

文章编号: 0258-7025(2003)02-0163-04

# 双可调谐掺铒光纤环形腔滤波器的实验研究

俞本立<sup>1</sup>, 孙志培<sup>1</sup>, 钱景仁<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 安徽大学物理系, 安徽 合肥 230039; <sup>2</sup> 中国科技大学电子工程和信息科学系, 安徽 合肥 230027)

**摘要** 提出一种基于全光纤有源环形腔结构的双可调谐窄带滤波器。它能够充分利用腔中掺铒光纤放大器(EDFA)的宽带增益特性,有效可调谐滤波范围达到39nm,并改善了腔精细度对EDFA增益非平坦度的相关性。通过改变抽运功率,可方便地对其精细度进行调谐,从而实现全光纤结构滤波器的滤波波长和精细度的双可调谐。

**关键词** 光电子学;可调谐有源滤波器;光纤环形腔;精细度

**中图分类号** TN 713+.8 **文献标识码** A

## Experimental Research on Dual-tunable Er<sup>3+</sup>-doped Optical Fiber Ring Resonator Filter

YU Ben-li<sup>1</sup>, SUN Zhi-pei<sup>1</sup>, QIAN Jing-ren<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Anhui University, Hefei, Anhui 230039, China

<sup>2</sup>Department of EEIS, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China

**Abstract** In this paper, a kind of dual-tunable narrow bandpass filter is proposed based on the structure of all optical active fiber ring resonator. The tunable bandpass filter's wavelength tuning range is 39 nm, from 1526 nm to 1565 nm. By changing the power of pump LD, its finesse can also be tuned.

**Key words** optoelectronics; tunable active optical filter; optical fiber resonator; finesse

### 1 引言

在密集波分复用(DWDM)技术快速发展的今天,迫切需要一类性能优异的可调谐窄带滤波器<sup>[1]</sup>。这种可调谐的窄带滤波器应该具有:可调谐滤波波长范围宽、插入损耗小、精细度高且可调谐等优点。另外在高精度光谱分析以及各类光传感系统中,也非常需要此类可调谐窄带滤波器<sup>[2,3]</sup>。

由于光纤环形腔滤波器具有易于制作以及便于与其他光纤器件耦合等特点,倍受国内外学者的青睐。它可分为无源环形腔滤波器和有源环形腔滤波器两种。C. Y. Yue等做出了高精度无源光纤环形腔滤波器,其精细度高达1260<sup>[4]</sup>;H. Okamura等首次提出利用掺铒光纤放大器(EDFA)来补偿腔内损耗,可以获得高精度的有源环形腔滤波器<sup>[5]</sup>;

K. Kalli等首次将环形腔滤波器用于激光线宽的光谱测量中<sup>[6]</sup>。Y. H. Chew等的理论研究表明可以通过改变输入和输出耦合器耦合系数的方法来获得一种精细度可调的环形腔滤波器<sup>[7]</sup>。作者等在有源环形腔滤波器各类参数的优化工作上做了一定的理论和实验研究<sup>[8]</sup>。John M. Choi等提出基于光纤环形腔滤波器的新应用,波长可选择的全光开关、调制器、放大器以及振荡器<sup>[9]</sup>。

本文基于掺铒光纤环形腔结构,通过在腔中加入可调谐介质薄膜滤波器来选择滤波波长,并通过调节抽运功率来改变腔精细度,以实现一种滤波波长以及精细度双可调谐的全光纤结构窄带滤波器。这种滤波器的可调谐滤波波长范围达到39 nm(1526~1565 nm)。与腔内没有置入可调谐介质薄膜滤波器的掺铒光纤环形腔滤波器相比,该滤波器

收稿日期:2001-10-08;收到修改稿日期:2002-01-21

基金项目:教育部科学技术研究重点项目(项目号:01053)和安徽省“十五”科技攻关(皖科计字[2001]106号)资助项目。

作者简介:俞本立(1963—),男,安徽大学物理系副教授,博士,主要从事光纤有源/无源器件、光传感器的研究。E-mail: benliyu@mars.ahu.edu.cn

