

文章编号: 0253-2239(2008)03-0507-05

# 稳定可调谐的单纵模多环形腔掺铒光纤激光器

张艳 陈伟 任民 鞠昱 韩威 张邦宏 张雅丽 谢亮 祝宁华

(中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要** 提出了一种多环形腔(MRC)结构的稳定可调的单纵模(SLM)掺铒光纤激光器,多环形腔结构由双环形有源腔和两个次级无源腔组成。这种激光器是利用光纤法布里-珀罗可调滤波器(FFP-TF)以及光学光栅滤波器(OGF)两种滤波器和多环形腔结构相结合来共同选模。可实现波长调节范围为1528~1565 nm,在整个波长调节范围内边模抑制比大于44.53 dB,在1554 nm附近边模抑制比可以达到最大值51.18 dB,输出功率为-8.84 dBm,通过应用多环型腔结构,激光器的输出很稳定,在18 min的观察时间内,中心波长的变化小于0.02 nm,输出功率的变化小于0.04 dBm,实现了稳定且可调谐的单纵模输出。

**关键词** 激光器; 掺铒光纤激光器; 单纵模; 调谐; 多环形腔

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A

## Stable, Tunable Single-Longitudinal-Mode Erbium-Doped Fiber Laser with Multiple Ring Cavities

Zhang Yan Chen Wei Ren Min Ju Yu Han Wei Zhang Banghong Zhang Yali  
Xie Liang Zhu Ninghua

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract** A stable, tunable single-longitudinal-mode erbium-doped fiber laser (EDFL) with multiple ring cavities (MRC) has been proposed. The MRC consists of two active ring-cavities and two passive subring cavities. The fiber Fabry-Pérot tunable filter and optical grating filter are combined with MRC for mode selection. The output wavelength is tunable from 1528 to 1565 nm over the wide tuning range, the side-mode suppression ratio (SMSR) is beyond 44.53 dB, the maximum SMSR value is up to 51.18 dB around 1554 nm, and the output power is -8.84 dBm in the operating range. With the MRC configuration, the ring laser output is stable, the central wavelength variation is below 0.02 nm and the output power fluctuation is less than 0.04 dBm in 18 min, a wavelength-tunable EDFL with stabilized single-longitudinal mode is achieved.

**Key words** lasers; erbium-doped fiber laser; single longitudinal mode; tuning; multiple ring cavities

## 1 引 言

无论是光波分复用还是光时分复用系统,光源技术都是核心技术之一,掺铒光纤环形腔激光器(EDFRL)由于其结构简单、调谐范围宽、输出线宽窄、激射波长可精度预定等优点而被广泛应用到光纤通信和光纤传感等领域<sup>[1~5]</sup>,成为当今研究的热点。

许多实际应用需要强度稳定且连续可调的单纵模光源,通常利用光纤法布里-珀罗可调滤波器(FFP-TF)来实现光纤环形腔激光器输出波长的调节;但是由于掺铒光纤环形腔激光器的腔长一般都达到几十米的长度,而纵模间隔与腔长成反比,导致纵模间隔很窄,在铒离子的增益范围内纵模数很多,

收稿日期: 2007-08-07; 收到修改稿日期: 2007-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(60510173,60536010,605060067)资助课题。

作者简介: 张艳(1983-),女,江苏徐州人,硕士研究生,主要从事光纤激光器方面的研究。

E-mail: zhyan05@semi.ac.cn

导师简介: 祝宁华(1959-),男,贵州人,研究员,博士生导师,主要从事微波光电子器件的封装与测试等方面的研究。

E-mail: nhzhu@semi.ac.cn

容易形成模式跳变,不利于单纵模的输出(也不利于激光器线宽的压窄),同时由于光学滤波器的带宽比激光器的纵模间隔大几个数量级,导致腔内符合纵模条件的纵模数很多,即使只有单纵模形成振荡,其他相邻纵模也能在腔内循环,形成放大自发辐射光,会形成较强的拍频噪声<sup>[6]</sup>。近几年来为实现光纤激光器输出单纵模并改善其稳定性及拍频噪声,报道的研究结果主要有:Chien-Hung Yeh 等<sup>[5]</sup>采用双环结构结合两个法布里-珀罗可调滤波器<sup>[7]</sup>,此方案结构简单,能输出单纵模,但实际操作中因法布里-珀罗滤波器滤出波长与外加电压不能很好的对应故要使两滤波器调至相近或相同波长并保证波长不漂移有一定难度,操作困难;F. Lie'geois 等<sup>[8]</sup>提出结合窄线宽光纤布拉格光栅与若干马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)模式滤波器的方法来获得单纵模输出<sup>[6]</sup>,此方案结构复杂且要精确调节每个马赫-曾德尔滤波器的两臂长差,还有可能引入过多的损耗;利用一段未抽运掺铒光纤作为饱和吸收体<sup>[9,10]</sup>,其形成的瞬态自写入光纤光栅具有窄带滤波特性,可保证获得稳定的单纵模输出。

