

## 采用 F-P 光纤环滤波器的窄线宽环形腔光纤激光器

方秀丽,童峥嵘,曹 晔,杨秀峰

(天津理工大学 计算机与通信工程学院 薄膜电子与通信器件重点实验室,天津 300384)

**摘 要:**提出了一种采用 F-P 光纤环滤波器的窄线宽环形腔激光器,该激光器采用环形腔结构,两个耦合比为 30:70 的耦合器和一段 2 m 长的未泵浦掺铒光纤构成 F-P 光纤环滤波器,F-P 光纤环滤波器产生的梳状谱,可以增大激光模式之间的自由光谱范围(FSR),在一定程度上减小跳模现象的发生,有利于模式的稳定。研究表明,通过对掺铒光纤的优化和耦合器的选择可以提高 F-P 光纤环滤波器的精细度,而 F-P 光纤环中的未泵浦掺铒光纤起到饱和吸收体的作用,使输出激光的线宽得到有效压缩。将保偏光纤光栅和 F-P 光纤环滤波器共同应用于环形腔掺铒光纤激光器,在室温下得到了 3 dB 线宽均小于 0.07 nm(实验室光谱仪最小分辨率)的窄线宽双波长输出。在 2 h 的观测时间内,最大峰值功率波动小于 0.4 dB,具有良好的稳定性。

**关键字:** 光纤激光器; F-P 光纤环滤波器; 饱和吸收体; 窄线宽; 环形腔

**中图分类号:** TN248.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)02-0329-05

## Narrow linewidth ring cavity fiber laser using F-P fiber ring filter

Fang Xiuli, Tong Zhengrong, Cao Ye, Yang Xiufeng

(Key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices, School of Computer and Communication Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** A kind of narrow line-width fiber laser using F-P fiber ring filter was proposed and experimentally demonstrated, which has a ring cavity. A F-P fiber ring filter consisted of two optical couplers of 30:70 and a length of 2 m unpumped Erbium-doped fiber. The comb spectrum produced by F-P fiber ring filter can magnify the free spectral range of the laser mode, eliminate mode hopping and increase the stability of the mode in a certain extent. The research shows that the fineness of F-P fiber filter can be improved through the optimization of Erbium-doped fiber and the selection of couplers. Unpumped Erbium-doped in the F-P fiber ring acts as saturated absorber, which can compress the linewidth of output laser effectively. Polarization-maintaining fiber grating (PM-FBG) and F-P fiber ring filter are both applied into Erbium-doped laser, the output of narrow linewidth and dual-wavelength laser is obtained, and the 3 dB linewidth of dual-wavelength laser are both less than 0.07 nm(spectrometer minimum resolution). The fiber laser had a stable output whose maximal peak power fluctuation was less than 0.4 dB

收稿日期:2012-06-11; 修订日期:2012-07-08

基金项目:国家自然科学基金(61107052);天津市自然科学基金(11JCYBJC00100)

作者简介:方秀丽(1988-),女,硕士生,主要从事光通信方面的研究。Email:fxlsummer@163.com

导师简介:童峥嵘(1971-),女,教授,博士,主要从事光纤激光器和光传感技术等方面的研究。Email:zhrong@sohu.com

within observation time of 2h.

Key words: fiber laser; F-P fiber ring filter; saturated absorber; narrow linewidth; ring cavity

