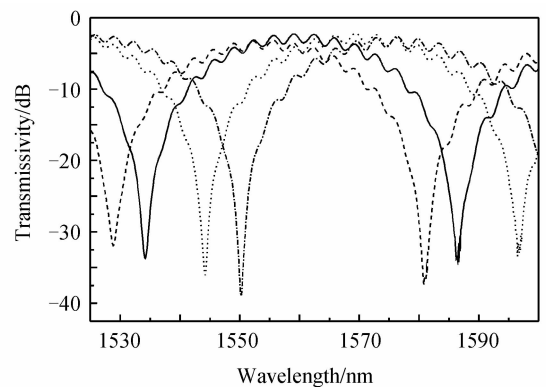


图5 对应不同PC状态的Sagnac滤波器的透射谱

Fig. 5 The transmission spectra of the Sagnac filter with different PC settings

利用上述Sagnac干涉滤波器搭建的一掺铒光纤激光器系统结构如图6.所用的增益光纤为L波段掺铒光纤(Nufern EDFL-980-HP),其长度为5 m.一个980 nm泵浦半导体激光器通过波分复用器(Wavelength Division Multiplexing, WDM)对掺铒光

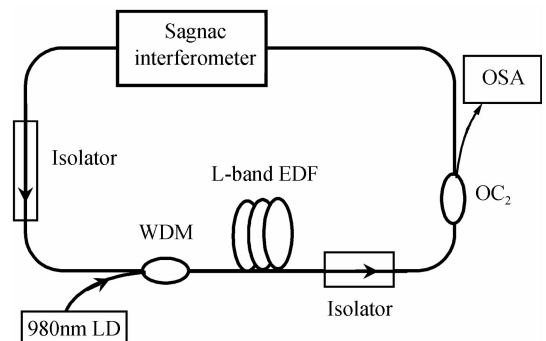


图6 C波段可调谐掺铒光纤结构

Fig. 6 Experimental diagram of the proposed tunable erbium-doped fiber ring laser

纤进行泵浦,实验所用的泵浦功率为 110 mW. 图中两个隔离器用来保证谐振腔单向工作,输出激光由耦合比为 90/10 的耦合器(OC<sub>2</sub>)输出,输出量为腔中激光能量的 10%. 输出激光由光谱仪(Optical Spectrum Analysis, OSA)监测,光谱仪分辨率为 0.1 nm.

实验时,通过调整 PC 可以得到不同波长的激光. 图 7 给出了该可调谐激光器的输出光谱,图中每条谱线对应一个 PC 的状态. 由图 7 可知,激光器的调谐范围超过 40 nm,从 1 540.3 nm 一直调到 1 581.2 nm. 调谐步长为 2.3 nm,该步长由 M-Z 干涉谱的周期决定. 输出激光的边模抑制比超过 45 dB, 3 dB 线宽小于 0.1 nm,输出谱的平坦度优于 2.0 dB.

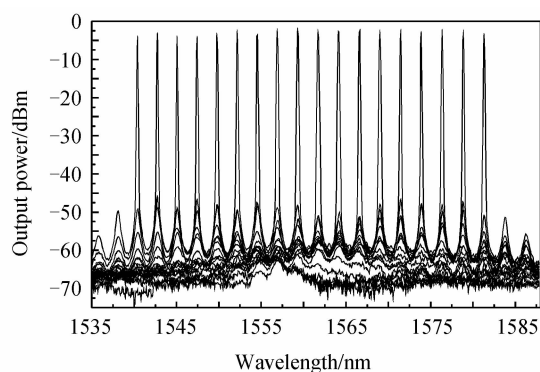


图 7 可调谐激光器的输出激光的谱

Fig. 7 Superimposed optical spectra of the tunable fiber laser

实验中让激光器在室温下连续工作 6 h,以观察其输出的稳定性. 结果表明,在 6 h 的时间里,每个输出波长几乎未发生漂移现象,而最大输出功率的波动也小于 0.6 dB,说明激光系统稳定性较好. 这主要是由于在本文所提出的 Sagnac 滤波器中,正反两个方向的信号经过的光纤是相同的,因此受外界环境影响较小的缘故. 如果将整个系统封装在一个盒子里,系统的稳定性将会更高.

