

# 一种新型主动锁模光纤激光器腔长稳定技术研究\*

李亚男 于晋龙 王 剑 戴居丰 杨恩泽

(天津大学电子信息工程学院光纤通信实验室,教育部光电子中心开放实验室,天津 300072)

**摘要** 提出了一种全新的主动锁模光纤激光器的腔长稳定方案,通过波长的变化检测腔长的漂移,使用波长锁定器得到偏移误差信号补偿腔长变化. 实验得到了脉宽为 7.6 ps 的近变换极限锁模脉冲,其超模抑制比达到 60 dB,并且在近 2 h 的工作时间内工作稳定,波长漂移小于 0.01 nm. 与已有的方案相比较,不但输出脉冲质量高、并可长时间稳定工作,而且由于采用了低成本的稳定方案,更易于实现.

**关键词** 主动锁模光纤激光器;波长锁定器;超模噪声;色散补偿光纤

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A

## 0 引言

在 OTDM/WDM 光纤通信系统中,主动锁模光纤激光器因其具有高重复频率、波长可调谐、可输出变换极限光脉冲等优点,在未来高速率光纤通信系统中是一种非常理想的光信号源. 但是,由于主动锁模光纤激光器腔长较长(通常为几十到几百米),容易受机械震动、温度等外界因素的影响,引起锁模激光器的腔长漂移. 所以,如何稳定腔长成为保证锁模光纤激光器稳定工作的关键,这也是国内外研究的热点.

目前,为了解决主动锁模光纤激光器的稳定性问题,各国科研工作者提出了多种方案<sup>[1~7]</sup>. 本文提出了一种应用波长锁定器来检测腔内变化的全新方案,实现锁模光纤激光器在时域和频域的稳定,避免了以往方案中为了检测低速率的腔长变化,却不得不采用高速率器件(如 PIN)的时域检测方案的弊端,可以大大简化系统,降低系统的成本,并得到理想的实验结果.

## 1 工作原理

在主动锁模光纤激光器中引入大色散方案最初是作为一种波长调谐技术出现的<sup>[8]</sup>,通过同样的原理,它还可以作为一种在锁模激光器中检测腔长变化的技术.

大色散腔调谐波长的原理是通过改变调制频率或腔长来改变输出的波长,反过来说,当输出波长改变时,可以得到腔长和调制频率的变化量,根据这个变化量,通过反馈控制装置,能够补偿腔长的变化,实现激光器腔的长时间稳定.

在锁模腔内,不同的波长分量在 DCF(色散补偿光纤)中传输时的群速度是不同的,对于  $N$  次谐波锁模,当腔长固定时,不同的中心波长对应着不同的调制频率,其关系可表示为

$$f_m = \frac{N}{T(\lambda)} = \frac{N}{Ln_{\text{eff}}/c} = \frac{Nc}{n_s L_s + n_d L_d} \quad (1)$$

式中  $f_m$  为调制频率,  $N$  为谐波次数,  $T(\lambda)$  为中心波长为  $\lambda$  的光脉冲沿环形腔行进一周所用的时间,  $c$  为光速,  $L$  为腔长,  $n_{\text{eff}}$  为腔内有效折射率,  $L_s$  为环形腔内单模光纤长度,  $n_s$  为单模光纤折射率,  $L_d$  为环形腔内色散补偿光纤长度,  $n_d$  为色散补偿光纤折射率,有  $Ln_{\text{eff}} = L_s n_s + L_d n_d$ . (这里假设环形腔由 SMF 和 DCF 两种光纤组成,而忽略 EDFA 中的掺 Er 光纤长度.) 考虑调制频率与腔长的对应关系,可以推导出锁模状态下腔长与波长的变化率. 由色散参量的定义得到

$$\frac{dn_{\text{eff}}}{d\lambda} = cD \quad (2)$$

由式(1)、(2),得

$$\frac{df_m}{d\lambda} = -\frac{f_m^2 (D_s(\lambda)L_s + D_d(\lambda)L_d)}{N} = -\frac{f_m^2 D_{\text{eff}} L}{N} \quad (3)$$

