

# 注入锁定掺铒光纤环形腔激光器及波长调谐技术\*

张 欣<sup>1,2,†</sup> 张 韬<sup>2</sup> 陈 伟<sup>2</sup> 刘 宇<sup>2</sup> 王 欣<sup>2</sup> 谢 亮<sup>2</sup> 祝宁华<sup>2</sup> 冯博学<sup>1</sup>

(1 兰州大学物理科学与技术学院, 兰州 730000)

(2 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:** 研究了掺铒光纤环形腔激光器(EDFRL)的注入锁定现象,提出了一种实现可调谐的单纵模 EDFRL 波长及功率稳定的新方法,即利用注入锁定技术向法布里-珀罗可调滤波器结合复合腔结构的 EDFRL 腔内注入低功率的连续光,使某一纵模在注入连续光的基础上起振.这个纵模在对增益介质的竞争中可以稳定地占据优势,从而与注入信号发生锁定,实现激光器输出光谱的稳定.实验得到激光器在 1527.4~1561.9nm 范围内波长可调,输出功率 >0.6dBm,信噪比(SNR)>43dB;输出光波长与功率抖动分别 <0.01nm 和 ≤0.02dB,且线宽约为 1.4kHz.

**关键词:** 掺铒光纤环形腔激光器; 注入锁定; 单纵模; 可调谐; 波长及功率稳定; 线宽  
EEACC: 4320J

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2007)02-0258-07

## 1 引言

中心频率及输出功率稳定、无跳模、窄线宽且波长可调谐的单纵模掺铒光纤环形腔激光器(EDFRL)由于可以广泛应用在光通信、激光光谱学、光纤传感等领域而备受关注并得到了迅猛发展.

连续运转的 EDFRL 具有结构简单,激射波长可以精确预定,可实现宽带调谐和窄线宽输出;且与其他激光器相比具有高增益、低阈值、易与传输光纤耦合等许多优良特点.EDFRL 的谱线线宽很窄(可小于 1kHz),这使得它极具魅力,然而由于光纤本身易受到震动、温度等环境因素的影响,当无任何锁模和选频措施时,极易跳模.光纤法布里-珀罗可调滤波器(FFP-TF)可以实现波长调谐和一定范围内的模式限制,但仍不足以稳定激光器的激射波长和功率.这就使得 EDFRL 的实际应用遇到了很大困难,因此人们采用了很多方法来获得稳定的可调谐单纵模激光.例如 Yeh 等人<sup>[1]</sup>采用双环结构结合两个 FP 可调滤波器,此方案结构简单,但实际操作时要将两 FP 滤波器调至相同波长并保证波长不漂移有一定难度;Liégeois 等人<sup>[2]</sup>提出结合 FBG 与若干 Mach-Zehnder 模式滤波器的方法来获得单频输出,此方案结构复杂且要精确调节每个 Mach-Zehnder 滤波器的两臂长差,还有可能引入过多的损耗;Yeh 等人<sup>[3]</sup>采用 FP 激光器和 EDFRL 互注入并利用光纤法布里-珀罗可调滤波器(FFP-TF)选

模,此方法可获得波长可调谐的单频输出,但是调谐步径受 FP 激光器较大模式间隔(1.12nm)的限制,不能连续可调.

激光器的注入锁定理论和技术的,近年一直受到人们的重视.其中 Chow, Dragic, Teyo 等人<sup>[4~8]</sup>对注入锁定做了较多的研究.在光纤激光器中,有别于半导体激光器的注入锁定<sup>[9]</sup>,主激光器比从激光器(光纤环形腔激光器)的线宽更宽;在注入锁定发生后,从激光器的输出频率和主激光器一致,输出激光线宽虽大于光纤激光器自由运转时的线宽,但要小于主激光器的线宽,且有利于提高输出光的稳定性,这正是我们的目的所在.

针对注入技术在掺铒光纤激光器中的应用,本文不仅在前人的基础上对 EDFRL 的注入锁定现象作了更全面的研究,分析了其锁定带宽、激光器输出功率对泵浦及注入信号功率的依赖性等,而且提出并实验验证了一种实现可调谐的单纵模 EDFRL 波长及功率稳定的方法,即利用注入锁定技术向光纤法布里-珀罗可调滤波器结合复合腔结构的 EDFRL 腔内注入连续光.研究了此激光器的输出功率、光谱、频谱及线宽等一些特性,并得到了预期的结果.

