

抑制相位噪声实现主动锁模光纤 激光器稳定工作*

刘 军 李玉华 娄彩云 高以智

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要 腔长漂移是引起主动锁模光纤激光器不稳定的一个主要原因。通过理论分析得出了主动锁模光纤激光器输出脉冲相位噪声和腔长漂移的关系, 并采用抑制相位噪声的方法实现了主动锁模光纤激光器长达 8 小时的稳定工作。

关键词 光纤激光器, 主动锁模, 掺铒光纤放大器。

在光时分复用(OTDM)光通信系统中, 超短光脉冲源是一个非常重要的器件。在发射端, 超短光脉冲源用作发射光源; 而在接收端, 则由超短光脉冲源产生光时钟脉冲用于解复用。主动锁模光纤激光器由于具有输出脉冲啁啾小、波长可调谐范围大、重复频率高等优点, 因而被认为是一种很有前途的超短光脉冲源, 在一些光时分复用通信实验系统中已经得到了应用^[1, 2]。

影响主动锁模光纤激光器应用的一个主要问题是稳定性。主动锁模光纤激光器稳定工作的前提条件之一是调制信号频率应为腔内纵模间隔的整数倍。在失谐不严重时, 输出脉冲中产生相位噪声; 失谐严重时, 则会引起锁模失效, 表现为输出光脉冲崩溃。由于主动锁模光纤激光器腔内有较长的光纤, 而光纤的长度极易因外界环境的影响而发生漂移, 因而调制频率和腔长很难保持匹配。所以必须采取特殊的措施来稳定主动锁模光纤激光器的腔长, 从而保证主动锁模光纤激光器长时间的稳定工作^[3, 4]。作者采取抑制主动锁模光纤激光器输出脉冲序列中的相位噪声的方法, 实现了 2.5 GHz 主动锁模光纤激光器超过 8 小时的稳定工作。

1 工作原理

主动锁模光纤激光器的典型结构如图 1 所示。

在不考虑腔内光纤中的非线性及色散作用的时候, 腔内主要存在调制和滤波两种效应。假设在调制信号的作用下, 调制器的透过峰处于 $t = 0$ 处, 那么, 调制器的透过率可写成:

$$T(t) = 1 - m(1 - \cos \omega_m t) \quad (1)$$

式中 m 为调制度, ω_m 为调制信号角频率。当调制信号频率是腔内纵模间隔的整数倍时, 脉冲

* 国家科委 863 高科技项目及国家自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1997-07-02; 收到修改稿日期: 1997-09-08

每次经过调制器时其中心都处于调制器透过率最大值处, 即 $t = 0$ 处。同时, 在到达稳态时, 脉冲的宽度较窄, 因 $\omega_m t \ll 1$, 于是:

$$T(t) \cong 1 - m(\omega_m t)^2/2 \quad (2)$$

对于滤波器采用如下模型:

$$H(\omega) = \{1 + [2(\omega - \omega_0)/\omega_{BW}]^2\}^{-1/2} \quad (3)$$

式中 ω_{BW} 为滤波器带宽, ω_0 为滤波器中心频率。由于稳态时, 在滤波器的不断作用下, 有 $\omega - \omega_0 \ll \omega_{BW}$, 所以可采用幂级数展开得:

$$H(\omega) \approx [1 - 2(\omega - \omega_0)^2/\omega_{BW}^2] \quad (4)$$

经过傅里叶逆变换, 得到光脉冲经过时, 有:

$$E_2(t) = \left[1 + \frac{2d^2}{\omega_{BW} dt^2}\right] E(t) = H(t)E(t) \quad (5)$$

当腔长发生漂移后, 脉冲每环行一周, 相对于上一次都要超前或落后一段时间 t_D , 即:

$$E_2(t) = E(t - t_D) = \mathcal{F}^{-1}[\exp(-j\alpha t_D)E(\omega)] = \mathcal{F}^{-1}[(1 - j\alpha t_D + \dots)E(\omega)] \quad (6)$$

式中 \mathcal{F}^{-1} 为傅里叶逆变换。在腔长漂移很小时, 有 $\alpha t_D \ll 1$, 可略去高阶小量, 得:

$$E_2(t) \approx \mathcal{F}^{-1}[(1 - j\alpha t_D)E(\omega)] = (1 - t_D d/dt)E(t) = D(t)E(t) \quad (7)$$

