

基于脉冲强度相关调制的新型主动锁模激光器

王瑞鑫 杨蒙 张钦娟 刘政 安旭东 陈晓晨

中国信息通信研究院泰尔终端实验室, 北京 100191

摘要 提出了一种基于脉冲自身强度相关调制的新型全保偏主动锁模激光器。利用脉冲强度前馈结构结合双驱动强度调制器, 实现与脉冲自身强度相关的幅度调制, 形成两种完全不同的稳定锁模状态。理论研究了脉冲前馈在主动锁模中的作用, 实验验证了脉冲前馈在 10 GHz 谐波锁模时抑制了超模噪声, 在基频锁模时可饱和吸收。该激光器工作稳定, 具有多种输出脉冲特性。

关键词 激光器; 光纤激光器; 锁模激光器; 强度相关调制; 脉冲传播; 时域孤子

中图分类号 TN248 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.061401

Actively Mode-Locked Lasers Based on Pulse Self-Intensity-Dependent Modulation

Wang Ruixin Yang Meng Zhang Qinjuan Liu Zheng An Xudong Chen Xiaochen

CTTL-Terminal, China Academy of Information and Communication Technology, Beijing 100191, China

Abstract A novel all-polarization-maintained actively mode-locked laser with pulse self-intensity-dependent modulation is proposed. The pulse feed-forward structure and the dual-drive modulator are combined to realize the self-intensity-dependent modulation and two completely different stable mode-locking regimes. The function of the pulse feed-forward is studied theoretically. The experimental results demonstrate that the pulse feed-forward path suppresses supermode noise in the 10 GHz mode locking and makes absorption saturate in the fundamental mode-locking regime. Thanks to the multiple output property and stable operation, many applications will benefit from the novel laser.

Key words lasers; fiber lasers; mode-locked lasers; intensity-dependent modulation; pulse propagation; temporal solitons

OCIS codes 140.3510; 060.4510; 140.4050; 060.5530

1 引言

超快光纤激光器是一种非常有吸引力的光源^[1-3], 在光通信、光原子钟、光采样和光相干层析技术等工业和科研领域应用广泛。主动锁模是产生高速超短脉冲的有效方式, 其原理是利用外部时钟直接调制激光腔, 产生与外部时钟同步的锁模脉冲。

主动锁模一般工作在谐波锁模状态, 采用频率为激光器基频整数倍的射频信号进行调制(通常为 10 GHz), 产生高速超短脉冲。美国 Delfyett 研究组利用相位调制或强度调制实现多种类型的主动锁模^[4-5], 但输出脉冲重复频率都在 10 GHz 以上, 并且激光器结构复杂、难以调节。国内报道的主动锁模超短脉冲重复频率较高(2.5 GHz 以上), 超模噪声问题尚未得到很好的解决^[6-7]。然而, 对于一些数据采集过程, 如生物采样、光采样示波器等, 10 GHz 重复频率太高。采用频率为激光器基频的射频信号进行调制, 可以产生低重复频率的锁模脉冲, 但产生的脉冲宽度非常大^[8], 通常为纳秒量级, 并不是超快过程所需要的皮秒或飞秒脉冲。

收稿日期: 2015-12-17; 收到修改稿日期: 2016-01-06; 网络出版日期: 2016-05-11

作者简介: 王瑞鑫(1989—), 男, 博士, 工程师, 主要从事光纤激光器、微波光子学、光电振荡器和无线通信等方面的研究。

E-mail: wangruixin@caict.ac.cn

本文提出并验证了一种基于脉冲自身幅度相关调制技术的主动锁模结构,与传统主动锁模不同的是,这种结构利用脉冲前馈可以实现基频主动锁模和 10 GHz 主动锁模,从而产生皮秒级超短脉冲,并且可在不改变腔结构的情况下实现两种锁模状态的自由切换。激光器的调制信号始终为 10 GHz,并不需要与基频相同的射频信号。该结构比较稳定,输出脉冲易与外部时钟同步,具有广阔的应用空间。

2 实验结构及原理

主动锁模光纤激光器实验装置如图 1 所示。激光器包含一段 2 m 长的保偏掺铒光纤(EDF),在 1530 nm 波长处吸收系数为 55 dB/m。抽运源是 976 nm 的激光二极管,通过 980 nm/1550 nm 的保偏波分复用器(WDM)对掺铒光纤进行抽运。双驱动马赫-曾德尔调制器(MZM)带宽为 10 GHz,它的一个端口被正弦型射频信号调制,从而实现主动锁模。由于 MZM 的偏振相关损耗较低,故用起偏器保证 MZM 工作在正确的偏振态。保偏隔离器用来实现腔内光束的单向传输,30% 的保偏耦合器用来输出光脉冲。腔内其余光纤均为保偏单模光纤,激光器为全保偏结构。激光器腔长约为 12 m,对应基频约为 16.67 MHz。

