

文章编号 : 0253-2239(2001)12-1474-04

大色散稳定腔长的光纤锁模激光器的锁模特性研究^{*}

于晋龙 马晓红 冯恩波 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: 报道了一种新型的采用大色散腔结构的光纤锁模激光器,它可以有效地克服激光器腔长抖动对锁模的不良影响。同时,实验中发现,该结构对超模噪声也有很好的抑制作用。完成了大色散腔、电光调制器调制的,稳定的光纤锁模激光器实验,得到形状为 sech^2 的光脉冲输出,脉冲宽度为 7.6 ps,脉冲带宽积为 0.335。

关键词: 光纤锁模激光器;稳定;窄脉冲源

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

1 引 言

高速率的主动光纤锁模激光器具有输出功率大、光脉冲质量高、波长可调谐等优点,是未来的高速率光纤通信系统尤其是光时分复用/波分复用光纤通信系统的理想信号源之一,很多高速率实验系统都采用该方案作为信号源^[1,2]。主动锁模光纤激光器由于腔长较长(几十到几百米),所以,腔长如何稳定成为锁模光纤激光器稳定工作的一个必须解决的问题。目前,主要有以下几种方案:采用光电锁相技术^[3]、再生锁模技术^[4]等。但这些方案都存在系统复杂、成本高的缺点,这极大地限制了光纤锁模激光器的实际应用。

最近,出现了若干有关大色散腔主动锁模激光器的研究报道^[5,6],这些报道的研究重点主要集中在通过改变调制频率对输出光脉冲的波长进行调谐,调制频率与波长的关系为

$$\frac{df_m}{d\lambda} \approx - \frac{f_m^2 [D_s(\lambda)L_s + D_d(\lambda)L_d]}{N}, \quad (1)$$

其中 D_s 和 D_d 分别为腔内普通单模光纤和色散补偿光纤的色散参量, N 为谐波次数, L_s 为环形腔内单模光纤长度, L_d 为环形腔内色散补偿光纤长度。在含有色散补偿光纤的大色散腔内,总的色散参量 D_{eff} 为负的,即

$$D_{\text{eff}} = \frac{D_s L_s + D_d L_d}{L} < 0,$$

因此,调制频率发生变化时,激光器中心波长将沿同

方向变化。

仅从波长调谐的角度来讲,该方案还有些问题需要解决:首先,对于实际的通信系统来说,信号的频率是按一定的标准设定的,不能任意调整;其次,为了避免掺铒光纤放大器带内增益的不平坦而导致的波长的竞争,对整个腔内在波长调谐范围内的增益平坦度有较高的要求。与普通采用滤波器进行波长调谐的方案相比,尽管省下一个调谐滤波器可降低成本,但代价是工作性能的不稳定,而对掺铒光纤放大器要求的提高又在很大程度上抵消了这个优势。

但是,如果从腔长的变化考虑,当腔长发生变化时,同样会导致波长的变化,而尽量保持锁模的稳定。换句话说讲,此时,腔长的不稳定转变为波长的不稳定。

将(1)式可转变为以腔长为变量的方程,可得到:

$$\frac{d\lambda}{dL} \approx \frac{n_{\text{eff}}}{D_{\text{eff}} L^2 C}. \quad (2)$$

(2)式表示了波长随激光器腔长变化的曲线, n_{eff} 为等效折射率。

从(2)式可以看出,当激光器的腔内色散增加后,由腔长变化导致的波长变化会减小。也就是说,在同样的增益带宽的条件下,大色散腔的激光器对于腔长的变化有更高的适应能力。

2 实 验

实验装置如图1所示。一个频率可调的微波信号源输出 10 GHz 的电信号,经过放大器放大后加到一个电光调制器上,对环形腔激光器提供外调制

^{*} 国家自然科学基金(69807002)、华为科学基金资助课题。

信号。一个掺铒光纤放大器用于提供腔内增益,其饱和输出功率为 18 dBm,小信号增益为 30 dB。在掺铒光纤放大器系统中还含有光隔离器(ISO),保证了光信号在腔内只能按一个方向运行。紧接掺铒光纤放大器之后是大色散量的色散补偿光纤(DCF),色散量 $D = -36 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$,长度为 159 m。可变光衰减器(ATT)用于改变腔内的增益,偏振控制器(PC)用于调节光信号的偏振态,保证与电光调制器相匹配。与通常报道的调谐波长的大色散腔锁模光纤激光器不同,在本实验系统中采用了一个宽带的可变光学滤波器作为波长调谐器件。滤