## 0 引言

与固体介质激光器相比, 光纤激光器具有增益高、散热好、吸收和辐射带宽大等特点, 其输出激光具有良好的方向性。目前光纤激光器的研究热点主要集中在两方面: 高功率和窄线宽。其中, 窄线宽<sup>[1]</sup>在光纤传感、激光雷达、激光通信、光电对抗等国家安全领域有着重大的应用潜力<sup>[2]</sup>。特别是作为光纤激光传感器, 它具有对电磁场的抗干扰、安全、体积小、可远程控制等特性。要实现窄线宽的光纤激光输出, 目前最常用的办法有: 直接在光纤芯写入 Bragg<sup>[3]</sup>光栅作为激光腔镜, 但激光器一般运转在随机多纵模状态并且模式不稳定。采用短腔法<sup>[4]</sup>可得到简单实用的激光器, 但因自身的缺点限制了其应用范围, 若要达到足够的纵模间隔, 腔长就必须缩到非常短, 只适用于增益线宽较窄的激光器。分布式 Bragg 反射 (DBR)<sup>[5]</sup>光纤激光器和分布反馈 (DFB)<sup>[6]</sup>光纤激光器具有谱线窄, 便于集成, 结构简单, 输出功率大的优点; 但 DBR 很难做到完全一样的两个光栅; DFB 激光器由于激光腔长有限, 输出功率过低。复合腔<sup>[7-9]</sup>法谐振腔结构灵活, 但稳定性差制约了其应用, 腔内光纤长度或折射率受环境影响发生改变等因素将造成激光器的长期不稳定性。2011年, Wei Fangfang 等人利用饱和吸收体设计了基于 F-P 高精度度环的线形腔光纤激光器得到了窄线宽输出<sup>[10]</sup>。在此基础上文中提出了一种采用 F-P 光纤环滤波器的窄线宽环形腔掺铒光纤激光器, 由两个 30:70 的耦合器和一段未泵浦的掺铒光纤组成 F-P 光纤环, 把整个 F-P 光纤环置于环形腔外, 减少泵浦源对 F-P 环中掺铒光纤的泵浦, 选用 PM-FBG 作为双波长选频器件。F-P 光纤环产生的梳状谱可以增大激光模式间的自由光谱范围 (FSR), 环中的未泵浦掺铒光纤作为饱和吸收体, 起到线宽压缩的作用。

## 1 实验结构和原理

实验结构如图 1 所示, 激光器采用环形腔结构, 5 m 长的掺铒光纤 (EDF1) 作为增益介质, 980 nm 的

激光二极管 (LD) 通过波分复用器 (WDM) 对其进行泵浦。隔离器 (ISO) 用来保证腔内信号光的单方向运转。偏振控制器 (PC) 调整腔内光的偏振状态, Coupler3 的 10% 端口输出到光谱仪 (OSA), 90% 端口接入到 F-P 光纤环, 保偏布拉格光栅进行波长选择。2 m 长的 EDF2 与两个耦合比为 30:70 的光耦合器连接成环构成 F-P 光纤环滤波器。

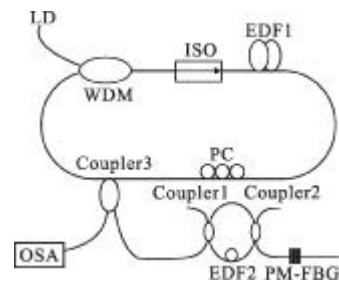


图 1 掺铒光纤激光器结构示意图

Fig.1 Experiment setup of EDF laser

图 2 为实验中用到的 PM-FBG 的透射谱, 中心波长分别为 1 545.25 nm 和 1 545.75 nm, 3 dB 带宽分别为 0.11 nm 和 0.1 nm。这种环形腔掺铒光纤激光器实现窄线宽的工作原理可简述如下: 由泵浦源注入的泵浦光经 WDM, 进入到 ISO 保证泵浦光的单方向

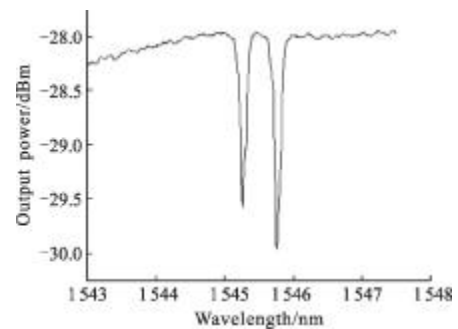


图 2 PM-FBG 的透射谱

Fig.2 Transmission spectra for PM-FBG

运转, 对 EDF1 进行抽运, 得到 1 550 nm 波段的光, 经 PC 调整后, 通过 coupler3 的 90% 端口进入 F-P 光纤环, 此时一部分光在 F-P 光纤环中环绕, 另一部分光进入到 PM-FBG 光栅, 经光栅选频后, 反射回 F-P 环中继续振荡, 在此过程中相向传输的光在未泵浦掺铒光纤中发生干涉, 产生驻波, 由于未泵浦掺

铟光纤的饱和吸收效应,在掺铟光纤内形成瞬态布拉格光栅,进行窄线宽滤波。然后再由 F-P 光纤环滤波器反馈回 Coupler3 进入到环形激光腔中经多次循环振荡形成谐振,产生的激光最终由 Coupler3 的 10%端口输出到 OSA 观测。F-P 光纤环与环形激光腔的共同作用,增大了激光模式间的 FSR,有利于模式选择和稳定。

实验中所设计的 F-P 光纤环滤波器结构如图 3 所示。由两个耦合比为 30:70 的耦合器和一段 2m 长的未泵浦的掺铟光纤(EDF2)组成,Coupler1 的 1、4 端口为直通,Coupler2 的 5、8 端口为直通。耦合器的 2、8 的端口与 EDF2 熔接在一起,形成一个 F-P 谐振腔。