式中  $D_s$  和  $D_d$  分别为腔内单模光纤和色散补偿光纤的色散参量,  $D_{\text{eff}}$  为腔内光纤等效色散. 在含有 DCF 的大色散腔内,总的色散参量为负的,即  $D_{\text{eff}} = (D_s L_s + D_d L_d)/L < 0$ . 因此,根据式(3)可知:当调制频率发生变化时,激光器中心波长将与调制频率沿同方向变化.

由式(1)和(3)可推导得到色散腔主动锁模光纤环形激光器中的波长变化和腔长变化之间的关系为

$$\frac{d\lambda}{dL} = \frac{n_{\text{eff}}}{cD_{\text{eff}} L} \quad (4)$$

由式(4)可知,腔长漂移最终可以通过波长的变化表现出来. 这样我们就可以通过波长敏感器件(如波长锁定器)进行检测,进而得到腔长变化的信

\* 国家 863 项目(2001AA312220)资助  
Tel:022-27404143 Email:lhuntery@hotmail.com  
收稿日期:2003-10-31

息,通过反馈控制机构就有可以实现腔长的稳定.

### 2 实验研究

图1是附加了腔长稳定结构的主动锁模光纤环形激光器的实验装置图.调制信号是由微波源(83172A)产生的10 GHz信号,调制激光器腔内的损耗,产生的光脉冲,由90:10的耦合器的90%的端口进入锁模腔;10%的端口输出激光器.其中,隔离器保证光信号在激光器内的单向传输;EDFA提供增益;电可变延时线由步进电机带动,用于调整激光器的腔长;DCF(色散补偿光纤)提供大的色散量;2nm的可调带通滤波器,调节输出波长.

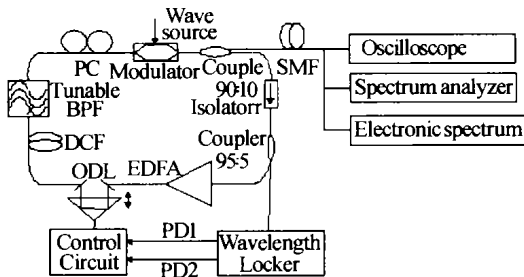


图1 腔长稳定的主动锁模光纤环形激光器的实验装置  
Fig.1 Experimental configuration of actively mode-locked fiber laser with stability of cavity length

腔长反馈控制部分是由波长锁定器和控制电路组成的.由95:5耦合器的5%的端口输出的锁模脉冲进入波长锁定器,波长锁定器可以检测输出波长的偏移方向和偏移量并产生偏移误差信号,对其进行处理后提供给驱动电路,驱动电可变延时线的步进电机,从而实现对激光器腔长的反馈控制,其波长稳定精度可达0.002 nm.输出的信号经过一段负色散的普通单模光纤对啁啾进行补偿,可以得到压窄的脉冲.最后输出通过示波器(HP 83480A)、光谱仪(Agilent 86142B)和电谱仪(HP 8563E)进行测试.

主动锁模光纤激光器的稳定工作时间一般是几分钟左右,本方案的稳定系统响应时间为毫秒级,完全可满足系统要求.

图2是激光器腔内只有单模光纤(图2(a))和单模光纤加色散补偿光纤和波长锁定器(图2(b))时输出的锁模脉冲.从图中可以看到,在图2(a)中,波形幅度抖动较大,而且波形的线型也比较粗,说明得到的锁模脉冲的噪声很大.图2(b)的波形图线条很均匀,也很细,说明得到的输出脉冲的质量很好,时间抖动很小,噪声很小.

