

非线性偏振旋转效应对主动锁模光纤 激光器脉冲成形及稳定性的影响

李玉华 娄彩云 刘 军 伍 剑 高以智

(清华大学电子工程系 北京 100084)

提要 讨论了非线性偏振旋转效应对主动锁模光纤环形激光器脉冲成形及稳定性所起的作用。定性分析和实验结果均表明,适当控制腔内非线性偏振旋转,可形成一种特殊状态,在这种状态下,非线性偏振旋转效应同时起到压窄脉冲和改善稳定性的作用。

关键词 主动锁模光纤环形激光器,非线性偏振旋转效应,稳定性

利用非线性偏振旋转效应压窄脉冲是被动锁模光纤激光器中实现被动锁模的一种典型方法^[1]。它的基本原理是光经过一段光纤时,发生非线性偏振旋转,旋转量和光强有关。如果控制随后经过的偏振元件的偏振选择方向,可使强光透过率大,弱光透过率小,即可在腔内形成等效的可饱和吸收体。当光脉冲经过这一可饱和吸收体时,中心部分透过率大,前后沿透过率小,从而压窄脉冲并形成被动锁模。如果在主动锁模光纤激光器中放置上述等效饱和吸收体,同样可以起到压窄光脉冲的作用^[2]。

主动锁模光纤激光器的一个关键问题是如何保证其稳定运转。影响其稳定运转的首要问题是腔长与调制频率的严格匹配。这一问题可以采取提取误差信号控制腔长的方法解决^[3]。然而,对于高重复频率运转的主动锁模光纤激光器,由于腔长通常为数十米至数百米量级,调制频率是纵模间隔的 N 倍,即纵模指数为 q 的纵模和纵模指数为 $q + N, q + 2N, \dots$ 的纵模相位锁定,形成一纵模。这样一纵模称为超模。同时可看到,纵模指数为 $q + m, q + N + m, q + 2N + m, \dots$ (m 为任意整数) 的一纵模之间相位锁定时也构成一组超模。但超模与超模之间不存在固定的相位关系。各组超模间的竞争会造成光脉冲的幅度抖动。即使在腔长与调制频率匹配的情况下也无法抑制超模竞争引起的抖动。

我们设想,利用光脉冲在光纤中的非线性偏振旋转效应,并适当控制随后的偏振元件的偏振选择方向,使强光的透过率小,弱光的透过率大,就可以形成一种等效的可饱和透射体。这种等效的可饱和透射体可以起到抑制光脉冲的幅度抖动的作用,提高主动锁模光纤激光器的稳定性。然而,这种等效的可饱和透射体的副作用是使脉冲展宽,不利于得到窄脉冲。

综合以上两种情况,适当调节主动锁模光纤激光器腔内偏振元件的偏振选择方向,可形成一种特殊状态。即在脉冲的中心部分非线性偏振旋转效应导致饱和透射,在脉冲的前后沿则表现为饱和吸收。在这种状态下,脉冲顶部的幅度抖动因饱和透射而得以抑制,同时脉冲主体因

饱和和吸收而有所压窄。

根据以上设想,我们在主动锁模光纤激光器中插入偏振器与偏振控制器,以形成上述等效饱和吸收体与饱和透射体。实验证明,确能利用以上效应,同时实现压窄脉冲和抑制超模竞争引起的抖动,当同时控制腔长使其与调制频率匹配时,主动锁模光纤激光器可长期稳定运转,稳定运行时间超过 $8\text{ h}^{[3]}$ 。本文对以上效应进行了定性分析,其结果与实验相一致。

1 实验装置

实验装置如图 1 所示。光路部分由掺铒光纤放大器(EDFA)、1:9 光纤耦合器、偏振器、铌酸锂(LiNbO_3)强度调制器、可调谐光纤滤波器、光学延迟线、色散位移光纤(DSF)和 3 个偏振控制器组成。EDFA 提供光信号增益。在 EDFA 内置有光隔离器,可以保证主动锁模光纤环形激光器的单向运转。 LiNbO_3 强度调制器由 2.5 GHz 微波源驱动。由于其偏振敏感特性,因而在其输入端加了一个偏振控制器 PC_3 ,以保证最佳的调制效率。可调谐光纤滤波器带宽为 1 nm。光纤腔由非保偏的光纤及器件组成,光纤腔的总长度为 160 m,对应的相邻纵模间隔为 1.36 MHz。在腔内插入偏振控制器 PC_1 、 PC_2 及偏振器的目的是利用非线性偏振旋转效