与传统主动锁模光纤激光器不同,该结构还包含一个前馈路径,包括光可调延迟线(ODL)、20 GHz 带宽的光电探测器(PD)和一个宽带增益可调放大器(VGA)。激光器输出的一半功率耦合进入前馈路径,剩余部分进入 MZM。通过调整前馈路径的 ODL,实现脉冲从前馈路径与腔内光路径(图 1 中 A 点到 B 点)经历相同的传输时间,同时到达 MZM。因此,腔内的每个光脉冲不仅被射频(RF)正弦信号源产生的正弦信号调制,还被脉冲自己产生的同步射频信号调制。实验中,脉冲前馈强度可以通过改变微波放大器的增益来调节。改变前馈信号的的正负,激光器可以工作在完全不同的锁模状态,输出的脉冲特性也不尽相同。

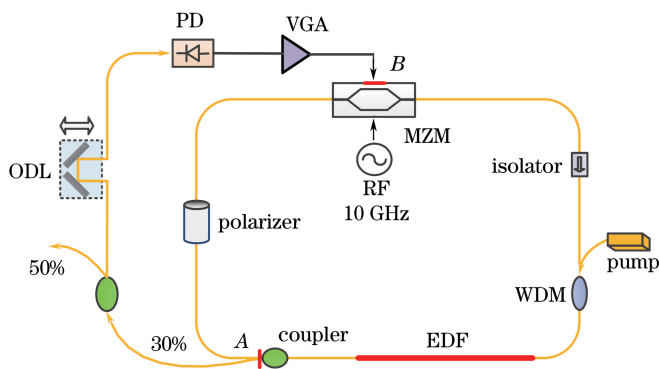


图 1 基于脉冲前馈的主动锁模光纤激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic of actively mode-locked fiber laser based on pulse feed-forward

在合适的偏置点,MZM 会利用每个光脉冲自身的强度曲线来进行调制,从而形成脉冲功率相关的窗口效应。偏置在正交偏置点,双驱动 MZM 传输曲线可表示为^[9]

$$T = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \sin \left[\frac{\pi}{V_{\pi}} (V_{\text{RF}} \pm V_{\text{PIFF}}) \right] \right\}, \quad (1)$$

式中 V_{π} 为 MZM 的半波电压, V_{RF} 和 V_{PIFF} 分别为 RF 正弦波信号和脉冲前馈信号的电压,同时驱动 MZM 的不同端口,可以表示为

$$V_{\text{RF}} = A \cos(2\pi ft), V_{\text{PIFF}} = Bp(t), \quad (2)$$

式中 f 为调制频率, $p(t)$ 为 PD 探测到的脉冲强度, A 和 B 分别为 RF 信号和前馈信号的强度。利用小信号近似,(1)式可展开为

$$T \approx \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\pi}{V_{\pi}} A \right) \pm \frac{\pi}{2V_{\pi}} Bp(t), \quad (3)$$

式中假设射频信号的周期非常长,相比于锁模后的超短光脉冲宽度可近似为常数。

(3)式表明脉冲强度可以前馈并且同步到 MZM 的正向或反向端口。通过改变前馈信号的符号,激光器锁模的原理发生变化,从而形成完全不同的锁模机制,输出具有不同特性的光脉冲:1) 偏置在反向端口时,

MZM 工作在脉冲强度限制状态,与被动锁模非线性偏振旋转效应形成的强度相关损耗类似^[10]。腔内脉冲强度越大,经过 MZM 后引起的损耗越大,进而产生脉冲均衡的效果;2) 偏置在正向端口时,MZM 工作在类似可饱和吸收体状态,腔内不同强度的脉冲经历不同的损耗。脉冲强度越大,经过 MZM 后损耗越小。

3 实验结果及讨论

3.1 10 GHz 主动锁模

如图 2(a)所示,当前馈信号的符号为负时,腔内光脉冲被自身的反向信号所调制,不同强度的脉冲经历不同的损耗。根据(3)式,腔内光脉冲强度越大,产生的反向前馈电信号越强,经历的损耗越大。选择合适的前馈强度可以抑制脉冲和脉冲之间的强度起伏,最终输出幅度均衡的光脉冲序列。激光器工作在驱动频率状态,即输出的脉冲重复频率与 RF 调制频率相同。