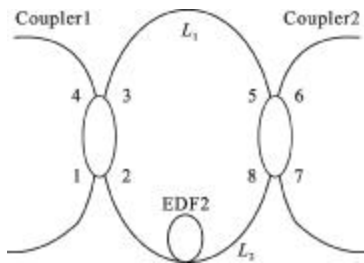


图 3 F-P 光纤环滤波器的结构图  
Fig.3 Schematic of F-P fiber ring filter

假设光信号由 Coupler1 的 1 端口输入,3 端口输出至环内,经过长度为  $L_1$  的光纤臂进入到 Coupler2 的 5 端口,再由 8 端口经过长度为  $L_2$  光纤臂(包括 EDF2 的长度)反馈回 Coupler1 的 2 端口,最后光在 7 端口输出。

为了更好地研究 F-P 光纤环滤波器的滤波特性,下面对 F-P 光纤环滤波器的传输函数进行分析。

设 1 端口的人射光场为  $E_1$ ,2 端口光场为  $E_2$ 。输出光场为  $E_3$ 、 $E_4$ ,对于 coupler2 来说,输入光场为  $E_5$ 、 $E_6$ ( $E_6=0$ ),输出光场为  $E_7$  和  $E_8$ 。根据耦合器的琼斯矩阵<sup>[1]</sup>变换得:

$$E_3 = i\sqrt{r} E_1 + \sqrt{1-r} E_2 \quad (1)$$

$$E_4 = \sqrt{1-r} E_1 + i\sqrt{r} E_2 \quad (2)$$

$$E_7 = i\sqrt{r} E_5 + \sqrt{1-r} E_6 \quad (3)$$

$$E_8 = \sqrt{1-r} E_5 + i\sqrt{r} E_6 \quad (4)$$

$$E_5 = e^{-j\omega\tau_1} E_3 \quad (5)$$

$$E_2 = (1-\alpha)e^{-j\omega\tau_2} E_8 \quad (6)$$

式中: $r$  为耦合器的耦合因子; $\alpha$  为光场经过掺铟光

纤所产生的损耗 ( $0 < \alpha < 1$ ); $\omega$  为角频率; $\tau_1$ 、 $\tau_2$  分别代表经过长度  $L_1$  和  $L_2$  的光纤时产生的时延, $\tau = \tau_1 + \tau_2$ ,代表总时延。

方程(1)~(6)联立,F-P 光纤环的传输函数  $T$  可以表示为:

$$T = \frac{|E_7|^2}{|E_1|^2} = \frac{r^2}{1 + (1-r)^2(1-\alpha)^2 - 2(1-r)(1-\alpha)\cos(\omega\tau)} \quad (7)$$

根据传输函数  $T$ ,对所设计 F-P 光纤环滤波器的传输特性进行仿真,在损耗  $\alpha=0.1$  时,F-P 光纤环的总长度  $L=3m$  时,耦合因子  $r=0.3$  即耦合比为 30:70 时,其传输谱仿真图如图 4 所示。

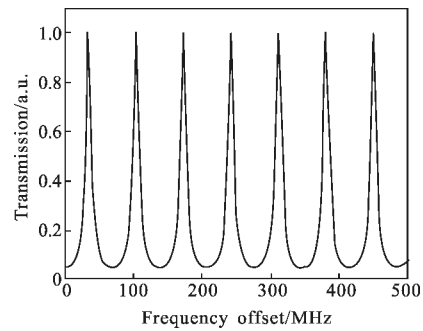


图 4 F-P 光纤环滤波器的传输谱  
Fig.4 Transmission spectra of F-P fiber ring filter

从精细度的角度来研究  $r$  值和  $\alpha$  值对 F-P 光纤环滤波器的影响,精细度是指相邻两条波纹之间的间隔与 1 个条波纹的频谱宽度之比,文中用  $F$  表示。

$$F = \frac{f_{FSR}}{\Delta f} = \frac{2\pi\sqrt{(1-r)(1-\alpha)}}{\sqrt{1+(1-r)^2(1-\alpha)^2-2(1-r)(1-\alpha)}} \quad (8)$$