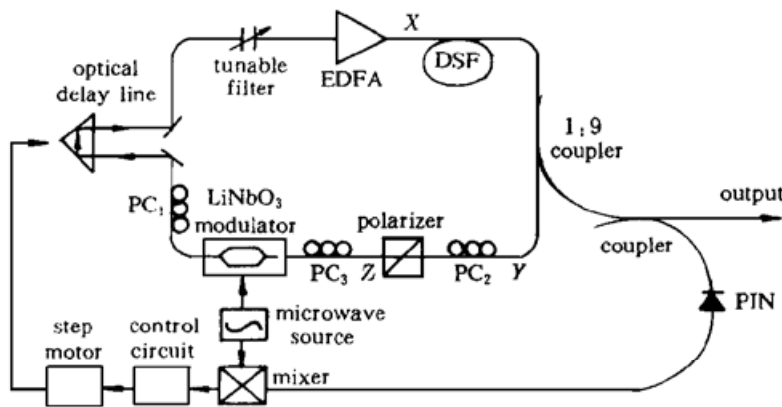


图 1 可长时间稳定工作的主动锁模光纤环形激光器

Fig. 1 Experimental setup of the stabilized actively mode-locked fiber ring laser

应在腔内形成等效的可饱和吸收体与可饱和透射体,其原理将在下一部分讨论。图 1 中其余的部分用于反馈控制腔长,经 1:9 耦合器输出到腔外的光信号再经过一个耦合器分出其中一小部分光馈入高速光电探测器(PIN),检测出的信号与微波调制信号混频后得到与腔长漂移量有关的误差信号,经控制电路处理以后驱动步进电机,达到负反馈控制腔长的目的。

图 1 中其余的部分用于反馈控制腔长,经 1:9 耦合器输出到腔外的光信号再经过一个耦合器分出其中一小部分光馈入高速光电探测器(PIN),检测出的信号与微波调制信号混频后得到与腔长漂移量有关的误差信号,经控制电路处理以后驱动步进电机,达到负反馈控制腔长的目的。

图 1 中其余的部分用于反馈控制腔长,经 1:9 耦合器输出到腔外的光信号再经过一个耦合器分出其中一小部分光馈入高速光电探测器(PIN),检测出的信号与微波调制信号混频后得到与腔长漂移量有关的误差信号,经控制电路处理以后驱动步进电机,达到负反馈控制腔长的目的。

2 利用非线性偏振旋转效应压窄脉冲和抑制抖动的定性分析

在图 1 所示的主动锁模光纤环形激光器中,由于 LiNbO_3 调制器的插入损耗较大(8 dB),调制器后的光纤内光强较弱,可以认为非线性效应主要发生在 80 m DSF 中。在图 1 中,假设 X 处光场与 DSF 光纤快轴(x 轴)成 α_1 角(该角度可通过调节偏振控制器 PC_1 加以改变), Y 处光纤快轴(x' 轴)与偏振器透过方向成 α_2 角(该角度可通过调节偏振控制器 PC_2 加以改变)。从 X 到 Z 的偏振态变化情况如图 2 所示,其中 Y' 为只考虑线性双折射时 Y 点出射光的偏振方向。 Y 为考虑非线性偏振旋转效应后 Y 点出射光的偏振方向,相对于 Y' 而言,非线性偏振旋转效应引起的附加偏振旋转角度为 θ , $\theta \propto P^{[4]}$, P 为光场的瞬时功率。由于偏振器的作用,从 Z 点出射的光场偏振方向与偏振器透过方向一致,其光场强度为 Y 点光场强度的余弦分量。因此由非线性