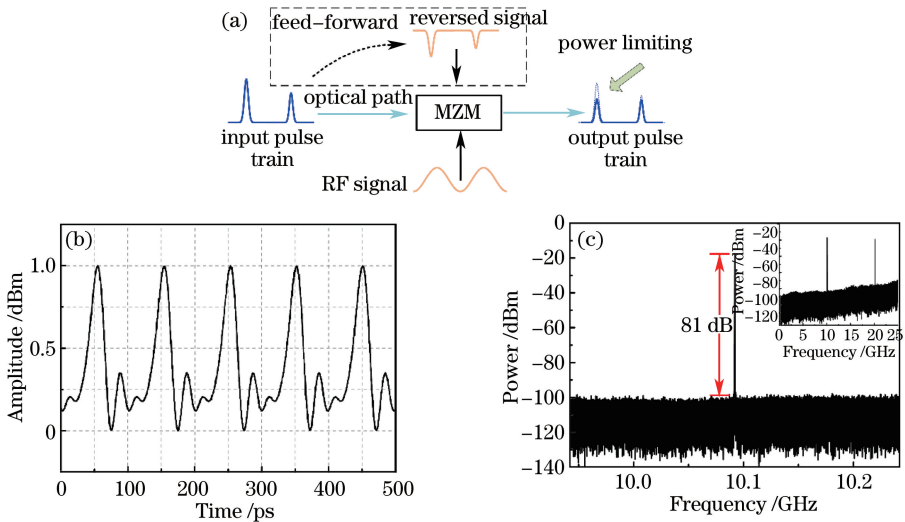


图 2 (a) 双驱动 MZM 及前馈路径的原理和功能; (b) 10 GHz 脉冲串的示波器曲线; (c) 300 MHz 范围内的输出射频谱(插图为 26 GHz 范围内的射频谱)

Fig. 2 (a) Principle and function of MZM and feed-forward path; (b) oscilloscope trace of 10 GHz pulse train; (c) RF spectrum of the pulse within 300-MHz (the inset shows the RF spectrum of the pulse within 26 GHz)

实验中 RF 正弦信号的频率为 10 GHz,激光器的抽运阈值为 21.6 dBm。调整前馈强度至合适值,激光器实现稳定锁模。图 2(b)所示为抽运功率为 23 dBm 时,高速示波器测量的激光器典型脉冲序列,半峰全宽为 22 ps。激光器输出的光功率为 3 dBm。图 2(c)所示为光纤激光器的射频谱,在 0~300 MHz 范围内没有出现超模噪声,超模噪声抑制比大于 80 dB。插图为激光器输出 10 GHz 射频信号及其谐波,在频谱仪的整个范围内,只有 10 GHz 和 20 GHz 成分。

图 3(a)所示为 0.02 nm 分辨率下测得的 10 GHz 主动锁模光谱图,中心波长为 1556.86 nm,3 dB 带宽

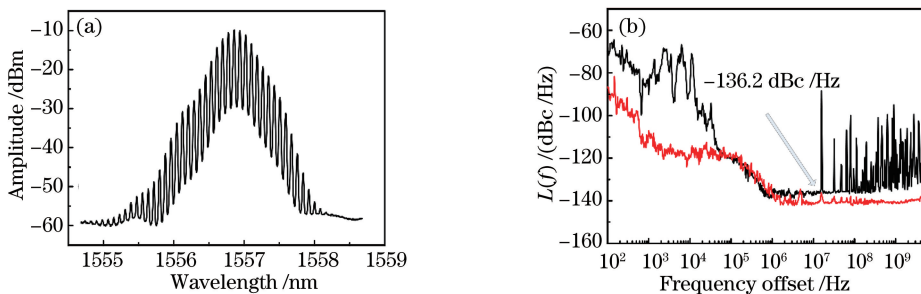


图 3 (a) 0.02 nm 分辨率下的光谱; (b) 激光器输出脉冲串的单边带相位噪声曲线

Fig. 3 (a) Optical spectrum with wavelength resolution of 0.02 nm;