本文提出并实验验证了一种利用光纤法布里-珀罗可调滤波器以及光学光栅滤波器(OGF)两种滤波器和多环形腔(MRC)结构相结合来共同选模的掺铒光纤激光器。这种结构的激光器可以输出性能很好的单纵模激光,同时我们还对激光器的输出功率,波长调节范围,边模抑制比(SMSR)以及输出光的稳定性进行了实验研究。

## 2 实验装置与原理

多环形腔掺铒光纤激光器系统的实验装置图如图 1 所示。系统中主要包括 980 nm 抽运的掺铒光纤放大器(EDFA),掺铒光纤放大器是由 980 nm 的抽运激光器,隔离器和一个 980 nm/1550 nm 波分复用(WDM)耦合器组成,内置隔离器(ISO)保证了腔内模式的单向振荡并避免了空间烧孔现象的产生;三个 2×2(3 dB)光学耦合器(C<sub>1</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>),一个 1×2(3 dB)光学耦合器(C<sub>2</sub>),其中 C<sub>3</sub> 和 C<sub>4</sub> 各接一段长度不相同的单纵模光纤构成次级环形腔(RC<sub>1</sub>, RC<sub>2</sub>),和双有源环结构一起可作为模式间隔的控制;一个光学光栅滤波器和一个光纤法布里-珀罗可调滤波器,用以确定激光器的激射波长;偏振控制器(PC)用以调整腔内光的偏振态并稳定激光器的输出。

其中光纤法布里-珀罗可调滤波器的 3 dB 带宽为

2.99 GHz,光学光栅滤波器的 3 dB 带宽为 30 GHz,光学光栅滤波器的波长调节范围为 110 nm。正确调节加在两滤波器上的电压,可实现波长的调谐;为保证单纵模输出,应把多环型结构中的两滤波器的滤出波长调至相同或相近。另外,使用分辨力为 0.01 nm 的 ADVANTEST 公司生产的 Q8384 型光谱分析仪来测量激光器的输出光的波长、调谐范围、功率以及光的稳定性;使用 ADVANTEST 公司生产的 R3182 型射频频谱分析仪,用延迟自外差法来测试激光器的单频特性。

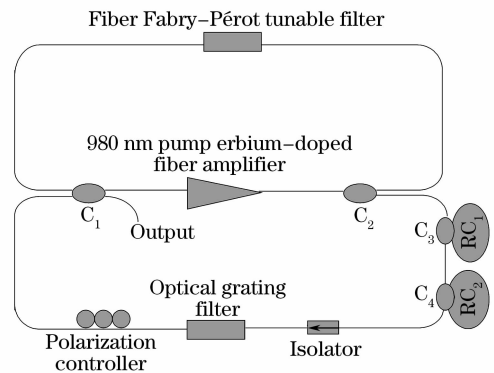


图 1 单纵模多环形腔掺铒光纤激光器实验结构示意图  
Fig. 1 Experimental setup of the single-longitudinal-mode multiple-ring-cavity erbium-doped fiber laser

多环形腔掺铒光纤激光器的单纵模选择是通过两滤波器和多环形腔相结合来实现的。多环形腔相当于一个模式过滤器件,先考虑系统中只有一个主环形腔和一个次级环形腔的情形,根据光纤环型腔激光器的基本原理<sup>[11]</sup>,能够在腔内存在的模式必须同时满足下列相位条件:

$$\beta L_m = 2m\pi, \quad \beta L_s = (2n+1)\pi, \quad (1)$$

式中  $\beta$  表示传输常量,  $L_m, L_s$  分别表示主、次环形腔的腔长,而每个腔的自由光谱范围(FSR)即模式间隔为

$$R_{FSm} = \frac{c}{n_e L_m}, \quad R_{FSs} = \frac{c}{n_e L_s}, \quad (2)$$

式中  $c$  为真空中光速,  $n_e$  为光纤回路的有效折射率,取值为 1.468,  $R_{FSm}, R_{FSs}$  分别表示主、次级环形腔自由光谱范围。即自由光谱范围与光纤长度成反比,故根据游标效应<sup>[10]</sup>,最终得到的存在腔内的模式间隔即有效自由光谱范围  $R_{FS_e}$  为各个腔模式间隔的最小公倍数:

$$R_{FS_e} = 2mR_{FSm} = (2n+1)R_{FSs}. \quad (3)$$

腔内存在的那些模式中只有与两滤波器的中心频率相吻合的模式才能够在腔内振荡。如图 2 所示,当腔内只存在主、次级环形腔中的一个时,可以

同时被两滤波器滤出的模式不止一个,而同时加了主、次级环形腔后,有效自由光谱范围增加了,能同时被两滤波器滤出的模式很少甚至只有一个。

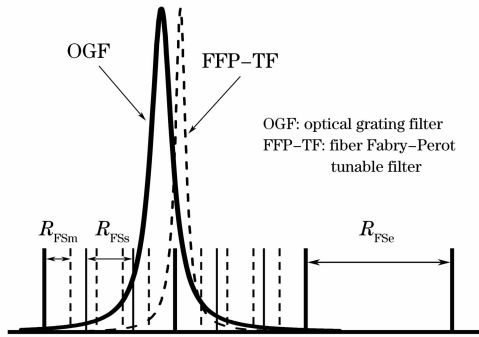


图 2 多环形腔模式选择原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of mode selection in the multiple-ring cavity (MRC)

本结构中存在着两个主环形腔,两个次级环形腔,故模式抑制作用更加显著。

### 3 实验结果与分析

实验中,选择上下环形腔的长度为 18 m 和 20 m,对应的模式间隔为 11.4 MHz 和 10.2 MHz,两个次级环形腔的长度分别为 4.7 m 和 3.0 m,对应的模式间隔为 43.5 MHz 和 68.1 MHz。根据以上讨论可知,此结构可以得到高达几十甚至上百 GHz 的有效自由光谱范围。

当调节加在两滤波器上的外加电压,就可以对应得到波长 1528~1565 nm 的调谐范围。在两个有源环中之所以不用两个光纤法布里-珀罗可调滤波器,而是选择一个光纤法布里-珀罗可调滤波器和一个光学光栅滤波器,主要是由于光纤法布里-珀罗可调滤波器的电压和通过波长没有很好的对应关系,会随着时间的漂移,要想使得两滤波器的通过波长调到相同或相近很困难,故选择用光学光栅滤波器来代替光纤法布里-珀罗可调滤波器,因为光学光栅滤波器的通过波长不会随时间漂移。同时,从含有光学光栅滤波器的有源环中分出 5% 作为光纤法布里-珀罗可调滤波器的反馈,使得光纤法布里-珀罗可调滤波器的滤出波长可以随着光学光栅滤波器滤出波长变化而变化,使得操作简单易行。

当波长从 1528 nm 变化到 1565 nm 的过程中观察输出功率和边模抑制比的变化可以得到如图 3 所示结果,其中在 1554 nm 附近得到最大输出功率 -6.18 dBm,在整个波长调节范围内,输出功率始终大于 -8.84 dBm,控制掺铒光纤放大器的抽运功

率使得系统的输出功率控制在很低的范围内是为了保障光纤法布里-珀罗可调滤波器能够在环路中正常工作,避免通过光纤法布里-珀罗可调滤波器的功率过大,使仪器烧毁。同时,在整个波长调节范围内边模抑制比大于 44.53 dB,在 1554 nm 附近边模抑制比可以达到最大值 51.18 dB,系统的边模抑制比可以保持一个很高的值主要是由于游标效应<sup>[12]</sup>,在双有源环基础上加了两个次级无源环使得系统内模式间隔变大,使得在两滤波器的共同带宽内只有很少甚至只有一个模式可以通过滤波器在系统内循环,放大自发辐射光得到抑制,边模抑制比的最大值出现在 1554 nm 波长附近。

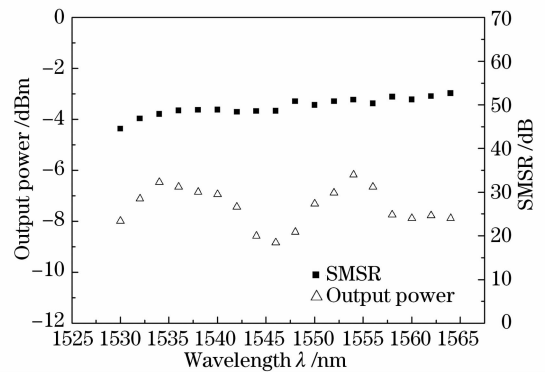


图 3 波长调节范围内系统输出功率和边模抑制比的变化

Fig. 3 Output power and side-mode suppression ration (SMSR) over the wavelength tuning range