波器的带宽为 2.5 nm,调谐范围为 1530 nm ~ 1560 nm。经过多次测量并修正后,得到由腔长决定的基频为 834.478 kHz。对应的等效腔长为 246 m。由于在腔内没有采用光可变延时器,所以,在本实验中采用的是调节调制频率的办法来保证腔长与调制频率的匹配。此时输出的光脉冲含有较大的啁啾分量,故在输出端需要加入一段普通单模光纤(SMF)对其进行补偿,单模光纤的长度为 2.5 km。输出的光脉冲的波形由一带宽为 20 GHz 的高速率取样示波器观察,精确的脉冲宽度由自相关仪进行测量,光谱特性由精度为 0.1 nm 的光谱仪进行测量。

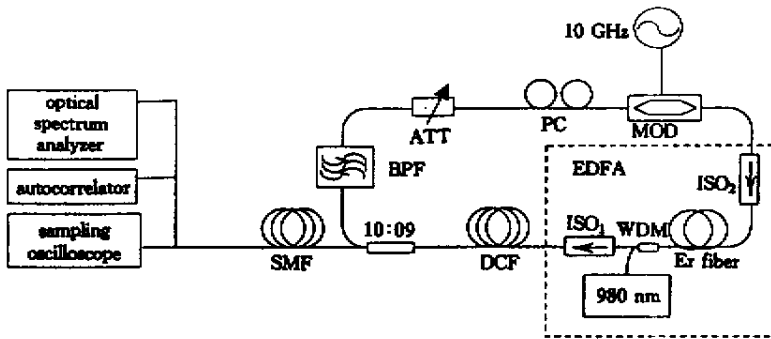


Fig. 1 The 10 GHz large dispersion cavity mode-locked fiber ring laser experimental scheme

图 2 是调制频率为 10.000358766 GHz 时(对应 11984 倍基频)锁模激光器得到的没有平均的光脉冲波形。可以看出,光信号脉冲的噪声非常低[这点从图 2(b)展宽后的波形可以更清楚地看出来]。

图 3 是输出光脉冲的光谱图,从光谱中可以清楚地看到起振的纵模结构。相邻的两个纵模的间隔

约为 0.08 nm 相对于 10 GHz 的调制频率。需要指出的是,由于光谱仪的精度为 0.1 nm,此光谱的精细结构有较大的失真而且测量的重复性不好,导致在光谱仪上观察到的小峰不稳定,而整个光谱的包络则保持相对稳定。脉冲光谱的宽度从示波器上判读为 0.328 nm,但考虑到光谱的精细结构的干扰,实际的光谱宽度应为整个光谱包络的半高宽。所以,光谱的实际半高宽约为 0.35 nm,稍大于仪器的判读结果。

图 4 是直接从环形腔输出的光脉冲的自相关曲线。对应脉冲的半极大全高宽为 17.2 ps,时间带宽积为 0.753。比较了理想的高斯波形的自相关曲线

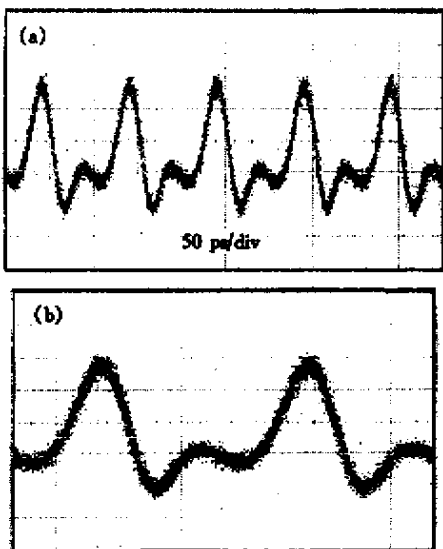


Fig. 2 Output waveform of the mode-locked fiber ring laser.
(a) Time base is 50 ps; (b) Time base is 20 ps

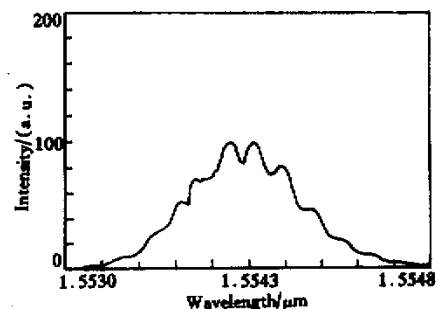


Fig. 3 Output optical spectra of the mode-locked fiber ring laser at wavelengths of 1554.3 nm