## 2 实验装置与原理

注入锁定 EDFRL 系统的实验装置如图 1 所示.在情况(a)即研究 EDFRL 的注入锁定现象时,虚线构成的方框 Block A 和 Block B 内仅由单模光

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号:60510173,60536010,605060067)

† 通信作者,Email:zhxin@semi.ac.cn

2006-09-13 收到,2006-10-24 定稿

纤连接；在情况 (b) 即研究利用注入技术提高可调谐单纵模复合腔 EDFRL 的输出稳定性时,Block A 内插入 FFP-TF,Block B 内插入由  $2 \times 2$  3dB 耦合器和一段长度比主环形腔短的单模光纤构成的次级环形腔；此外,主环形腔还包含以下原件:980nm 泵浦的掺铒光纤放大器(EDFA),因其内置隔离器保证了光的单向传输并避免了空间烧孔效应,所以不在腔内另置隔离器；激光光经由 90 : 10 光耦合器输出(90% 输出)；采用可调激光器(Agilent 公司 94819A 型)通过耦合器 C2 的 1% 输入臂为系统注

入连续光,在可调激光器与耦合器 C2 之间插入隔离器防止激射光的反射；偏振控制器(PC)用以调整腔内光的偏振态并稳定激光器.输出光的测量系统分别使用分辨率为 0.01nm 的 ADVANTEST 公司 Q8384 型光谱分析仪和功率计测量激光器的输出谱及功率；而激光器的频率特性及线宽则分别利用延迟零拍测量法和延迟自外差法通过光探测器在 ADVANTEST 公司 R3182 型 RF 频谱仪上测量与分析.

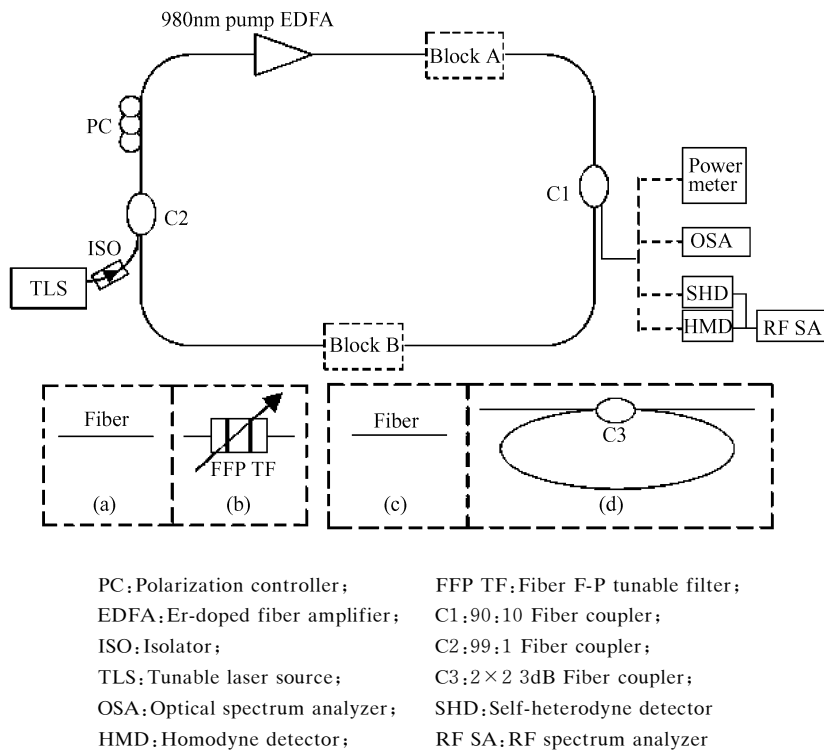


图 1 注入锁定的稳定 EDFRL 结构示意图

Fig.1 Experimental setup of the stabilized EDF ring laser with external CW injection