图3是锁模激光器输出的光谱图,谱线间隔为10 GHz,谱宽为0.352 nm,输出脉冲的中心波长为1549.32 nm.可以看到光谱的多个纵模谱线比较清晰,这也说明了输出的锁模脉冲的质量非常好,噪声很小.

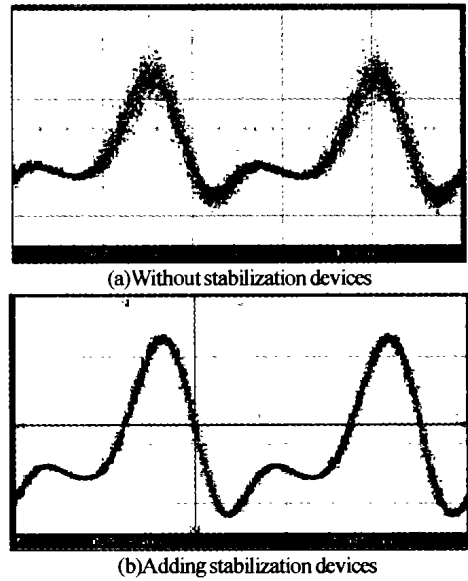


图2 锁模激光器腔内输出的10 GHz锁模脉冲  
Fig.2 Output waveform of 10 GHz mode-locked fiber ring laser

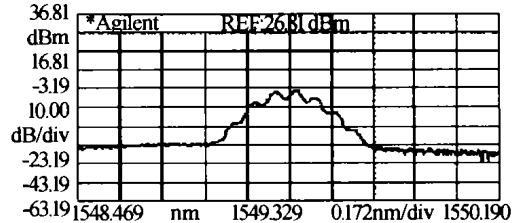


图3 锁模激光器的输出光谱  
Fig.3 Output optical spectra of the mode-locked fiber laser

超模噪声是光纤锁模激光器的主要噪声源.通过电谱仪可以清楚的了解输出脉冲的超模噪声的特性.图4是光纤锁模激光器输出的光脉冲电谱.其中图4(a)是没有加稳定措施及DCF大色散情况下的输出电谱,可以读出超模抑制比为25 dB左右.

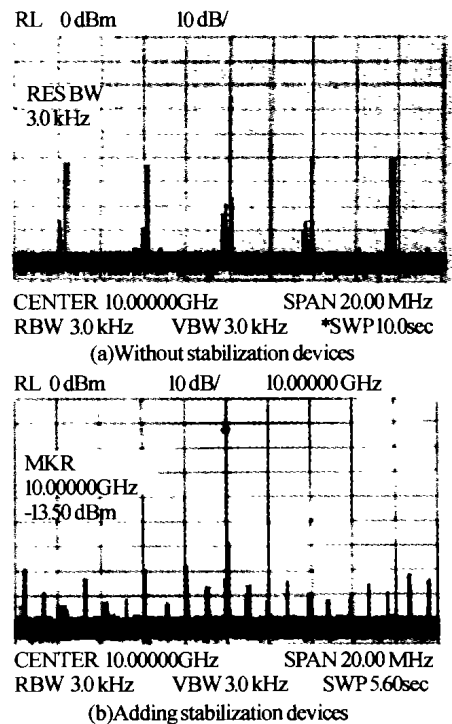


图4 电谱仪上显示的锁模激光器的超模噪声  
Fig.4 Supermode noise of mode-locked fiber laser on a spectrum analyser

图 4 (b) 为增加稳定措施后的大色散腔输出光谱, 可以看到它的超模抑制比达到接近 60 dB 左右, 表现出非常好的超模抑制特性.

通过对电谱仪上的超模间隔进行计算可得激光器的腔长  $L$  为 295 m, 其中 DCF 长度约为 260 m. 通过测量调制频率和输出光的波长的变化关系, 可以得到腔内的平均色散值为  $62.5 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ .

使用自相关仪可得到输出脉冲的自相关曲线, 如图 5(a), 脉宽为 17.3 ps, 含有一定量的正啁啾. 为了压窄光脉冲, 通过一段负色散的普通单模光纤对啁啾进行补偿. 经计算单模光纤的最佳长度  $L_{\text{opt}} = 2.34 \text{ km}$ . 在实验中, 实际使用了 2.5 km 单模光纤进行补偿, 压窄后脉冲的自相关曲线如图 5(b), 测得脉宽为 7.6 ps, 时间带宽积为 0.334. 将实际的光脉冲波形分别与理想的高斯曲线和双曲正割曲线相比较, 我们发现, 该光脉冲的形状更接近双曲正割曲线(正如图 5(b) 中表示的). 考虑到理想的双曲正割光脉冲的时间带宽积为 0.315, 输出的光脉冲是一个质量很高的双曲正割光脉冲.

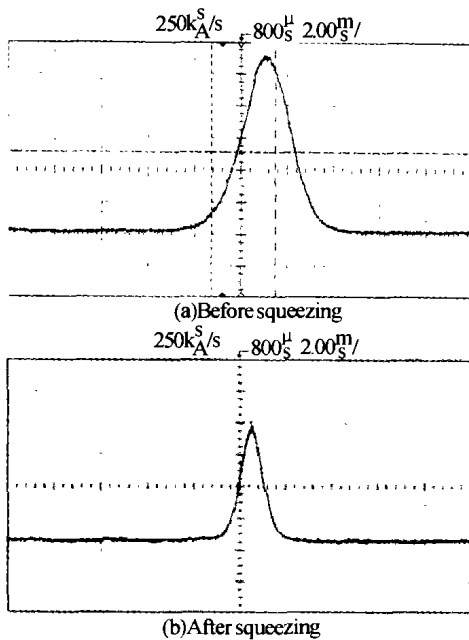


图 5 光脉冲自相关曲线  
Fig. 5 Autocorrelation trace of pulses

在实验中, 分别做了两组时间-波长漂移的实验. 初步验证了方案长时间稳定的效果. 在锁模激光器工作稳定的情况下, 每隔 5 min 记录一次波长, 记录了 100 min 的数据. 结果如图 6, 可以看出, 在未加波长锁定器时 6(a), 激光器输出的波长变化范围比较大, 大致是 0.6 nm 左右, 这会导致输出脉冲不稳定, 有时会出现双波长起振, 更坏的情况下, 甚至会失锁(这是大色散腔的固有问题). 而在加入了波长锁定器的情况下, 波长非常稳定, 从图 6 中可以看出, 波长在整个 100 min 内仅仅变化了不到 0.01 nm,

比不加波长锁定器改善了 60 倍. 可以看出腔长的稳定性也大大提高了; 同时, 激光器的输出也非常稳定, 其输出波形一直如图 6(b), 平均时间抖动小于 1.3 ps. 从趋势上看, 若继续工作, 可一直稳定下去.