和实测光脉冲的自相关曲线,可以看出二者吻合很好,这与其他大色散腔的实验报道是一致的。

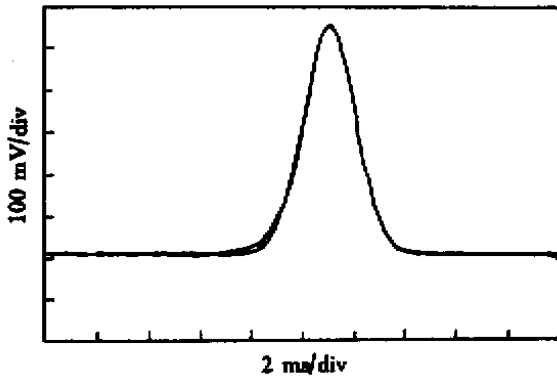


Fig.4 Autocorrelation trace of pulses before compressed by SMF, with fitted Gaussian profile, corresponding with 17.2 ps pulsewidth

在实验中,当测得环形腔的输出光脉冲的光谱和脉冲宽度时,可以通过下式大致估算输出光脉冲的啁啾系数 C :

$$\Delta f_{\text{FWTH}} = \frac{(1 + C^2)^{1/2}}{2.266 T_{\text{FWTH}}} \quad (3)$$

将实验参数代入,得到 $C = 1.38$ 。当计算出啁啾系数后,则可得出补偿所需的单模光纤的最佳长度为

$$L_{\text{opt}} = 0.36 T_{\text{FWTH}}^2 C [|\beta_2| (1 + C^2)] \quad (4)$$

由此式计算出的优化单模光纤长度为 2.34 km。但(4)式中忽略了非线性效应,所以还需要加以修正。

图 5 是经过 2.4 km 单模光纤补偿后的输出光脉冲的自相关曲线。脉冲的宽度为 7.6 ps,时间带宽积为 0.333。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 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。

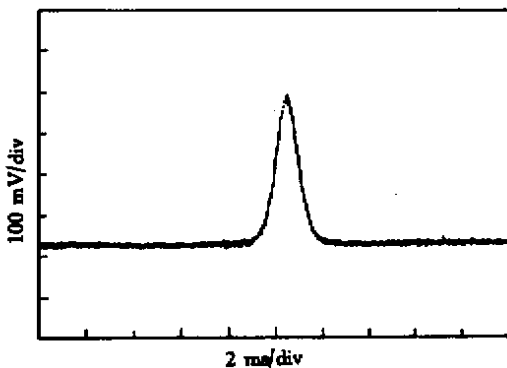


Fig.5 Autocorrelation trace of pulses after compressed by SMF, with fitted sech^2 profile, corresponding with 7.6 ps pulsewidth

用光功率计测得锁模激光器输出的平均光功率为 5 dBm,则可以大致估算此时脉冲的峰值光功率约为 42 mW。

通过改变可变光滤波器的中心波长,可对输出光脉冲的波长调谐。在 1529 nm ~ 1560 nm 的范围内均得到了稳定的锁模输出,即滤波器的最大的调节范围。图 6 是在不同波长上得到的脉冲的光谱。

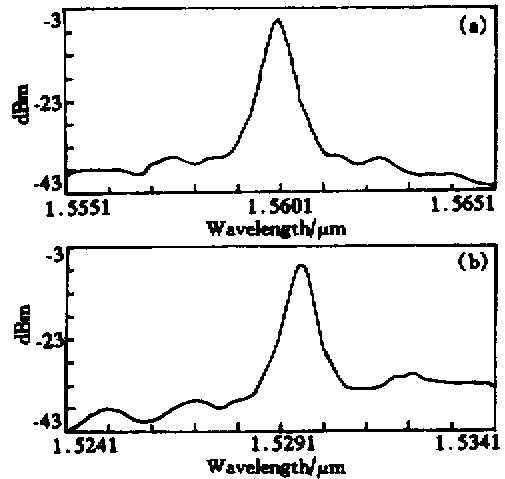


Fig.6 Output optical spectra of the mode locked fiber ring laser at wavelengths of 1560 nm (a), and 1529 nm (b)