注入锁定的实质是模式竞争下的频率锁定.在一个自由运转的激光器中,注入一个低功率的谱线宽度很窄的激光信号  $\omega_{inj}$ ,并使注入信号与该激光振荡器的腔模相匹配；若腔中离注入信号最近的纵模频率为  $\omega_i$ ,而且注入信号带宽比腔的纵模间隔小得多,则频率为  $\omega_i$  的纵模受到激发与之发生共振,从增益介质中提取能量得到放大,而其他纵模仍然从自发辐射噪声开始起振；注入信号变成了锁定模式的附加泵浦源,连续不断的电场注入导致锁定模式强度的增加.因一般注入信号场强度比噪声场强度大,所以  $\omega_i$  模首先形成振荡,从而使增益系数下降,此时,由于均匀加宽介质的模式竞争机制,其他纵模的振荡将被抑制,最终得到稳定的单纵模和高功率

的激光输出.

按照拉姆的半经典理论<sup>[10]</sup>和 Chow 对其的推广<sup>[4]</sup>,推导出自由运转、小信号注入情形下的光纤激光光场位相方程为:

$$\frac{d\phi}{dt} = \omega_l - \omega_{inj} + \Delta\nu \sqrt{\kappa} \frac{E_{inj}}{E_l} \sin\phi, \quad l = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中  $\phi = \phi_l - \phi_{inj}$ ,  $\phi_l$  为激光器自由运转时光场中第  $l$  个模式的位相； $E_l$  和  $\omega_l$  分别为第  $l$  个模式的振幅和频率； $\phi_{inj}$  为注入场位相； $E_{inj}$  和  $\omega_{inj}$  分别为注入光振幅和频率； $\Delta\nu$  为模式间隔； $\kappa$  为注入光通过耦合器的耦合系数.

当  $d\phi/dt = 0$  时,  $l = i$  的模式与注入的激光信

号模式发生锁定(即使模式不匹配也能发生),即:

$$\omega_{inj} - \omega_i = \Delta\nu \sqrt{\kappa} \frac{E_{inj}}{E_1} \sin\phi$$

$$\text{或} \quad \frac{E_{inj}}{E_1} \geq |\omega_{inj} - \omega_i| / \Delta\nu \sqrt{\kappa} \quad (2)$$

由于光强等于光场振幅的平方,所以有:

$$I_{inj}/I_1 \geq (\omega_{inj} - \omega_i)^2 / (\Delta\nu)^2 \kappa \quad (3)$$

由(3)式可以看出,要实现注入锁定,必须对注入信号的功率密度有一定的要求.对一定的失谐量 $(\omega_{inj} - \omega_i)$ ,若注入信号功率密度过低,就会出现多纵模振荡.这从物理意义上不难理解,因为注入信号场太弱时,对其靠近的腔模场的影响力下降,达不到足以抑制其他纵模的程度,所以在模式竞争中不能取得优势,会导致多纵模振荡输出.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 EDFRL 的注入锁定现象

图 2 表示注入信号在 1556.48nm 处,与自由运转时(泵浦为两倍阈值)激光频率失谐 2nm 时,注入锁定前后的输出光谱.实验发现,当注入功率为 -24.5dBm 时,腔内同时有两个频率的光激励,分别对应注入信号和 EDFRL 自由运转激光光,如图中实线表示,这时系统处于未被锁定而相互竞争的状态,这一点得到前述锁定原理的验证;而当注入功率为 -23.5dBm 时,EDFRL 自由运转时的激光光被完全抑制,系统被注入锁定,输出光频率与注入信号一致,如图中圆点虚线所示.若定义在某注入光功率下,注入锁定能发生的最大失谐为锁定带宽,则锁定带宽与注入信号功率的关系如图 3 所示.从图中明显可看出,锁定带宽随注入信号功率的增加而增加,且在负失谐的情况下,其锁定带宽约为正失谐时的两倍.这是由 EDFL 放大自发辐射(ASE)谱的不对

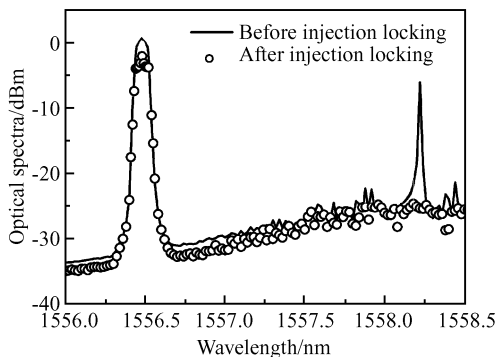


图 2 负失谐 -2nm 处注入锁定前后激光器输出光谱  
Fig.2 Output spectra of before and after injection locking with the negative detuning of 2nm

称决定的(通过图 2 也可看出),注入光波长比自由运转激光光波长短(即负失谐)时,其经历了更高的增益,所以要达到锁定态,所需注入光功率也比正失谐时要小,换言之,相同的注入功率下,负失谐时达到的锁定带宽比正失谐时更大.