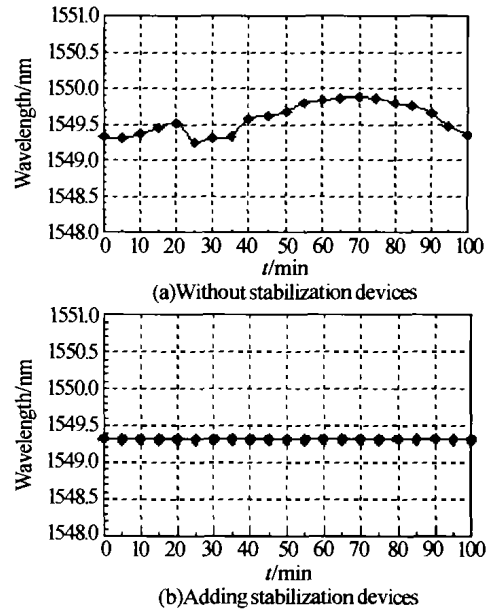


图 6 输出波长与时间的变化关系  
Fig. 6 Output wavelength vs time

### 4 结论

通过分析和实验, 可以看出, 通过采用此稳定方案的主动锁模光纤激光器, 得到了高质量的, 脉宽为 7.6 ps 的近变换极限锁模脉冲, 其超模抑制比达到 60 dB, 与普通的锁模光纤激光器相比, 超模抑制比提高了近 35 dB. 另外, 在近 2 h 的测试中, 波长漂移小于 0.01 nm, 与不加波长锁定器的情况相比, 波长漂移减小了近 60 倍. 比起已有方案, 本方案具有输出脉冲质量高, 结构简单, 成本低, 同时稳定效果好, 易于实现的优点.

### 参考文献

- 1 Nakazawa M, Yoshida E, Tamura K. Ideal phase-locked-loop (PLL) operation of a 10 GHz erbium-doped fiber laser using regenerative modelocking as a optical voltage controlled oscillator. *Electron Lett*, 1997, **33**(15):1318 ~ 1320
- 2 Nakazawa M, Yoshida E, Kimura Y. Ultrastable harmonically and regeneratively modelocked polarization maintain erbium fiber laser. *Electron Lett*, 1994, **30**(19):1603 ~ 1605
- 3 Shan X, Spirit D M. Novel method to suppress noise in harmonically modelocked erbium fiber lasers. *Electron Lett*, 1993, **29**(11):979 ~ 981
- 4 Harvey G T, Mollenuauer L F. Harmonically mode locked fiber ring laser with an internal fabry-perot stabilizer for soliton transmission. *Opt Lett*, 1993, **18**(2):107 ~ 109
- 5 Onodera N. Supermode beat suppression in harmonically mode-locked erbium-doped fiber ring laser with composite

- cavity structure. *Electron Lett*, 1997, **33**(11):961
- 6 于晋龙, 马晓红, 杨恩泽, 等. ABCD 矩阵方法在主动锁模光纤激光器理论与实验分析中的应用. *光子学报*, 2002, **31**(7):851~854
- Yu J L, Ma X H, Yang E Z, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(7):851~854
- 7 Feng E B, Ma X H. Application of ABCD formalism in theoretical and experimental analysis of actively modelocked fiber laser. *Semiconductor Photonics and Technology*, 2002, **8**(2):80~85
- 8 Shu C, Zhao Y. Characteristics of dispersion-tuning in harmonically mode-locked fiber laser. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, **10**(8):1106~1108

## A Novel Scheme for the Cavity Length Stability of Actively Mode-locked Fiber Laser

Li Yanan, Yu Jinlong, Wang Jian, Dai Jufeng, Yang Enze

*School of Electronics and Information Engineering, Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technical Science, EMC, Tianjin University, Tianjin 300072*

Received date: 2003-10-31

**Abstract** A novel scheme is proposed for stabilizing actively mode-locked fiber lasers. Error signals are obtained for the scheme by detecting the cavity shift with a wavelength locker. The error signals are used for compensating for changes of the cavity length. A setup is established for realizing the proposed scheme. Pulse trains with a width of 7.6 ps are obtained in the experiments. The supermode suppression ratio reaches 60 dB and an improvement of 35 dB is made by adding stabilization devices. A wavelength shift is also measured, which is less than 0.01 nm within 2 hours, and this value is about one sixties of that without adding stabilization devices. The results show that cavity length stability and noise suppression performance are much better than those published before. This scheme is simpler and more economical.

**Keywords** Actively mode-locked fiber laser; Wavelength locker; Wupermode noise; Dispersion compensation fiber (DCF)



**Li Yanan** was born in 1977. He received his B. S. and M. S. degree in School of Electronics and Information Engineering of Tianjin University in 1999 and 2001. Now he is studying for Ph. D. in Tianjin University. His research field is in optical fiber communication systems.