(b) residual phase noise spectra of the mode-locked pulse train

为 0.36 nm。从光谱中可以看出,激光器的模式间隔为 0.08 nm,对应约 10 GHz 的脉冲重复频率。模式间隔清晰,并未出现畸变,表明激光器锁模状态稳定。脉冲的时间带宽积为 0.98,表明脉冲具有腔内色散引入的啁啾。利用频谱分析仪的相位噪声测量功能测量 10 GHz 射频信号的单边带相位噪声,如图 3(b)所示,其中黑色曲线为不采用脉冲前馈时,激光器输出 10 GHz 射频信号的相位噪声,红色曲线为采用脉冲前馈时的相位噪声。通过激光器的开环延时匹配及针对激光器输出结果的前馈延时优化,实现了腔内脉冲和前馈脉冲的精确对准。从图 3 可以发现,脉冲前馈有效抑制了谐波主动锁模的超模噪声,也印证了前面提到的反向端口可抑制脉冲和脉冲间强度浮动的理论。激光器相位噪声内第一个超模噪声低于 -136 dBc/Hz。

3.2 基频主动锁模

当脉冲前馈同步至 MZM 的正向端口时,前馈信号并没有反向,因此 MZM 工作在可饱和吸收状态,如图 4(a)所示。抽运功率为 18.57 dBm 时,调整前馈强度至合适值,激光器形成稳定的基频锁模。图 4(b)为输出脉冲的示波器曲线,脉冲串具有均匀的时间间隔,约 60 ns,等于激光器腔内的单次往返时间。此外,利用频谱分析仪测量了激光器输出脉冲串的频域特性,如图 4(c)所示。激光器的重复频率约为 16.667 MHz,在 0~300 MHz 频率范围内基频及谐波频率等间隔排列,并没有其余边带出现,证实了激光器稳定在基频锁模状态。

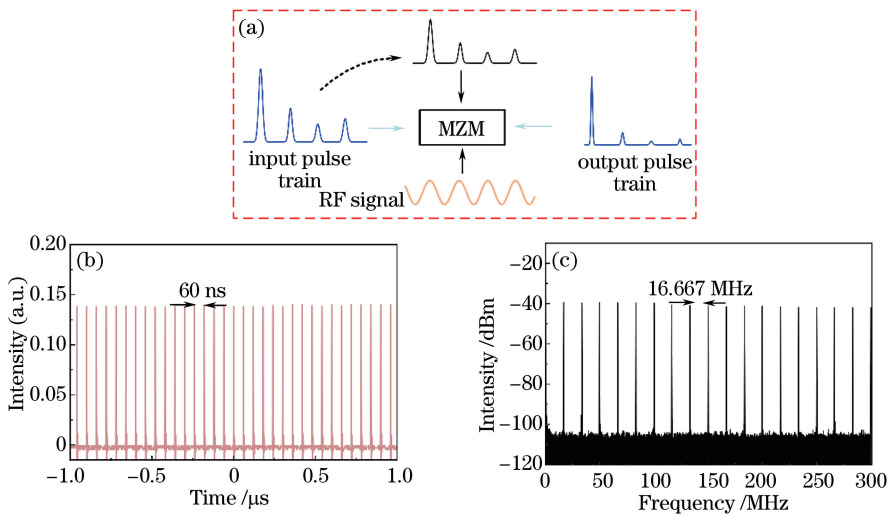


图 4 (a) 基频锁模时 MZM 结合脉冲前馈的作用; (b) 基频锁模脉冲的示波器曲线; (c) 300 MHz 范围内的射频谱

Fig. 4 (a) Function of MZM with a pulse feed-forward path in the fundamental mode locking;

(b) oscilloscope trace of the fundamentally mode-locked pulse train; (c) RF spectra of the pulse within 300 MHz

图 5(a)所示为基频锁模时利用自相关仪测得的脉冲自相关曲线,并与 sech^2 曲线拟合良好。脉冲宽度为 1.4 ps,自相关曲线光滑,没有任何尖刺或其他结构,未出现光波分裂,证明了激光器稳定的基频锁模状态。相对应,图 5(b)所示为激光器 0.02 nm 分辨率下的光谱形状,中心波长为 1560.6 nm,半峰全宽为 2.17 nm。脉冲的时间带宽积为 0.374,说明激光器输出脉冲为孤子且频率啁啾较小。

如图 5(b)所示,光谱的边带由孤子和色散波的干涉所形成,体现了脉冲的孤子特性^[11-12]。孤子的阶数

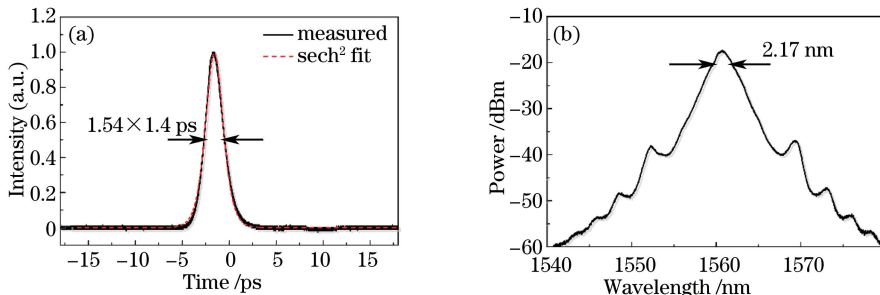


图 5 (a) 激光器输出脉冲的自相关曲线和 sech^2 拟合曲线; (b) 脉冲的光谱形状

Fig. 5 (a) Autocorrelation trace of output pulse and sech^2 fit; (b) optical spectrum of the pulse