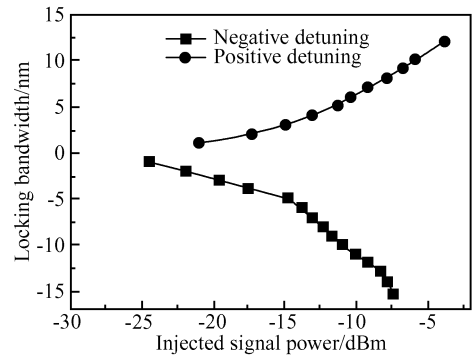


图 3 锁定带宽对注入光强的依赖关系(泵浦为两倍阈值)  
Fig.3 Dependence of locking bandwidth on injected signal power Pump power is twice threshold.

图 4 提供了 EDFRL 在自由运转时和注入锁定(注入光失谐 3nm 处)后的输出功率对泵浦功率的依赖关系.发现在不同功率注入和自由运转时,曲线斜率效率非常相似,但由于注入光使得注入后的激光阈值减小,且输出光功率大于自由运转时.图 5 则是固定泵浦功率为两倍阈值,在注入光正、负 3nm 失谐处,EDFRL 输出功率与注入信号功率的关系图.可以看出,在相同注入功率下,负失谐时系统输出光功率大于正失谐,原因我们在对图 3 的分析中已提到:是由 EDFL 放大自发辐射谱的不对称决定的,注入光波长相对自由运转激光光波长为负失谐时,其经历了比正失谐时更高的增益.注意到图中每

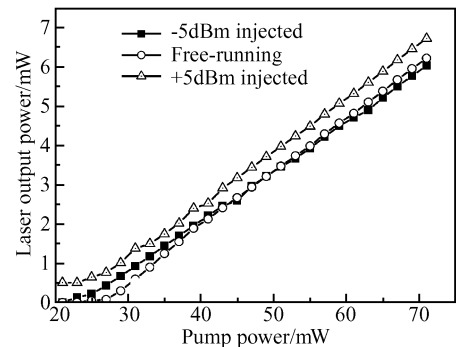


图 4 在不同注入功率及自由运转情况下激光器输出功率与泵浦功率的关系曲线  
Fig.4 Laser output power as a function of the pump power at different injected signal powers and free-running conditions

条曲线的斜率都有一个突变,而这一突变点对应了注入锁定的阈值,即 -3nm 失谐时,注入锁定需最小注入功率为 -23.4dBm;而 +3nm 失谐时,所需最小注入功率为 21.2 dBm.

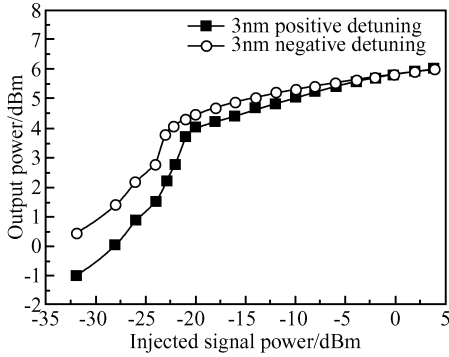


图 5 在正负失谐 3nm 处激光器输出功率与注入信号功率的 (泵浦功率为两倍阈值)关系曲线

Fig.5 Laser output power as a function of the injected signal power at positive/negative detuning 3nm with pump power twice the threshold

随着泵浦功率的增加,激光器自由运转时的激光模强度增加,注入场对其的影响减弱,因此,要实现注入锁定,则需要更大的注入功率,如图 6 所示.且同样是 EDFL 放大自发辐射谱不对称的原因,相同泵浦功率下,注入光正失谐锁定时需要比负失谐时更大的注入功率.结合图 6,图 7 的物理意义更明显:注入场对腔模的影响将随着失谐量  $\Delta\omega$  的增加而减小;失谐愈严重,在给定的注入光强度下,与注入频率相同的激光振荡也愈小,锁定效果变差;当失谐量大到一定程度时,就会出现多纵模振荡;且泵浦功率的增加也会减弱注入光的锁定能力.如图所示,注入功率为 +1dBm,泵浦功率为 48mW 时,锁定范围可达 50nm;而当泵浦增加到 75mW 时,锁定范围已减小到小于 10nm.