考虑到腔内的增益, 得到稳态方程:

$$gH(t)T(t)D(t)E(t) = E(t) \quad (8)$$

式中 g 为腔内的总增益。略去式中的二阶小量, 可得:

$$\left[g \frac{2}{\omega_{BW}^2} \frac{d^2}{dt^2} - g t_D \frac{d}{dt} - g m(\omega_m t)^2/2 + (g - 1)\right] E(t) = 0 \quad (9)$$

解得:

$$E(t) = E_0 \exp[-(t - t_1)^2/\tau^2], \quad \tau = \sqrt{2/(\omega_{BW} \omega_m)} (1/m)^{1/4}, \quad t_1 = \omega_{BW}^2 \tau^2 t_D/8 \quad (10)$$

可见, 当腔长发生微小漂移的情况下, 光脉冲信号经过调制器时与调制信号之间存在一相位差。由于腔长漂移量总是处于不断变化中, 上述相位差的大小也在不断变化, 导致输出脉冲序列中产生相位噪声。相位噪声的大小与腔长的漂移量成正比。因此可以此作为误差信号来判断腔长的漂移方向和大小。

2 实验装置

采用如图 2 所示的实验装置实现了主动锁模光纤激光器的稳定工作。

在此激光器中, EDFA 为 980 nm 双泵的掺铒光纤放大器, 其小信号增益为 40 dB, 最大的饱和输出功率为 17 dBm。LiNbO₃ 强度调制器其半波电压为 5 V, 插入损耗为 8 dB。调制器前的偏振控制器用于调整进入调制器的光场的偏振态, 使调制器获得最大的调制效率。光纤耦合器的耦合比为 1·9, 通过它将光功率的 10% 耦合输出到腔外。微波功率源产生的 2.5 GHz 调制信号加在调制器上, 使激光器能产生重复频率为 2.5 GHz 的光脉冲序列。