为 1, 意味着输出脉冲为基频孤子脉冲。激光器的抽运阈值为 17.48 dBm, 抽运功率为 20.17 dBm 时, 激光器最大输出功率为 0.79 dBm, 对应单脉冲能量约为 72 pJ。进一步增加抽运功率, 激光器出现光波分裂现象。实验结果印证了双驱动 MZM 结合脉冲前馈可以工作在可饱和吸收状态, 从而支持激光器在高速 RF 信号调制下实现单脉冲运转, 而不是运转在多脉冲或类噪声状态^[13]。

4 结 论

提出了一种新型主动锁模光纤激光器, 利用脉冲自身幅度相关的调制技术, 实现两种完全不同的锁模状态。利用脉冲前馈技术及其与双驱动 MZM 产生的正/负调制作用, 使激光器工作在 10 GHz 谐波锁模和 16.67 MHz 基频锁模状态。结果说明调制器结合特殊调制方式可以实现类似被动锁模的特点, 输出的超短脉冲结合了主动锁模和被动锁模的优势, 具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Wang R X, Dai Y T, Yan L, *et al.*. Dissipative soliton in actively mode-locked fiber laser[J]. *Opt Express*, 2012, 20(6): 6406-6411.
- 2 Wang R X, Dai Y T, Yin F F, *et al.*. High-repetition-rate, stretch-lens-based actively mode-locked femtosecond fiber laser[J]. *Opt Express*, 2013, 21(18): 20923-20930.
- 3 Wang R X, Dai Y T, Yin F F, *et al.*. Linear dissipative soliton in an anomalous-dispersion fiber laser[J]. *Opt Express*, 2014, 22(24): 29314-29320.
- 4 Quinlan F, Gee S, Ozharar S, *et al.*. Ultralow-jitter and -amplitude-noise semiconductor-based actively mode-locked laser[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(19): 2870-2872.
- 5 Rodriguez J D, Bagnell K, Delfyett P J. Frequency stability of a 10 GHz optical frequency comb from a semiconductor-based mode-locked laser with an intracavity 10,000 finesse etalon[J]. *Opt Lett*, 2013, 38(18): 3665-3668.
- 6 Song Fang, Xu Wencheng, Shen Minchang, *et al.*. Actively mode-locked femtosecond pulse fiber laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(3): 347-350.
宋 方, 徐文成, 申民常, 等. 主动锁模飞秒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2008, 35(3): 347-350.
- 7 Peng Can, Yao Minyu, Zhang Hongming, *et al.*. 10 GHz actively mode-locked fiber ring laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2003, 30(2): 101-104.
彭 璨, 姚敏玉, 张洪明, 等. 10 GHz 主动锁模光纤激光器[J]. *中国激光*, 2003, 30(2): 101-104.
- 8 Koliada N, Nyushkov B, Alvanenko, *et al.*. Generation of dissipative solitons in an actively mode-locked ultralong fibre laser[J]. *Quantum Electron*, 2013, 43(2): 95-98.
- 9 Kim Y J, Lee C G, Chun Y Y, *et al.*. Pulse-amplitude equalization in a rational harmonic mode-locked semiconductor fiber ring laser using a dual-drive Mach-Zehnder modulator[J]. *Opt Express*, 2004, 12(5): 907-915.
- 10 Tamura K, Ippen E P, Haus H A, *et al.*. 77-fs pulse generation from a stretched-pulse mode-locked all-fiber ring laser[J]. *Opt Lett*, 1993, 18(13): 1080-1082.
- 11 Dennis M L, Duling I N. Experimental study of sideband generation in femtosecond fiber lasers[J]. *Quantum Electron*, 1994, 30(6): 1469-1477.
- 12 Agrawal G P. *Applications of nonlinear fiber optics (2nd edition)*[M]. Boston: Academic Press, 2007.
- 13 Tang D Y, Zhao L M, Zhao B. Soliton collapse and bunched noise-like pulse generation in a passively mode-locked fiber ring laser[J]. *Opt Express*, 2005, 13(7): 2289-2294.