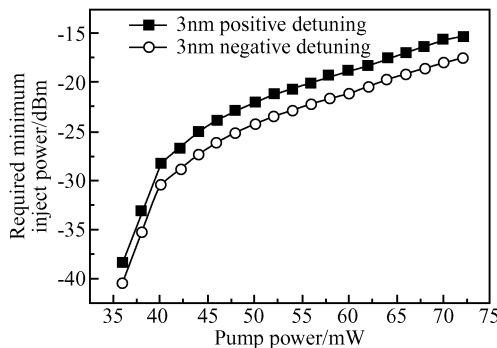


图 6 注入锁定所需最小注入功率与泵浦功率的关系曲线  
Fig.6 Required minimum injected signal power versus pump power for injection locking

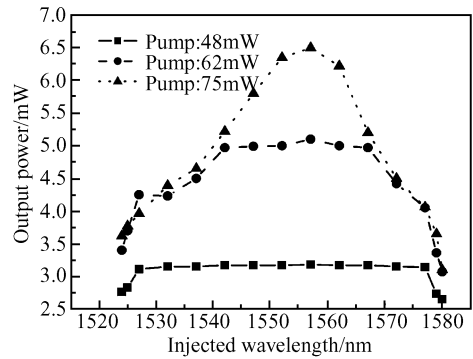


图 7 不同泵浦功率下系统输出功率与注入波长的关系  
Fig.7 Injection wavelength dependence of output power for 48,62,75mW pump power with the injected signal power +1dBm

### 3.2 波长可调谐的注入锁定单纵模 EDFRL

在前文对 EDFRL 的注入锁定现象有了较全面的研究基础上,我们将注入锁定具体应用到对可调谐的单纵模 EDFRL 波长及功率的稳定中去.

可调谐复合腔 EDFRL 模式选择机理如图 8 所示.复合腔的滤波特性类似于法布里-珀罗干涉仪,即它的透射谱中符合谐振条件的频率处存在峰值,谐振条件为  $\beta L_m = 2m\pi, \beta L_s = (2n + 1)\pi$ ,其中  $L_m$  为主环形腔腔长;  $L_s$  为次环形腔腔长;  $\beta$  为传输常数;  $m, n$  分别为正整数.自由光谱范围(FSR)与腔长成反比,由于次环形腔的长度比光纤激光器主环形腔长小一个量级,而对于复合腔,有效 FSR 为  $FSR = 2m FSR_m = (2n + 1) FSR_s$ ,即为主、次环形腔 FSR 的最小公倍数,从而增加了 FSR,减少了可以振荡的纵模数,抑制了拍频噪声.当在复合腔中插入光纤 FP 可调窄带滤波器后两种滤波机制相互结合,即可实现激光器的波长可调单纵模输出.然而由于光纤本身易受到震动、温度等环境因素的影响,会造成严重的模式跳变;同时由于光在主、次环形腔中偏振态不匹配也会加剧输出光的不稳定性.因此,对系统采取稳定措施是必要的.