式中: $f_{FSR} = \frac{1}{\tau}$ 。

图 5 为  $r$  和  $\alpha$  改变对 F-P 光纤环滤波器精细度的影响谱线。

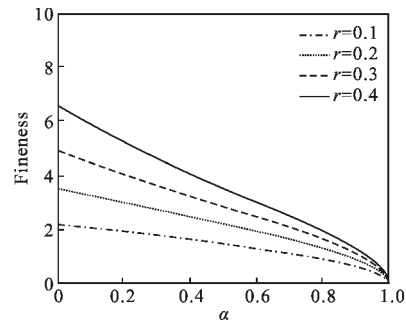
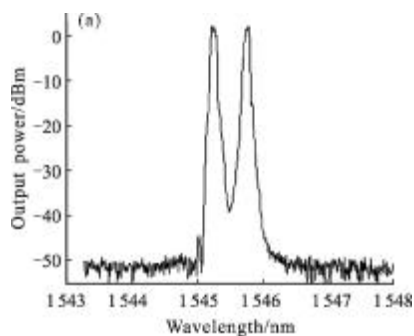


图 5 F-P 光纤环滤波器的精细度随  $r$  和  $\alpha$  的变化曲线  
Fig.5 Changing curve of fineness of F-P fiber ring filter vs the change of loss  $r$  and  $\alpha$

由图 5 可以看出,当耦合器的耦合比  $r$  固定时,随着损耗  $\alpha$  增大,F-P 光纤环滤波器的精细度降低,因此,在实验中可以通过控制掺铒光纤的参数来降低损耗,从而提高滤波器的精细度。当损耗  $\alpha$  固定时,耦合比  $r$  在 0.1 至 0.4 的范围内,取值越大,精细度越高。即可以通过对耦合器的选择来提高 F-P 光纤环滤波器的精细度。

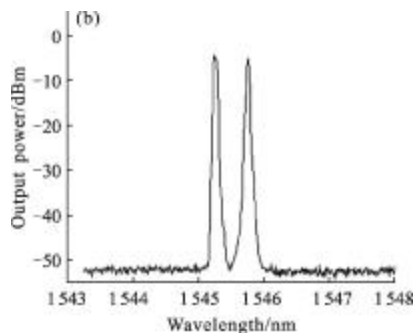
## 2 实验结果及分析

下面对 F-P 光纤环滤波器的实验特性进行研究,980 nm 泵浦源的功率调至 110 mW,固定偏振控制器,在光谱仪(实验中所用 Anritsu MS9710B)分辨率为 0.07 nm 时,通过光谱仪测量输出激光信号。图 6(a)为未加 F-P 光纤环滤波器时的激光器的输出光谱,其中心波长分别为 1545.25 nm 和 1545.75 nm,峰值功率分别为 1.972 dBm 和 1.806 dBm,对应的 3 dB 带宽为 0.11 nm 和 0.1 nm,与 PM-FBG 透射谱的线宽一致。图 6(b)为加上 F-P 光纤环滤波器后,输出光



(a) 加滤波器前

(a) Without the filter



(b) 加滤波器后

(b) With the filter

图 6 输出激光光谱图

Fig.6 Output of the laser of optical spectrometer

谱的中心波长位置未发生改变,峰值功率分别为 -4.408 dBm 和 -4.826 dBm,低于未加 F-P 环时的峰值功率,这是由于 F-P 环中的 EDF2 引起的损耗( $0 < \alpha < 1$ )所致,其 3 dB 带宽均小于 0.07 nm。

实验表明:F-P 光纤环滤波器的引入,抑制了不需要的纵模,实现了窄线宽输出,即 F-P 光纤环滤波器的确起到了限制激光器线宽的作用。

在室温下,对基于 F-P 光纤环滤波器的双波长环形腔激光器进行稳定性测试。实验中每 20 min 做一次记录。图 7 表示双波长峰值功率的波动示意图,方块表示  $\lambda=1545.25$  nm 处波长的峰值功率,三角形表示  $\lambda=1545.75$  nm 处波长的峰值功率。实验数据表明,在 120 min 的观测时间内,两波长的峰值功率波动均小于 0.4 dB,双波长输出具有很好的稳定性。