### 3 结论

通过采用氢-氧焰对普通单模光纤局部加热的方法制备了热扩芯光纤. 利用该自制的热扩芯光纤制作了全光纤 M-Z 干涉滤波器. 将该 M-Z 干涉滤波器嵌入 Sagnac 干涉仪中,研制了一种新型的可调谐光纤滤波器. 利用该滤波器成功研制了一种宽带可调谐 C 波段掺铒光纤激光器. 实验结果表明:激光器的调谐范围超过 40 nm,边模抑制比超过 45 dB,激光输出谱的平坦度优于 2 dB,激光的 3 dB 线宽小于 0.1 nm. 该激光系统结构简单,易于制作,输出性能好,在光通信,光纤传感以及光纤器件测试等领域具有潜在的应用前景.

#### 参考文献

[1] LI Zhe, ZHAO Wei, ZHANG Wei, *et al.* Continuously tuning fiber lasers with wavelength of mode-locked pulses[J].

*Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1):1-4.  
李拮, 赵卫, 张伟, 等. 锁模脉冲波长连续可调谐光纤激光器[J]. 光子学报, 2009, **38**(1):1-4.  
[2] GUO Wei. Study on characteristics of acousto optical tunable erbium-doped fiber ring laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(7): 877-880.  
郭巍. 基于新型二级集成光学声光可调谐滤波器的环形腔掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2006, **33**(7):877-880.  
[3] GUO Xiong-yin, YANG Ling-zhen, HE Hu-chen, *et al.* Wavelength tunable mode-locked pulse fiber laser based on figure-of-eight cavity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2):212-215.  
郭雄鹰, 杨玲珍, 贺虎成, 等. 8 字形腔波长可调谐锁模脉冲光纤激光器[J]. 光子学报, 2008, **37**(2):212-215.  
[4] CHEN Zu-cong, RUAN Shuang-chen, GUO Chun-yu, *et al.* Passively mode-locked erbium doped fiber ring laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(3):267-270.  
陈祖聪, 阮双琛, 郭春雨, 等. 环形腔被动锁模掺铒光纤激光器[J]. 光子学报, 2012, **41**(3):267-270.  
[5] KIM Ryun-kyung, CHU Suho, HAN Young-Geun. Stable and widely tunable single-longitudinal-mode dual-wavelength erbium-doped fiber laser for optical beat frequency generation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(6): 521-523.  
[6] LIU Xue-ming, ZHOU Xiao-qun, TANG Xiu-feng, *et al.* Switchable and tunable multiwavelength erbium-doped fiber laser with fiber Bragg gratings and photonic crystal fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(8): 1626-1628.  
[7] LIU Xue-ming, GONG Yong-kang, WANG Lei-ran, *et al.* Identical dual-wavelength fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2007, **25**(9): 2706-2710.  
[8] FU Zhi-hui, YANG Ding-zhong, YE Wen. Widely tunable compact erbium-doped fiber ring laser for fiber-optic sensing applications [J]. *Optics and Laser Technology*, 2009, **41**(4): 392-396.  
[9] SELVAS R, TORRES-GOMEZ I, MARTINEZ-RIOS A, *et al.* Wavelength tuning of fiber lasers using multimode interference effects [J]. *Optics Express*, 2005, **13**(23): 9439-9445.  
[10] SHEU Fang-wen, CHIOU Chung-yao, YANG Shu-chun, *et al.* Performance of a wavelength-tunable erbium-doped fiber laser using a Sagnac interferometer [J]. *Optics Communications*, 2008, **281**(18): 4719-4722.  
[11] SUN Guo-yong, ZHOU Ying-wu, HU Yi-hui, *et al.* Switchable erbium-doped fiber ring laser based on Sagnac loop mirror incorporating few-mode high birefringence fiber[J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(6): 1608-1611.  
[12] YANG Wei, LIU Ying, XIAO Li-feng Xiao, *et al.* Wavelength-tunable erbium-doped fiber ring laser employing an acousto-optic filter [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, **28**(1): 118-122.  
[13] KIM Kwang-taek, LEE Kyu-hyo, SHIN Eun-soo, *et al.* Characteristics of side-polished thermally expanded core fiber and its application as a band-edge filter with a high cut-off property[J]. *Optics Communications*, 2006, **261**(1): 51-55.  
[14] LIU Ya-zhao, WANG Fu-juan, CAI Zhi-gang, *et al.* Fabrication of two kinds of expanded core lens-fibers and analysis of mode field diameter [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, **32**(10): 1377-1381.  
刘娅钊, 王福娟, 蔡志岗, 等. 两种扩束透镜光纤的研制与模场分析[J]. 中国激光, 2005, **32**(10):1377-1381.  
[15] WEI Tao, LAN Xin-wei, XIAO Hai. Fiber inline core-cladding-mode Mach-Zehnder interferometer fabricated by two-point CO<sub>2</sub> laser irradiations [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, **21**(10): 669-671.