为了观察该系统输出光源的功率和波长稳定性,设定系统的起始波长为 1549.6 nm,总的观察时间为 18 min,可得到如图 4 所示结果,多环形腔结构输出功率波动小于 0.04 dB,波长变化小于 0.02 nm。说明系统有很好的输出稳定性。

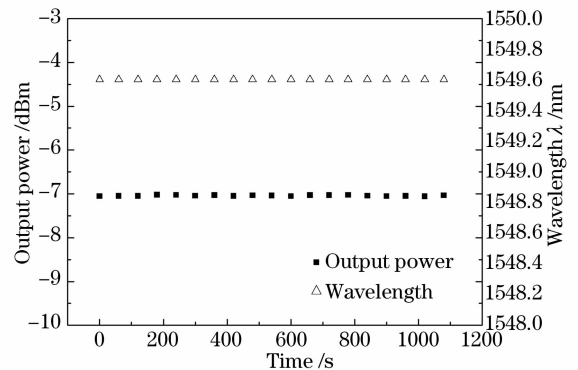


图 4 当波长为 1549.6 nm 时输出功率和波长随时间的变化

Fig. 4 Output power and wavelength versus time at wavelength of 1549.6 nm

给出其中一个光谱图,如图 5 所示,其输出功率为 -7.609 dBm,中心波长为 1549.622 nm。

为了验证系统输出的单频特性,利用延迟零拍测量法<sup>[13]</sup>使输出光通过光探测器在 ADVANTEST 公司生产的 R3182 型射频频谱分析仪上测量,并与

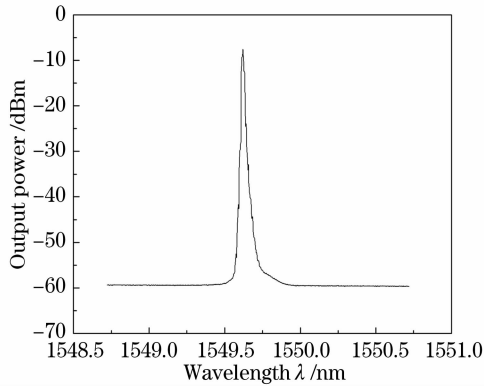


图 5 系统的输出光谱

Fig. 5 Optical output spectrum of this system

仅有单有源环、双有源环而无次级环结构时的单频特性作比较,如图 6 所示。图 6(a)表示只有单有源环结构的零拍谱线图,可以看到此时激光器运转在多纵模状态,主要是由于单环结构的模式间隔比较小,模式密集,光纤法布里-珀罗可调滤波器滤波器的带宽范围内可以通过很多模式在腔内循环,其中一部分形成激射,一部分形成放大自发辐射光,故产生很强的拍噪声。图 6(b)表示了双有源环结构的瞬态拍频谱线,其中只有两个模式拍频。此时激光器的结构使输出得到了很大的改善,纵模数目减少很多,所以差拍噪声得到了很好的抑制,但仍然存在少数拍噪声谱。图 6(c)表示了双有源环基础上再加入两个次级无源环,适当调节偏振控制器,使振荡模式在各个次级环形腔和有源腔中的偏振态匹配,差拍噪声几乎得到了完全抑制。

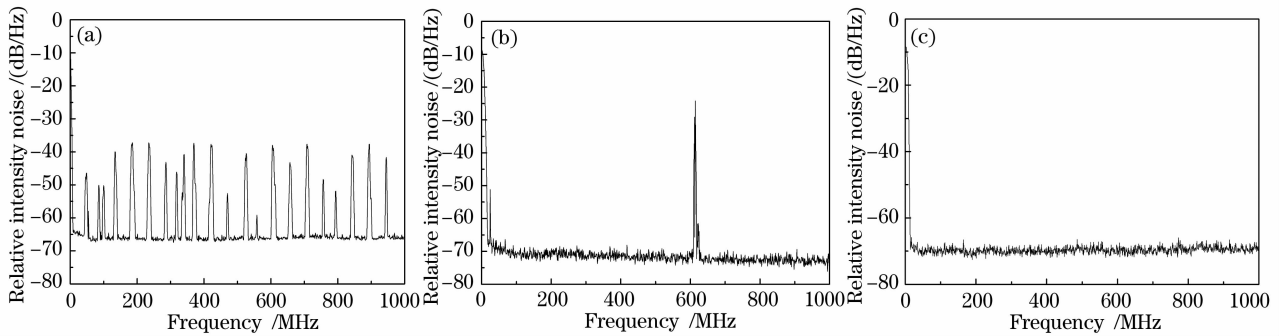


图 6 波长为 1549.6 nm 时的延迟零拍谱。(a)单有源环形腔,(b)双有源环形腔,(c)双有源环形腔加两个次级无源环形腔

Fig. 6 Self-homodyne spectra while the wavelength is 1549.6 nm with (a) single active ring cavity, (b) double active ring cavities, (c) double active ring cavities with two passive subring cavities