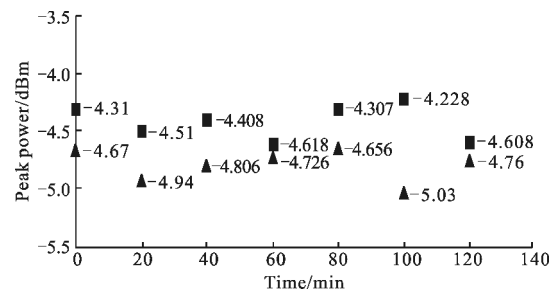


图 7 120 min 内双波长峰值功率波动图

Fig.7 Peak power fluctuation during 120 min

实验发现:未加入 F-P 光纤环滤波器时,泵浦功率为 7 mW 时激光器开始产生激光;加入 F-P 光纤环滤波器后,泵浦功率提高至 10 mW 时,才可以观测到稳定的激光输出,这是由于 F-P 光纤环滤波器中的 EDF2 产生的损耗引起的。随着泵浦增加,输出激光的功率将增加。

## 3 结论

提出了一种采用 F-P 光纤环滤波器的窄线宽环形腔掺铒光纤激光器。得到了稳定的窄线宽双波长输出。实验数据表明,加入 F-P 光纤环滤波器后,输出激光的线宽得到了明显压缩。所设计结构中的 F-P 光纤环滤波器在增大纵模间隔的同时,可以在一定程度上减少跳模现象的发生,有利于模式选择和模式稳定,环中的未泵浦掺铒光纤起到饱和吸收体的作用,进而压缩线宽。通过理论分析证实,当耦合比固定时, $\alpha$  在 0~1 之间的值越大,F-P 光纤环滤波

器的精细度越小;当损耗  $\alpha$  固定时,耦合比在 0.1~0.4 之间增大时,滤波器的精细度增加。因此,可以通过优化 F-P 光纤环滤波器中的 EDF2 和耦合比来提高滤波器的滤波性能。这种滤波器结构紧凑,具有良好的线宽压缩作用,因此,具有一定的实际应用意义。

#### 参考文献:

- [1] Qu Ronghui, Cai Haiwen. Narrow linewidth laser with high stability [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(6): 1033-1038. (in Chinese)  
瞿荣辉, 蔡海文. 高稳定度窄线宽激光器的研究[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(6): 1033-1038.
- [2] Lienhart F, Boussem S, Carraz O, et al. Compact and robust laser system for rubidium laser cooling based on the frequency doubling of a fiber bench at 1 560 nm [J]. *Appl Phys*, 2007, B89: 177-180.
- [3] Ball G A, Morey W W, Glenn W H. Standing-wave monomode erbium fiber laser [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1991, 3(7): 613-615.
- [4] Li L, Schulzgen A, Temyanko V L, et al. Ultracompact cladding-pumped 35-mm-short fiber laser with 4.7-W single-mode output power[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 88(16): 161106.
- [5] Zhang Z, Boyland A J, Sahu J K. High-power single-frequency thulium-doped fiber DBR laser at 1 943 nm [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2011, 23(7): 417-419.
- [6] Xue Lifang, Zhang Qian g, Li Fang. High-frequency modulation, high-power and narrow-linewidth distributed feedback fiber laser[J]. *Acta Phys Sin*, 2011, 60(1): 014213-1-014213-5. (in Chinese)  
薛力芳, 张强, 李芳. 高频调制大功率窄线宽分布反馈光纤激光器[J]. *物理学报*, 2011, 60(1): 014213-1-014213-5.
- [7] Wang Daliang, Wang Cuiyun, Xu Lianyu, et al. Fiber laser longitudinal mode selection using common resonant cavity [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 1044-1048. (in Chinese)  
王大量, 王翠云, 徐连宇, 等. 光纤激光器共腔法纵模选择技术[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(6): 1044-1048.
- [8] Li Yongliang, Jiang Huilin, Xing Yu, et al. Doubly resonant intra-cavity sum-frequency yellow-green laser at 554.8 nm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 869-872. (in Chinese)  
李永亮, 姜会林, 邢宇, 等. 复合腔和频 554.8 nm 黄-绿光激光器[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(5): 869-872.
- [9] Qiu Yishen, Lin Haifeng, Li Dengfeng. Multi-wavelength fiber laser using M-Z interferometer and composite cavity [J]. *Chinese J Laser*, 2004, 31(12): 1421-1424. (in Chinese)  
邱怡申, 林海峰, 李登峰. 利用 M-Z 干涉仪和复合腔共同选频的多波长光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2004, 31(12): 1421-1424.
- [10] Wei Fangfang, Yang Xiufeng, Tong Zhengrong, et al. Dual-wavelength narrow-linewidth fiber laser based on F-P fiber ring filter[J]. *Optik*, 2011, 123(11):1026-1029.
- [11] Agrawal Govind P. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics*[M]. Jia Dongfang, translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002.  
Agrawal Govind P. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 译. 北京: 电子工业出版社, 2002.