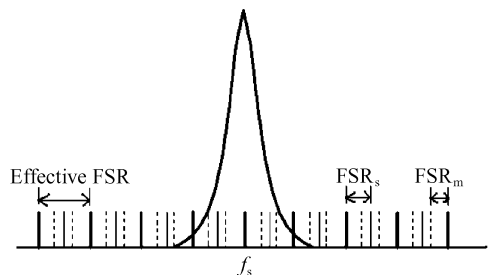


图 8 波长可调谐复合腔 EDFL 模式选择机理示意图  
Fig.8 Schematic diagram of mode selection in the tunable compound cavities EDFL

本文利用注入锁定的原理来获得系统频率和功率稳定的波长可调谐的单纵模输出. 首先通过控制加在压电陶瓷(PZT)上的电压来调节 FFP-TF, 使激光器在某一波长激射, 然后设置可调激光器输出波长与此相同(可调激光器线宽为约 100kHz), 并微调使其与某一个模式重合, 根据之前的讨论, 我们知道在复合腔结构中, 模式间隔(或 FSR)已经较宽, 所以这种调节容易实现. 外光注入后, 仅需很小的注入功率就可使这一模式在模式竞争中取得优势, 并迅速成长起来, 此时系统对环境温度和震动的敏感性下降, 从而达到了稳定频率和输出功率的目的. 图 9 显示激光器可在 1527.4~1561.9nm 范围内连续调谐输出, 且调谐步径为可调激光器的最小

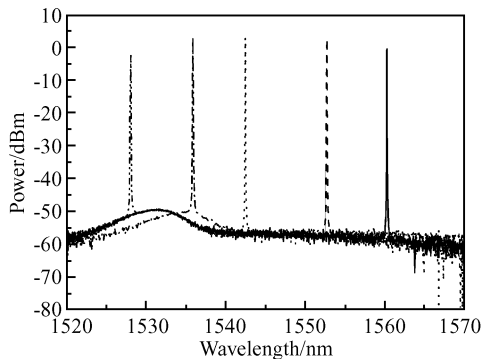


图 9 在 1527.4~1561.9nm 调谐范围内的激光器输出光谱  
Fig.9 Optical spectra for the EDFRL over the tuning range from 1527.4 to 1561.9nm

调谐步径 0.001nm, 这相对于前述调谐方法<sup>[3]</sup>中的调谐步径要小 3 个数量级. 对输出光通过频谱仪分析发现, 在无连续光注入时, 零频附近存在 30dB 左右的信号, 这说明激光器运转在多纵模状态, 相互差拍, 如图 10(a) 所示. 这些信号是不稳定的, 拍频噪声会使激光器输出强度随时间抖动, 因此在很多应用中必须加以抑制. 当注入光功率为 10 $\mu$ W 后, 图 10(b) 中不再有零拍谱线出现, 表示系统稳频后为单纵模输出.

图 11 是注入前后系统中心波长和输出功率, 观察时间为 20min. 注入前, 输出光中心波长与功率抖动分别为约 0.04nm 和 0.24dB; 注入后, 波长与功率抖动分别  $<0.01$ nm 和  $\leq 0.02$ dB, 显然, 稳定度得到大的提高. 图 12 表示在 1527.4~1561.9nm 调谐范围内不同激射波长处的输出光功率及信噪比(SNR). 在整个调谐范围内, 得到输出功率  $>0.6$ dBm 和  $SNR > 43$ dB; 而在 1536nm 处光功率最大为 2.97dBm, 在 1561.9nm 处功率最小为 0.66dBm; 信噪比在激射光调谐至 1533nm 附近时为最大 56dB.

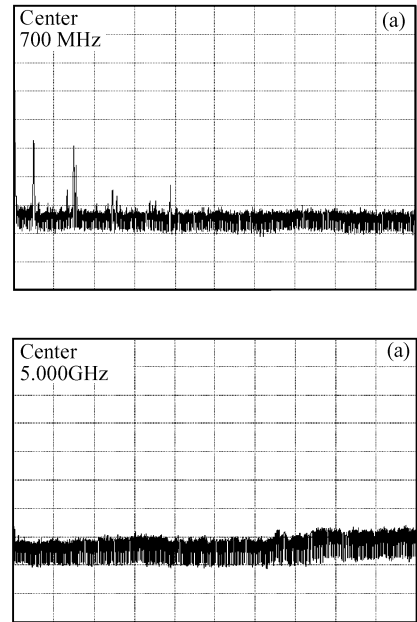


图 10 复合腔 EDFRL 的零拍谱线图 (a) 无连续光注入; (b) 外光注入后(注入功率 6 $\mu$ W)

Fig.10 Homodyne frequency spectrum of the compound cavities EDFRL (a) Without external injection; (b) After external injection with injection power of 6 $\mu$ W