## 4 结 论

对多环形腔掺铒光纤激光器进行了实验研究,通过在双有源环形腔光纤激光器中插入两个腔长不同的无源次级环形腔,结合有源环内的两个滤波器,多环形谐振腔实现了很好的模式抑制,实现了调谐范围从 1528~1565 nm 的稳定单纵模输出,边模抑制比得到了很大的提高,在整个波长调节范围内边模抑制比大于 44.53 dB,在 1554 nm 附近边模抑制比可以达到最大值 51.18 dB,输出功率为-8.84 dBm,通过应用多环型结构,激光器的输出很稳定,中心波长的变化小于 0.02 nm,输出功率的变化小于 0.04 dBm。这种结构的多环形腔掺铒光纤激光器在光纤通信和光纤传感方面有很好的应用前景。

## 参 考 文 献

1 D. A. Smith, M. W. Maeda, J. J. Johnson *et al.*. Acoustically tuned erbium-doped fiber ring laser [J]. *Opt. Lett.*, 1991,

16(6): 387~389

- 2 J. L. Zyskind, J. W. Sulhoff, Y. Sun *et al.*. Single mode diode-pumped tunable erbium-doped fibre laser with linewidth less than 5.5 kHz[J]. *Electron. Lett.*, 1991, 27(23): 2148~2149
- 3 Ning Ding, Huang Bangcai, Li Zhaohui *et al.*. Ring cavity Yb<sup>3+</sup>-doped fiber laser with frequency selecting by fiber Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(2): 190~194
- 宁 鼎,黄榜才,李朝辉等. 光纤光栅选频环形腔掺铒光纤激光器[J]. *光学学报*, 2004, 24(2): 190~194
- 4 Luo Xiaodong, Rao Yunjiang, Ran Zengling. 100 km fiber Bragg grating sensor system based on fiber ring laser and optical amplification[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(8): 1393~1396
- 罗小东,饶云江,冉增令等. 基于光纤环形激光器和光放大的 100 km 光纤布拉格光栅传感系统[J]. *光学学报*, 2007, 27(8): 1393~1396
- 5 Zhang Zhiguo, Zhang Min, Ye Peida. Long-distance fiber Bragg grating sensor system based on linear-cavity fiber Raman laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, 33(8): 1073~1077
- 张治国,张 民,叶培大等. 基于线型腔拉曼光纤激光器的长距离光纤布拉格光栅传感[J]. *中国激光*, 2006, 33(8): 1073~1077
- 6 Lei Xu, Ivan Glesk, Darren Rand *et al.*. Suppression of beating noise of narrow-linewidth erbium-doped fiber ring lasers by use of a semiconductor optical amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 2003, 28(10):

- 780~782
- 7 Chien-Hung Yeh, Sien Chi. A wavelength-tunable erbium-doped fiber double-ring laser with stabilized single-frequency operation [J]. *Jap. J. Appl. Phys.*, 2005, **44**(7A): 5003~5005
  - 8 F. Liégeois, Y. Hernandez, G. Peigné *et al.*. High-efficiency, single-longitudinal-mode ring fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 2005, **41**(13): 729~730
  - 9 Jian Liu, Jianping Yao, Jian Yao *et al.*. Single-longitudinal-mode multiwavelength fiber ring laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(4): 1020~1022
  - 10 Jing Yang, Ronghui Qu, Guoyong Sun *et al.*. Suppression of mode competition in fiber lasers by using a saturable absorber and a fiber ring[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(7): 410~412
  - 11 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong *et al.*. *Laser Principles* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000. 26~28  
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000. 26~28
  - 12 N. Onodera. Supermode beat suppression in harmonically mode-locked erbium-doped fiber ring lasers with composite cavity structure[J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(11): 962~963
  - 13 Satok Kawanishi, Atsushi Takada, Masatoshi Saruwatari *et al.*. Wide-band frequency-response measurement of optical receivers using optical heterodyne detection[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(1): 92~98