的有效可调谐滤波波长范围扩展了 13 倍,充分利用了腔中 EDFA 的宽带增益特性。且在可调谐滤波波长范围内精细度与输入激光波长无关性得到较好的改善,其精细度在可调谐滤波波长范围内均可达到 110 以上。

## 2 理论分析和实验原理

一般形式的掺铒光纤环形腔结构如图 1 所示,

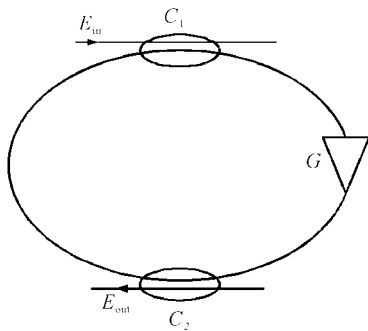


图 1 一般形式掺铒光纤环形腔结构示意图

$C_1$ : 输入耦合器;  $C_2$ : 输出耦合器

Fig. 1 Schematic setup of active fiber resonator

$C_1$ : input coupler;  $C_2$ : output coupler

由输入、输出光纤耦合器和 EDFA 组成。设  $\kappa_1, \kappa_2$  和  $\gamma_1, \gamma_2$  分别为  $C_1$  和  $C_2$  的耦合系数和插入损耗;  $\eta_1, \eta_2$  分别为  $C_1$  到  $C_2$  段和  $C_2$  到  $C_1$  段其他光学元件的插入损耗和熔接点的损耗之和,  $\alpha$  对应光纤的衰减系数;  $L$  为环形腔的腔长, 并令  $C_1$  两边的光纤长度相等; 设

$\sqrt{1-\gamma} = e^{-\alpha L} \sqrt{(1-\eta_1)(1-\eta_2)(1-\gamma_1)(1-\gamma_2)}$   
 $\gamma$  为总插损; 令  $A = \sqrt{(1-\kappa_1)(1-\kappa_2)(1-\gamma)}$ ; 假设输入激光线型为 Lorentzian 线型, 其相位随机变化为平稳高斯随机过程, 则有掺铒光纤环形腔的精细度表达式<sup>[5,8]</sup>

$$F = \frac{\text{FSR}}{\Delta\nu_R} = \frac{\pi}{(\omega_0 \tau_0)_{IM}} = \frac{\pi}{\arccos\left(\frac{2A\sqrt{G}}{1+A^2G}\right)} \quad (1)$$

其中腔的自由谱宽  $\text{FSR} = c/nL$ 。  $\Delta\nu_R$  为光纤环形腔的特征线宽, 其与精细度一样均反映了光纤环形腔的滤波特性。实际中, 当输入激光的线宽大于环形腔特征线宽时, 环形腔的输出线宽便与特征线宽  $\Delta\nu_R$  相等。所以可以通过测量宽线宽激光输入时环形腔滤波器输出激光的线宽, 利用公式(1) 来计算掺铒光纤环形腔的精细度。由公式(1) 可知, 当调节抽运功率的大小, EDFA 增益  $G$  将随之改变, 从而腔精细

度也将随之改变<sup>[8]</sup>, 所以可以通过调节抽运功率来改变腔精细度。

众所周知, EDFA 具有增益非平坦性, 所以当输入激光波长不在 EDFA 增益带宽的最佳增益范围内时, 腔内无波长选择机制的掺铒光纤环形腔滤波器极易在 EDFA 最大增益波长处产生寄生激光, 因而只具有非常低的精细度; 当输入激光波长在 EDFA 增益带宽的最佳增益范围内时, 由于 EDFA 的增益非平坦性, 不同波长输入激光在腔中所获增益  $G$  将有所不同, 另外又因为腔内各种光学元件对于不同波长激光具有不同的插入损耗, 所以由式(1) 可知当掺铒光纤环形腔中无波长选择机制时, 腔的精细度与被滤波波长之间具有较大的相关性。

由以上分析可知当掺铒光纤环形腔中没有波长选择机制时, 其有效滤波波长范围比较窄, 并没有充分利用腔内 EDFA 的宽带增益特性。为此, 提出在腔中加入可调谐介质薄膜滤波器这一波长选择器件来选择滤波波长, 充分利用 EDFA 宽带增益特性来补偿腔内损耗; 实现掺铒光纤环形腔有源滤波器滤波波长宽可调谐的目的。