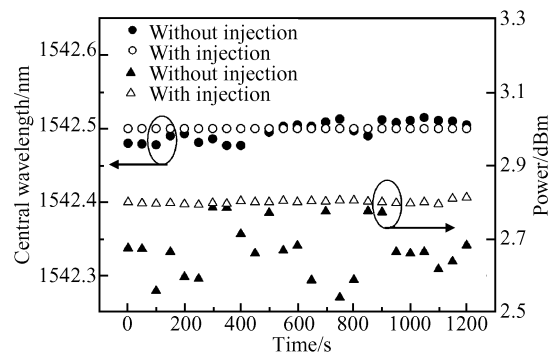


图 11 激射波长为 1542.5nm 时, 注入前后系统中心波长和输出功率的抖动

Fig.11 Central wavelength and output power fluctuation of the proposed configuration without and with injection locking while the wavelength is 1542.5nm initially

实验通过连续光注入下的复合腔结构压窄了输出谱线的线宽. 图 13 表示用延迟自外差测量法测得复合腔 EDFRL 的拍噪声谱, 设定频谱分析仪扫频范围 400kHz, 扫频时间 90ms, 测得仪器给出其半峰全宽(FWHM)为 2.8kHz; 通过洛伦兹函数拟合, 证明此拍噪声谱具有洛伦兹线形, 图中正三角虚线表示实测线形, 实线表示洛伦兹函数拟合线形. 因此, 激光器输出光 -3dB 线宽为实测噪声谱线宽的二分

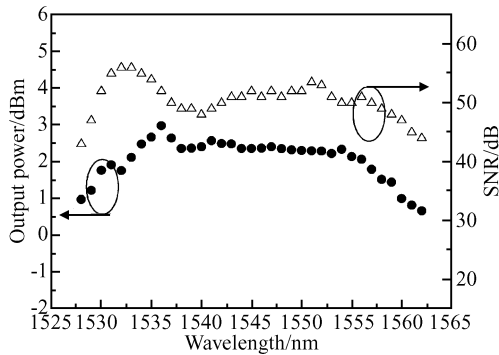


图 12 1527.4~1561.9nm 调谐范围内,在不同激射波长处激光器的输出功率和信噪比

Fig. 12 Output power and SNR at different lasing wavelengths over the tuning range

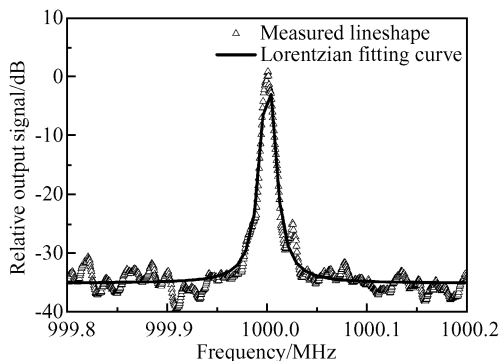


图 13 延迟自外差测量法测定激光器线宽及用洛伦兹函数对其的拟合曲线

Fig. 13 Linewidth measured by a delayed self-heterodyne method and the fitting curve of Lorentzian function to the beat noise spectrum

之一<sup>[11]</sup>,即 1.4kHz,这已远小于注入光源可调激光器的线宽,接近 EDFL 的本征线宽,这是据我们所知到目前为止利用各种稳定方法获得的单频掺铒光纤激光器线宽的最好结果。

## 4 结论

本文在对 EDFRL 的注入锁定现象做了较全面的研究基础上,力图扩展注入锁定技术的具体应用。提出了一种实现可调谐的单纵模 EDFRL 波长及功率稳定的新方法,即利用注入锁定技术向法布里-珀罗可调滤波器结合复合腔结构的 EDFRL 腔内注入低功率的连续光,使某一纵模在注入连续光的基

础上起振,这个纵模在对增益介质的竞争中可以稳定地占据优势,从而与注入信号发生锁定,实现激光器输出光谱的稳定。此方法的主要优点是成本较低,装置简单易实现,且最终获得了稳定的波长可调谐的单纵模光输出。通过实验研究了它的输出功率、光谱、频谱及线宽等一些特性,得到激光器在 1527.4~1561.9nm 范围内波长可调,输出功率  $>0.6\text{dBm}$ ,信噪比(SNR) $>43\text{dB}$ ;输出光波长与功率抖动分别  $<0.01\text{nm}$  和  $\leq 0.02\text{dB}$ ,且线宽约为 1.4kHz。