性偏振旋转效应引起的等效透过率与光场的瞬时功率的关系为余弦曲线。在不同的条件(α_1, α_2) 下, 腔内脉冲功率零点(即 $P = 0$) 可以对应于曲线的不同位置, 如图 3 所示。其中 A 对应于饱和吸收状态, B 对应于饱和透射状态, C 在脉冲底部对应于饱和吸收状态, 在顶部对应于饱和透射状态。当工作在 A 区时, 可以压窄脉冲, 但脉冲的瞬时抖动有所加剧; 工作在 B 区时, 可以抑制脉冲的瞬时抖动, 但脉冲随之展宽; 如果工作在 C 区, 则可以同时压窄脉冲和抑制脉冲的瞬时抖动。不过不难发现, 在 C 区时, 由于透过率曲线变化比较平缓, 脉冲压窄的效果相对于 A 区来说要弱, 抑制脉冲抖动的效果则不如 B 区。

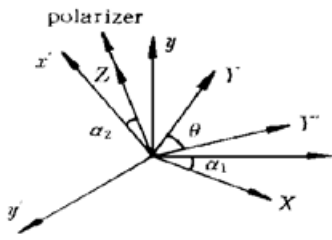


图 2 偏振态的变化情况

x, y : X 处光纤的快慢轴; x', y' : Y 处光纤的快慢轴

Fig. 2 Variation of the polarization state

x, y : fast and slow axis of DSF at point X ;

x', y' : fast and slow axis of DSF at point Y

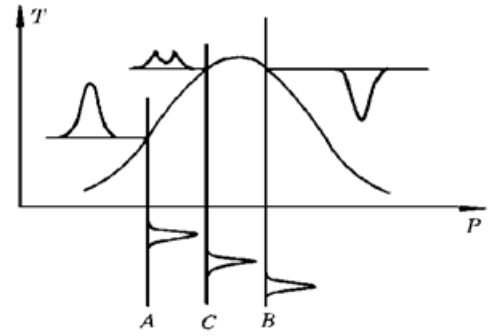


图 3 在不同状态下由非线性偏振旋转导致不同的光强透过率

Fig. 3 Different transmission effects due to nonlinear polarization rotation

3 实验结果

在图 1 所示的实验装置中, 在相同的泵浦及调制深度等条件下, 调节偏振控制器 PC_1, PC_2 至不同状态, 输出光脉冲的自相关曲线分别如图 4 (a) ~ (c) 所示, 经标定后脉宽分别为 13.1 ps, 27.8 ps 和 18.9 ps。去掉偏振控制器 PC_1, PC_2 及偏振器以后, 可认为腔内的非线性偏振旋转效应不起作用, 此时得到输出光脉冲的自相关曲线如图 4 (d) 所示, 标定后的脉宽为 22.5 ps。

为了验证非线性偏振旋转效应对脉冲抖动的影响, 我们观察了上述 4 种状态下输出脉冲的超模模间拍频信号(即超模噪声)的频谱, 分别如图 5 (a) ~ (d) 所示。其中的 0 Hz 分量为频谱仪的本底, 其大小没有实际意义。对处于谐波锁模状态的主动锁模光纤激光器而言, 由于超

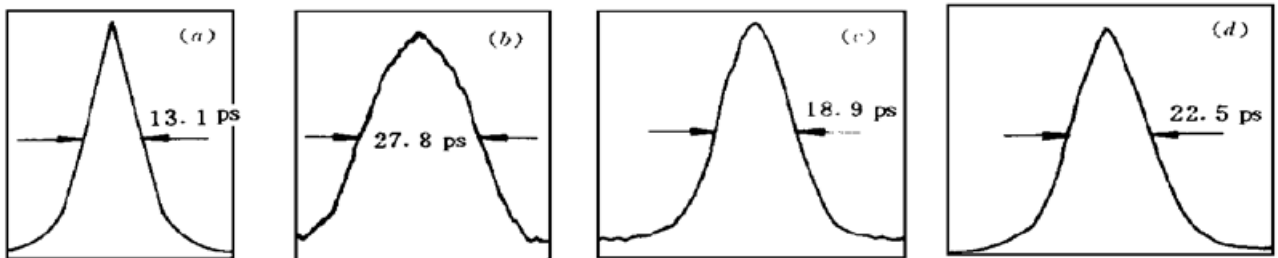


图 4 不同条件下输出脉冲的自相关曲线(标定后的时间坐标 10.5 ps/div)

Fig. 4 Autocorrelation curve of output pulses (calibrated time scale: 10.5 ps/div)