## 3 实验装置

图 2 为双可调谐掺铒光纤环形腔窄带滤波器的结构示意图。图中所示可调谐带通滤波器即为在腔中所加的波长选择器件。所选产品为 TBF-1550-1.0 型可调谐介质薄膜滤波器, 其标准指标为: 典型插入损耗为 1.5 dB, 滤波 -20 dB 带宽典型值为 3 nm, 滤波波长可调谐范围为 1535~1565 nm。实际实验中发现这种可调谐介质薄膜滤波器在给定标准指标之外的 1525~1535 nm 范围内依然具有较好

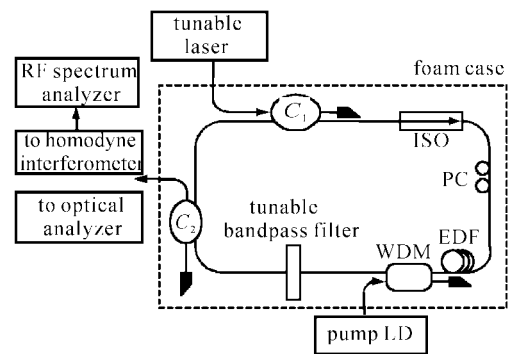


图 2 双可调谐掺铒光纤环形腔窄带滤波器结构示意图

Fig. 2 Experimental setup for tunable  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber ring resonator filter

的滤波特性。当不置入可调谐介质薄膜滤波器时,腔 FSR 为 11.79 MHz;置入可调谐介质薄膜滤波器之后,腔 FSR 为 10.47 MHz。WDM 为 980 nm/1550 nm 波分复用器。其中光纤环形腔中增益介质为腔内连接在 WDM 后的掺铒光纤(EDF),为 Lucent 产品的 HG980 有源光纤,长度为 5 m。抽运光源为 980 nm 光纤光栅稳频半导体激光器。由抽运 LD 和 EDF 构成了腔内 EDFA,用以补偿在腔中置入的多种光学元件所带来的插入损耗。EDFA 对输入激光信号的增益由抽运 LD 的输出功率来控制。偏振控制器(PC)用来控制腔内偏振态,以抑制偏振对腔滤波特性的影响。光学隔离器(ISO)用来消除受激布里渊反向散射和逆向激光对腔精细度的影响。 $C_1$  和  $C_2$  分别为输入和输出光纤耦合器。其耦合系数  $\kappa_1, \kappa_2$  分别为 0.06, 0.01。插入损耗  $\gamma_1, \gamma_2$  分别为 0.06, 0.08。实验中所用输入激光光源为安捷伦 Agilent8164A 型可调谐半导体激光器,其输出线宽大约为 200 kHz。当改变激光器输出激光波长时,该激光器输出线宽均大于掺铒光纤环形腔的本征线宽。整个实验过程中,可调谐激光器的输出功率不变,为  $50 \mu\text{W}$ ,而只改变其输出波长来作为可调谐掺铒光纤环形腔窄带滤波器的输入激光信号。为减小温度等环境因素的干扰,整个实验装置均放置在泡沫塑料盒中。

实验中光谱的测量用 HP71451B 光谱分析仪。掺铒光纤环形腔滤波器输出线宽的测量采用零拍法<sup>[10,11]</sup>,所用光纤延迟线的长度为 7 km。光电接收器为 PFTM-911 型,其接收频宽为 7 MHz。所用频谱分析仪为 AV4021 型,最小分辨率带宽为 1 Hz,测量范围为 2 Hz~2 GHz。

## 4 实验结果和分析

图 3 所示为掺铒光纤环形腔滤波器腔内无波长选择机制时,腔精细度对于不同波长输入激光的变化关系。当输入激光波长大于 1534 nm 或小于 1528 nm 时,该掺铒光纤环形腔对此波长范围内输入激光几乎没有任何滤波作用。图 4 为腔内无波长选择机制时掺铒光纤环形腔输出荧光谱。此时腔内无波长选择机制的掺铒光纤环形腔结构以及实验装置如图 2 所示,只是腔中无可调谐带通滤波器。从图 3 可知此掺铒环形腔的有效滤波范围只有 1530~1533 nm 之间 3 nm 的宽度,所以当腔中无波长选择机制时掺铒光纤环形腔滤波器并没有充分利用腔