## 参考文献

- [1] Yeh C H, Chi S. A wavelength-tunable erbium-doped fiber double-ring laser with stabilized single-frequency operation. *Jpn J Appl Phys*, 2005, 44(7A): 5003
- [2] Liégeois F, Hernandez Y, Peigne G, et al. High-efficiency, single-longitudinal-mode ring fibre laser. *Electron Lett*, 2005, 41(13): 729
- [3] Yeh C H, Lee C C, Chen C Y, et al. A stabilized and tunable Erbium-doped fiber ring laser with double optical filter. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2004, 16(3): 765
- [4] Chow W W. Theory of line narrowing and frequency selection in an injection locked laser. *IEEE J Quantum Electron*, 1983, 19(2): 243
- [5] Dragic P D. Analytical model for injection-seeded Erbium-doped fiber ring lasers. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2005, 17(8): 1629
- [6] Shah N S M, Teyo T C, Ahmed H, et al. Power stabilization of Erbium-doped fiber ring laser subjected to external injection. *ICSE*, 2002: 407
- [7] Zhu Likai, Yu Jinlong, Wang Yaotian, et al. A method stabilizing the wavelength of mode-locked fiber laser with injected continuous wave. *Microw Opt Tech Lett*, 2006, 48(7): 1385
- [8] Zhang Tao, San Haisheng, Wen Jimin, et al. Improvement of the frequency response of a DFB laser using injection locking. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2006, 27(8): 1463 (in Chinese)[张韬, 伞海生, 温继敏, 等. 用注入锁模法改善 DFB 激光器的频率响应. *半导体学报*, 2006, 27(8): 1463]
- [9] Yu Benli, Qian Jingren, Luo Jiatong, et al. Experimental researches of injection locking fiber ring resonator laser. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, 18(6): 525 (in Chinese)[俞本立, 钱景仁, 罗家童, 等. 注入锁定光纤环形腔激光器实验研究. *量子电子学报*, 2001, 18(6): 525]
- [10] O'Bryan C L III, Sargent M III. Theory of multimode laser operation. *Phys Rev A*, 1973, 8: 3071
- [11] Liang Kefei, Chen Shixiang, Yang Darong. Measurements of laser linewidth. *Journal of Nanjing Institute of Posts and Telecommunications*, 1991, 11(2): 32 (in Chinese)[梁可非, 陈世翔, 杨大容. 激光器线宽的测量. *南京邮电学院学报*, 1991, 11(2): 32]

## Injection Locked Erbium-Doped Fiber Ring Laser and Its Wavelength Tuning\*

Zhang Xin<sup>1,2,†</sup>, Zhang Tao<sup>2</sup>, Chen Wei<sup>2</sup>, Liu Yu<sup>2</sup>, Wang Xin<sup>2</sup>, Xie Liang<sup>2</sup>,  
Zhu Ninghua<sup>2</sup>, and Feng Boxue<sup>1</sup>

(1 *School of Physical Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*)

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

**Abstract:** The injection locking of an erbium-doped fiber ring laser (EDFRL) is studied, and a novel method to stabilize the wavelength and output power of tunable single-longitudinal-mode EDFRL with compound cavity structure is proposed and experimentally demonstrated. One of the longitudinal modes is stimulated by an injected continuous wave so that the mode is able to stabilize the system. An output power of  $>0.6$  dBm and an SNR of  $>43$  dB within the tuning range from 1527.4 to 1561.9 nm can be achieved for this laser. A wavelength variation of less than 0.01 nm, power fluctuation of less than 0.02 dB, and linewidth of about 1.4 kHz are also obtained.

**Key words:** EDFRL; injection locking; single longitudinal mode; tunability; stabilization of wavelength and power; linewidth

**EEACC:** 4320J

**Article ID:** 0253-4177(2007)02-0258-07

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 60510173, 60536010, 605060067)

† Corresponding author. Email: zhxin@semi.ac.cn

Received 13 September 2006, revised manuscript received 24 October 2006

©2007 Chinese Institute of Electronics