模竞争的存在直接导致激光器输出脉冲的幅度抖动,因此最理想的情况是腔内只有一组超模起振,反映在频谱仪上的拍频分量只有 0 Hz, 2.5 GHz, 5 GHz 等频率分量。在一般情况下,若不采取特殊措施抑制超模竞争,腔内将有多组超模起振,它们之间的相互拍频将会产生新的频率分量,即超模噪声,超模噪声信号的频率是激光器纵模间隔(图 1 所示激光器的纵模间隔为 1.36 MHz)的整数倍。在图 5 (a) ~ (c) 所对应的 3 种状态下,以频率为 1.36 MHz 的超模拍频分量的幅度为衡量超模噪声的标志,相对于图 5 (d) 而言,(a) 的超模噪声上升了 6 dB, (b) 和 (c) 则分别下降了 15 dB 和 9 dB。

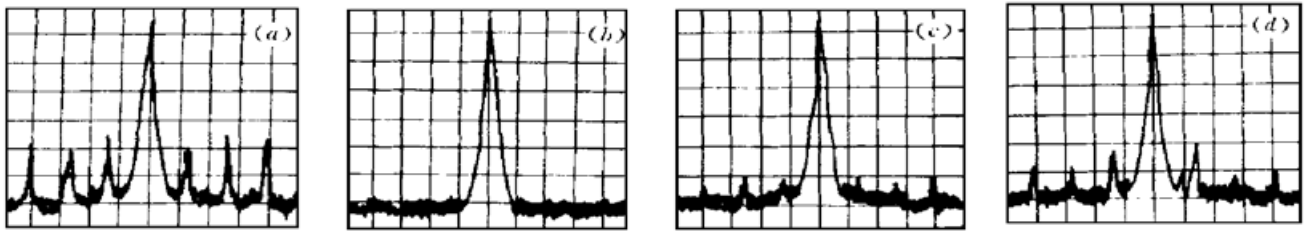


图 5 不同条件下输出脉冲的超模频谱(中心频率 0 Hz, 横坐标 1 MHz/div, 纵坐标 10 dB/div)

Fig. 5 Supermodes spectrum of output pulses

(center frequency: 0 Hz, horizontal scale: 1 MHz/div, vertical scale: 10 dB/div)

通过图 3~ 5 的对比,不难发现图 4 (a), 5 (a) 对应于图 3 的 A 区,此时脉冲最窄,但是超模竞争最明显;图 4 (b), 5 (b) 对应于图 3 的 B 区,此时超模竞争抑制的效果最好,但脉冲也最宽;图 4 (c), 5 (c) 对应于图 3 的 C 区,此时得到的光脉冲相对于没有非线性偏振旋转效应时的脉冲(其自相关曲线如图 4 (d) 所示)要窄,而且超模竞争抑制的效果也要优于没有非线性偏振旋转效应的情况(图 5 (d))。

参 考 文 献

- 1 V. J. Matsas, T. P. Newson, D. J. Richardson *et al.*. Selfstarting passively mode-locked fibre ring soliton laser exploiting nonlinear polarisation rotation. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(15): 1391~ 1393
- 2 T. F. Carruthers, I. N. Duling [—], M. L. Dennis. Active-passive modelocking in a single-polarisation erbium fibre laser. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(13): 1051~ 1053
- 3 Liu Jun, Li Yuhua, Lou Caiyun *et al.*. Stabilizing actively mode-locked fiber ring laser by suppressing the phase noise. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(7): 956~ 959 (in Chinese)
- 4 G. P. Agrawal, Translated by Hu Guojiang, Huang Chao. Nonlinear fiber optics. Tianjin: Tianjin University Press, 1992. 202~ 203 (in Chinese)

Influence on Pulse Shaping and Stability of Nonlinear Polarization Rotation in an Actively Mode-locked Fiber Laser

Li Yuhua Lou Caiyun Liu Jun Wu Jian Gao Yizhi

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

Abstract In this paper, the roles of nonlinear polarization rotation in an actively mode-locked fiber ring laser were discussed. Both qualitative analysis and experimental results indicate that there is a special state at appropriate conditions in the ring cavity. In this state, both pulse compression and stability improvement can be achieved.

Key words actively mode-locked fiber ring laser, nonlinear polarization rotation, stability