在锁模激光器运行较长的时间内,观察到了由于腔长的漂移导致的光谱的中心频率的漂移,其变化范围小于 1 nm。与此同时,示波器上观察到的时域波形却始终保持了稳定的锁模输出。这个现象证明了我们当初的设想:通过采用大色散腔的结构,使激光器始终保持锁模状态,而不受腔长漂移的影响。

3 讨 论

实验中由环形腔输出的光脉冲经过 2.4 km 的单模光纤后,观察到了其形状由最初的高斯形改变成双曲正割形。这个现象主要是由于此时输出的光脉冲的峰值功率很高,光纤中的自相位调制和色散共同作用于光脉冲的结果。

腔内色散量大小的确定应主要考虑腔长的偏移量与滤波器和放大器决定的腔内的增益宽度。从(2)式可以看出,当色散量很小时,很小的腔长偏移会导致较大的光谱的漂移量。而当波长偏移出增益通带后,就会导致锁模激光器听失锁。所以较大的色散量有利于激光器的稳定运转。但当色散量过大时,在增益带宽内可能出现多个波长满足锁模条件,从而出现多波长运转的情况,出现竞争,导致激光器输出的不稳定。所以,最理想的情况下,应当是当增益带宽与调制频率移动一个基频导致的光中心波长

的偏移量一致。其数学表示为：

$$D_{\text{eff}} = -\frac{n_{\text{eff}}}{NC\Delta\lambda}. \quad (5)$$

在本文的实验中,没有采取任何腔长稳定的措施,而是将腔长的不稳定转化成为波长的漂移。尽管这样做可以保证较为稳定的锁模运转,但在很多应用场合中,这种波长的不稳定性也是不可接受的。

从这方面来看,这是本方案的一个缺点。但从另一方面来看,本方案将难于检测的腔长的变化转变成易于检测的波长的变化。只要通过类似波长锁定器之类的波长检测器件,将波长的变化检测出来,再反馈给腔长调节机构,就可以实现锁模激光器在时域和频域的稳定性。由于测量是在频域范围内进行的,所以可以采用与腔长的变化速率相匹配的低速率的器件就可以满足要求,避免了以往时域检测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的弊端,可以大大简化系统,降低系统的成本。

结论 报道了采用大色散腔结构的、电光调制器调制的主动锁模光纤激光器原实验。利用大色散将激光器腔长的漂移转变成成为波长的漂移,保证了激光

器稳定的锁模运转。同时,也为简单、低成本地检测锁模激光器腔长变化提供了一种可行的方案。

参 考 文 献

- [1] Kawanishi S. 3 Tbit/s (160 Gbit/s × 19 channel) optical TDM and WDM transmission experiment. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(10):826 ~ 827
- [2] Yamamoto T. TDM single channel 640 Gbit/s transmission experiment over 60 km using 400 fs pulse train and walk-off free, dispersion flattened nonlinear optical loop mirror. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(9):907 ~ 908
- [3] Nakazawa M, Yoshida E, Kimura Y. Ultrastable harmonically and regeneratively modelocked polarisation-maintaining erbium fibre ring laser. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(19):1603 ~ 1605
- [4] 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
- [5] Shu C, Zhao Y. Characteristics of dispersion-tuning in harmonically mode-locked fiber laser. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(8):1106 ~ 1108
- [6] Tamura K, Nakazawa M. Dispersion-tuned harmonically mode-locked fiber ring laser for self-synchronization to an external clock. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(24):146 ~ 9592

Mode-Locked Fiber Ring Laser Stabilization with a Large Dispersion Cavity

Yu Jinlong Ma Xiaohong Feng Enbo Dai Jufeng Yang Enze

(College of Electronics and Information Engineering, Tianjin University,

Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technical Science, EMC, Tianjin 300072)

(Received 1 June 2001; revised 6 July 2001)

Abstract: A stable mode-locked fiber ring laser with large dispersion cavity is demonstrated. In this laser, the instability caused by cavity length excursion is suppressed. At the same time, the super mode noise is suppressed too. A 10 GHz mode locked erbium-doped fiber ring laser using a large dispersion cavity developed, in which the pulse repetition rate is 10 GHz with sech^2 profile, the pulse width (FWHM) measured by autocorrelation meter is 7.6 ps, and the time-bandwidth product is approximately 0.335.

Key words: mode-locked fiber ring laser; stability; short optical pulses source