中 EDFA 的宽带增益特性。结合图 3 和图 4 可知,当腔中无波长选择机制时掺铒光纤环形腔由于腔内 EDFA 增益的非平坦性,其精细度与波长有较大的相关性;且此有源光纤环形腔精细度对于输入波长的依赖关系与该腔输出荧光谱有着较强的相关性。另外由式(1)可知精细度并非仅由 EDFA 产生的增益  $G$  来决定,而由  $G$  和腔内参数  $A$  共同决定,所以腔内无波长选择机制时,最大精细度点并非于腔输出荧光谱中最大光谱功率密度 1530.29 nm 处,而是在极易产生寄生激光的 1531.46 nm 附近。

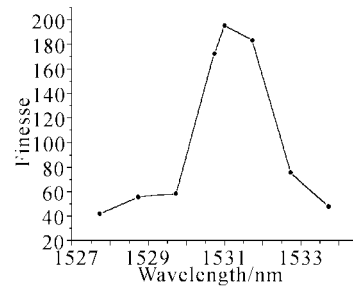


图 3 腔中无可调谐滤波器时对应不同波长输入腔精细度的变化关系

Fig. 3 Finesse of ring resonator without a tunable filter in the cavity against different input wavelength

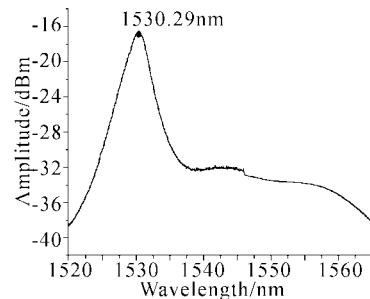


图 4 腔中无可调谐滤波器时的输出荧光谱

Fig. 4 Output superfluorescent spectrum of ring resonator which just below the lasing threshold without a tunable filter in the cavity

对应于不同波长输入激光,可调谐掺铒光纤环形腔滤波器的最佳精细度如图 5 所示。表明该双可调谐掺铒光纤环形腔滤波器的可调谐有效滤波波长范围为由 1526 nm 到 1565 nm 的 39 nm。在实验中,利用这种宽可调谐滤波波长掺铒光纤环形腔窄带滤波器对不同波长输入激光进行滤波,先将腔内可调谐介质薄膜滤波器的带通波长调至与输入激光波长相同,然后调节抽运功率使腔恰好工作在最佳精细度状态。

比较图 3 与图 5 可知,当腔中加入可调谐介质

薄膜滤波器时:1) 有效可调谐滤波波长范围由 3 nm 宽度扩展到 39 nm,此波长范围正好涵括实际光通讯应用中所有的 C-波段,也恰好充分利用了 EDFA 增益的宽带特性;2) 该双可调谐掺铒光纤环形腔窄带滤波器精细度与输入激光波长之间的相关性减弱;3) 实验中在可调谐滤波波长范围内任一波长的最佳精细度均可达到 110 以上。

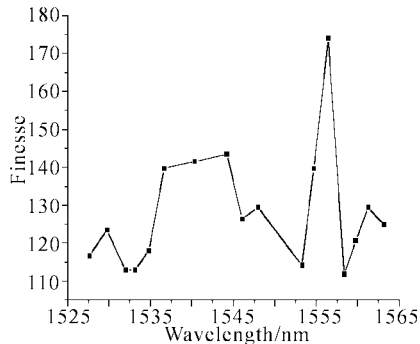


图 5 双可调谐掺铒光纤环形腔滤波器对应不同波长输入时,腔精细度的变化关系

Fig. 5 Finesse of ring resonator with a tunable filter in the cavity against different input wavelength