反馈控制电路的工作原理如下。输出脉冲的一部分由 PIN 接收, 经前置放大和滤波, 变成 2.5 GHz 正弦信号输入混频器。这一路信号可表示为

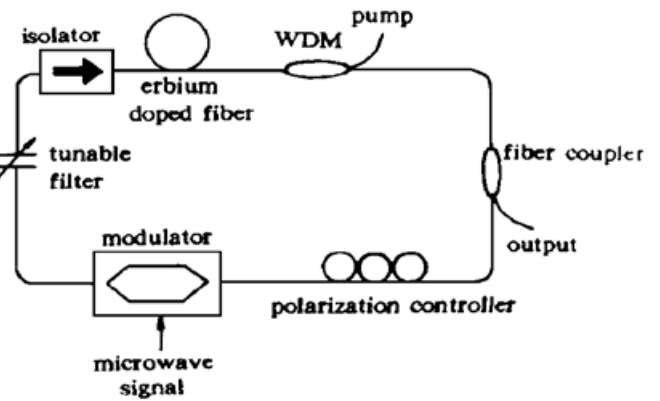


Fig. 1 The typical setup of an actively mode-locked fiber ring laser

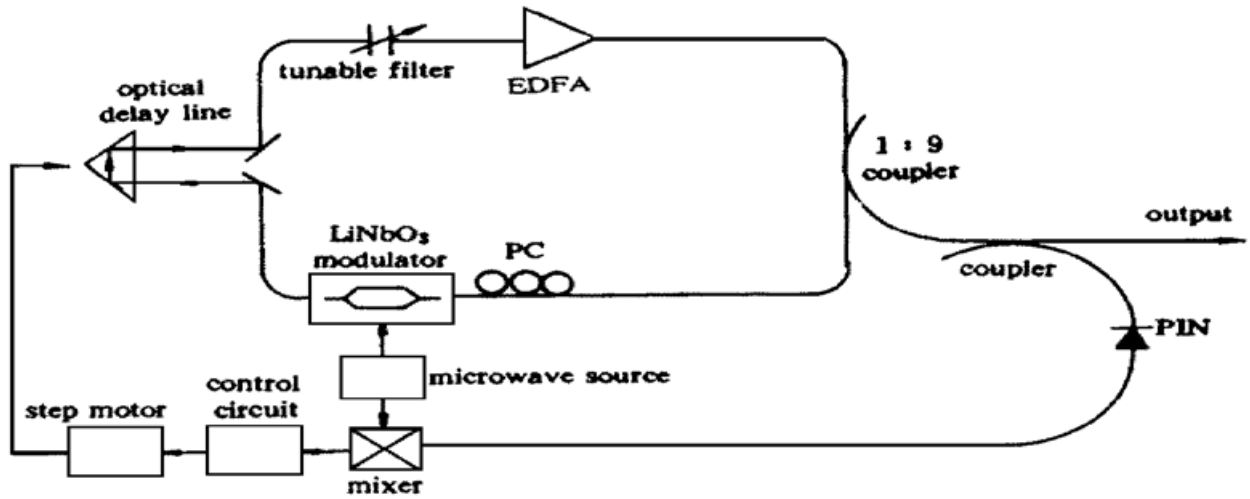


Fig. 2 Experimental setup of the stabilized actively mode-locked fiber ring laser

$$u_1(t) = U_1 \cos [\omega_m(t - t_1) + \phi_1] \tag{11}$$

式中 ϕ_1 为光脉冲在传输中由其它因素引入的相移，它是不变的。 t_1 为由腔长漂移引起的时延，由前面的分析知道，它正比于腔长的漂移量。输入混频器的另一路信号是直接由调制信号经过一个可调移相器后得到的，它的表达式为

$$u_2(t) = U_2 \cos (\omega_m t + \phi_2) \tag{12}$$

ϕ_2 为可调移相器引入的相移。如果调节 ϕ_2 使 $\phi_2 = \phi_1 - \pi/2$ 。那么混频后输出的直流分量为

$$y(t) = [K u_1(t) u_2(t)]_{DC} = (1/2) K U_1 U_2 \cos (\omega_m t_1 - \pi/2) = (1/2) K U_1 U_2 \sin \omega_m t_1 \approx (1/2) K U_1 U_2 \omega_m t_1 \propto t_1 \tag{13}$$

此时，当腔长与调制频率匹配时， $t_1 = 0$ ， $y(t) = 0$ ；而当腔长漂移变长时， $t_1 > 0$ ， $y(t) > 0$ ；反之， $t_1 < 0$ ， $y(t) < 0$ 。所以可由 $y(t)$ 作为误差信号来判断腔长漂移的方向。将误差信号 $y(t)$ 输入到控制电路中，转变为步进电机控制器所需的控制信号，调节延迟线，使 $y(t) > 0$ 时，延迟线变短，而 $y(t) < 0$ 时，延迟线变长，从而保证主动锁模光纤激光器的腔长稳定在与调制频率匹配的长度上。

3 实验结果

实验中观察到在不采取任何稳定措施时，主动锁模光纤激光器的稳定工作时间只有几分钟。图 3 为采取稳定措施前，工作 5 分钟前后从示波器上观察到的脉冲波形的变化情况。可见，仅仅 5 分钟脉冲波形就变得很不稳定，幅度也变小了。如果采用二次谐波强度自相关法测量此时主动锁模光纤激光器输出脉冲的自相关曲线，由于测量时间长，在测量期间脉冲波

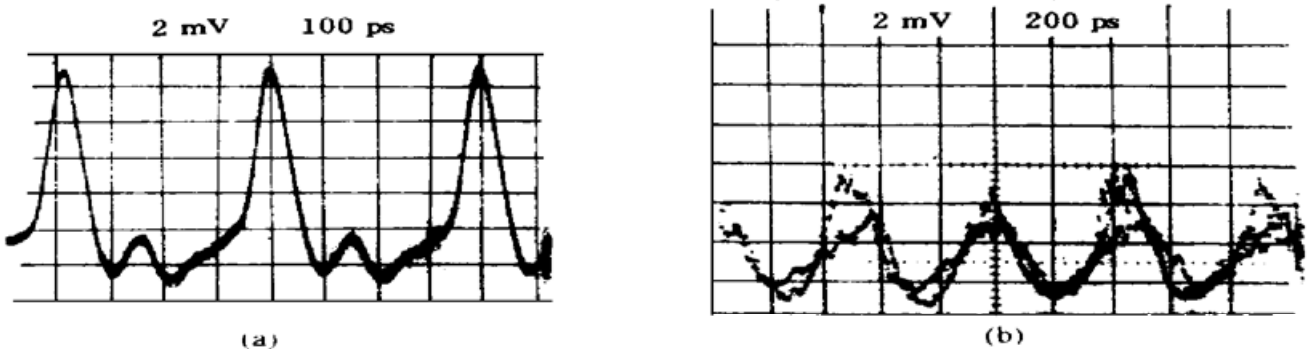


Fig. 3 The output pulse shapes observed in oscilloscope before the laser is stabilized: (a) Initial; (b) After 5 min