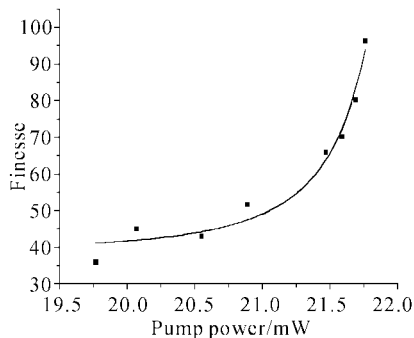


图 6 输入激光为 1551 nm 时,不同抽运功率下双可调谐掺铒光纤环形腔滤波器的精细度变化情况(阈值 = 22.5 mW)

Fig. 6 Finesse with a tunable filter in the cavity against pumping power when input wavelength is 1551 nm

当此种双可调谐掺铒光纤环形腔滤波器工作在阈值以下时,不改变输入激光的波长及功率而仅增大掺铒光纤环形腔的抽运功率,腔内 EDFA 对输入激光的放大倍数也将随之增大,由式(1)可知腔精细度  $F$  也将随之变大。图 6 所示为波长选在 1551 nm 时,该滤波器在阈值以下的腔的精细度与抽运功率之间的关系。显然图 6 中精细度变化关系与理论分析相符<sup>[8]</sup>。由图 6 可知,这种滤波器精细度的调谐是可以通过改变抽运功率来实现的。当输入激光波长以及功率不变时,增大掺铒光纤环形腔的抽运功

率到使腔工作在临界态时,腔精细度将随之调到最佳精细度;随着抽运功率的进一步增大,掺铒光纤环形腔将由于受环境的扰动、抽运功率精细调节的限制以及腔长的未锁定等原因而易进入注入锁定激光器状态,从而不能获得更高的精细度;当环形腔工作在阈值以上时,有源环形腔将失去滤波特性,不再是滤波器,成为注入锁定光纤环形腔激光器<sup>[12]</sup>。

## 参 考 文 献

- 1 C. S. Li, Franklin Fuk-Kay Tong, Karen Liu *et al.*. Channel capacity optimization of chirp-limited dense WDM/WDMA systems using OOK/FSK modulation and optical filters [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(8):1148~1161
- 2 G. J. Foschini, L. J. Greenstein. Spectral efficiency of optical FDM systems impaired by phase noise [J]. *IEEE Trans. Comm.*, 1993, **41**(1):125~131
- 3 R. C. Steele, G. R. Walker. 622 Mbit/s AMI FSK optical transmission experiment using a semiconductor optical preamplifier and a Fabry-Perot etalon demodulator [J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(8):539~541
- 4 C. Y. Yue, J. D. Peng, Y. B. Liao *et al.*. Fibre ring resonator with finesse of 1260 [J]. *Electron. Lett.*, 1988, **24**(10):622~623
- 5 H. Okamura, K. Iwatsuki. A finesse-enhanced Er-doped-fiber ring resonator [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(11):1554~1560
- 6 K. Kalli, D. A. Jeckson. Ring resonator optical spectrum analyzer with 20-kHz resolution [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(15):1090~1092
- 7 Y. H. Chew, Tjeng Thjiang, F. V. Chrys Mendis. An optical filter of adjustable finesse using an amplified fiber ring resonator [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(2):364~370
- 8 Yu Benli, Qian Jingren, Lou Jiatong *et al.*. Optimization of active optical fiber ring resonator filter [J]. *Chinese J. Quantum Electronics* (量子电子学报), 2001, **18**(2):114~119 (in Chinese)
- 9 John M. Choi, Reginald K. Lee, Amnon Yariv. Control of critical coupling in a ring resonator-fiber configuration; application to wavelength-selective switching, modulation, amplification, and oscillation [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(16):1236~1238
- 10 T. Okoshi, K. Kikuchi, A. Nakayama. Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum [J]. *Electron. Lett.*, 1980, **16**(16):630~631
- 11 Yu Benli, Qian Jingren, Yang Yinghai *et al.*. Homodyne method for measuring narrow linewidth laser [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(4):351~354 (in Chinese)
- 12 Yu Benli, Qian Jingren, Luo Jiatong *et al.*. Injection locking fiber ring resonator laser [J]. *Chinese J. Quantum Electronics* (量子电子学报), 2001, **18**(6):525~529 (in Chinese)