形的变化很大, 因而测出的曲线很不光滑, 形状也不规则, 无法反映输出波形的特性。

采用了上述反馈装置后, 主动锁模光纤激光器的稳定性有了很大提高。对主动锁模光纤激光器输出脉冲进行了连续 8 小时的观察。在这 8 小时工作期间, 从示波器上观察到的波形始终保持稳定光滑, 形状也基本不变。每隔一个小时测量一次脉冲的自相关曲线。所得自相关曲线始终很光滑, 且脉宽基本不变。图 4(a)、(b)、(c) 分别为初始时脉冲的自相关曲线以及工作 4 小时和 8 小时后脉冲的自相关曲线。自相关曲线显示输出脉冲宽度约为 19 ps。

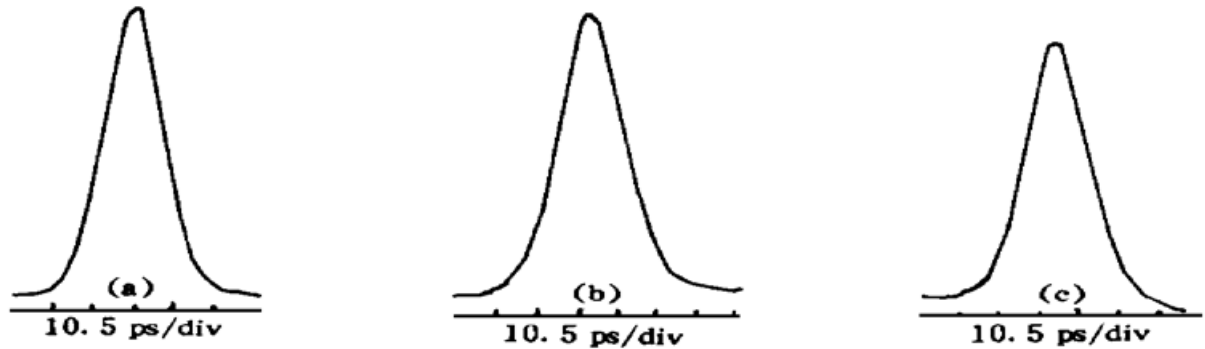


Fig. 4 Autocorrelation curves of the output pulses: (a) Initial; (b) After 4 hours; (c) After 8 hours
从趋势上看, 如果继续观察下去, 稳定工作时间还能更长。

以上实验结果显示, 抑制相位噪声法能有效地提高主动锁模光纤激光器的稳定性。

参 考 文 献

- [1] S. Kawanishi, H. Takara, T. Morioka *et al.*, Conference edition, 400 Gb/s TDM transmission of 0.98 ps pulses over 40 km employing dispersion slope compensation. *OFC'96*, San Jose, California, Optical Society of America, 1996, PD24-1~ PD24-5
- [2] T. Morioka, H. Takara, S. Kawanishi *et al.*, Conference edition, 100 Gb/s \times 10 channel OTDM/WDM transmission using a single supercontinuum WDM source. *OFC'96*, San Jose, California, Optical Society of America, 1996, PD21-1~ PD21-5
- [3] H. Takara, S. Kawanishi, M. Saruwatari, Stabilisation of a modelocked Er-doped fiber laser by suppressing the relaxation oscillation frequency component. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(4) : 292~ 293
- [4] X. Shan, D. Cleland, A. Ellis, Stabilising Er fiber soliton laser with pulse phase locking. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(2) : 182~ 184

Stabilizing Actively Mode-Locked Fiber Ring Laser by Suppressing the Phase Noise

Liu Jun Li Yuhua Lou Caivun Gao Yizhi

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 2 July 1997; revised 8 September 1997)

Abstract Cavity length shift is the main reason that causes the instability of an actively mode-locked fiber ring laser. We derived the relation between the phase noise of output pulses and the cavity length shift. By suppressing the phase noise, we made the actively mode-locked fiber ring laser operation stably for more than 8 hours.

Key words fiber ring laser, active mode-lock, Er-doped fiber amplifier.