

脉冲幅度均匀化的有理谐波锁模光纤激光器

俞 力 宋跃江 张旭苹

(南京大学光通信工程研究中心, 南京 江苏 210093)

摘要 提出并实现了一种脉冲幅度可均匀化的有理谐波锁模光纤激光器。该激光器采用主动有理谐波锁模机制, 可获得重复频率为整数倍调制频率的锁模脉冲信号。通过在光纤激光器谐振腔中添加非线性光纤放大环, 并利用其反射率对输入信号强度的开关特性, 实现对锁模脉冲信号的整幅。在 1 GHz 的调制频率下, 分别获得了 4 GHz 和 5 GHz 重复频率的锁模脉冲信号输出, 并且在一定的 980 nm 抽运功率下, 可通过调节电光调制器的直流偏置电压大小以及调制信号的调制深度, 使得脉冲幅度具有较好的均匀性。

关键词 光纤激光器; 主动谐波锁模; 有理谐波锁模; 非线性光纤放大环

中图分类号 TN242 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s1.0014

Pulse-Amplitude Equalization by Nonlinear-Amplified-Loop Mirror in Rational Harmonic Mode-Locked Fiber Laser

Yu Li Song Yuejiang Zhang Xuping

(Institute of Optical Communication Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract Pulse-amplitude equalization through a nonlinear-amplifier-loop mirror in active rational harmonic mode-locked fiber laser is designed and experimentally demonstrated. An optical pulse train with a high repetition rate is generated when the modulation frequency is tuned to a rational number of the cavity's fundamental frequency of the fiber laser. Through incorporating a nonlinear-amplifier-loop mirror into the cavity, the pulse train can be equalized by adjusting the DC biased voltage and the modulation depth. At the modulation frequency of 1 GHz, an amplitude-equalization pulse train with repetition rate of 4 GHz or 5 GHz is obtained.

Key words fiber laser; active harmonic mode locking; rational harmonic mode locking; nonlinear amplifier loop mirror

1 引 言

发展高速、大容量光纤通信是目前国际上光通信研究的主要方向, 而光时分复用(OTDM)技术是提高波分复用(WDM)单一波长信道的容量的有效办法。主动锁模光纤激光器由于具有可调谐、可输出变换极限光脉冲、高重复频率、易于同步等优点, 成为 OTDM 和 WDM/OTDM 关键技术研究的基础器件。主动谐波锁模光纤激光器的输出脉冲重复频率等于外加调制信号的频率, 受限于铌酸锂调制器的调制带宽, 外加调制信号的频率通常为 GHz 量级, 这大大限制了激光器的应用范围。为了提高输出脉冲的重复频率, 研究者又发展出有理谐波锁模机制, 可以获得整数倍于调制频率的锁模脉冲输

出^[1~6]。但是利用该方法获得脉冲信号其幅度往往具有很大的不均匀性, 这限制了激光器的应用, 因此如何使得有理谐波锁模光纤激光器的输出脉冲幅度均匀化是一个亟待解决的问题, 国内外在这方面多有报道^[7~11]。本文提出可在激光器谐振腔内添加非线性光纤放大环形腔镜(NALM), 利用其反射率对脉冲光强的开关特性, 来实现对脉冲幅度的整幅, 从而改善输出脉冲幅度的均匀化。

2 实验原理

光纤激光器同时运转在位于增益带宽内的大量纵模上, 模式的频率间隔 $\Delta f = c/L_{\text{cav}}$, L_{cav} 是腔内往返一次的光学长度。当一个外加的调制信号通过调

基金项目: 国家自然科学基金(60644001)资助课题。

作者简介: 俞 力(1978—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: smartyuli@yahoo.com.cn

导师简介: 张旭苹(1962—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光通信网络的监控与故障定位、光通信系统关键器件与组件、光纤传感技术及其应用等方面的研究。E-mail: xpzhang@nju.edu.cn (通信联系人)

制器对腔内光场的振幅或频率进行调制,并且调制频率 f_m 等于(或整数倍于)模式间隔 Δf 时,光纤激光器将输出锁模脉冲,脉冲的重复频率等于调制频率 f_m ,这就是主动谐波锁模。当激光器工作在主动谐波锁模状态下时,由于调制信号频率与模式间隔相等或相差整数倍,因此脉冲序列中的任意一个光脉冲信号在通过调制器时受到的调制腔损耗都是一样的,这决定了它们的幅度也是相等的,如图 1(a)所示。通常常用的主动调制器是铌酸锂电光调制器(EOM),受限于它的调制带宽,外加的调制信号的频率往往不会太高(GHz 量级),这限制了主动谐波锁模激光器的应用。

研究者们发展出了有理数倍谐波锁模激光器解决了这一问题。其工作原理是将外加调制信号的频率微调至偏离整数倍模式间隔,使其满足 $f_m = n\Delta f + q\Delta f/m$,其中 n, m, q (通常取 $q=1$)均为整数。此时激光器输出脉冲的重复频率为 $f = m(n\Delta f + q\Delta f/m)$

$= pf_m$,由该式可以看出,锁模脉冲的重复频率增加为原来的 m 倍。但是由于调制信号与模式间隔不再匹配,导致不同时刻通过调制器的光脉冲所受到的调制腔损耗也不一样,因此脉冲的幅度会出现波动性,其包络形状应当等同于调制损耗曲线形状,如图 1(b)所示。因此如何对输出脉冲进行整形使其幅度均匀化成为有理数倍谐波锁模光纤激光器发展的一个关键技术。

非线性光纤放大环境可以利用自相位调制(SPM)效应提供这样的整形机制,其工作原理如图 2 所示。随着输入光功率大小的不同,非线性光纤放大环境表现出开关特性,其反射率随输入功率的变化关系如图 3 所示。从图 3 中的工作点分布可以看出,如果合理调节器件的工作参数,使得低功率脉冲工作在高反射率点上,而同时高功率脉冲工作在低反射率点上,可以使得脉冲幅度之间的不均匀性得到明显的改善。

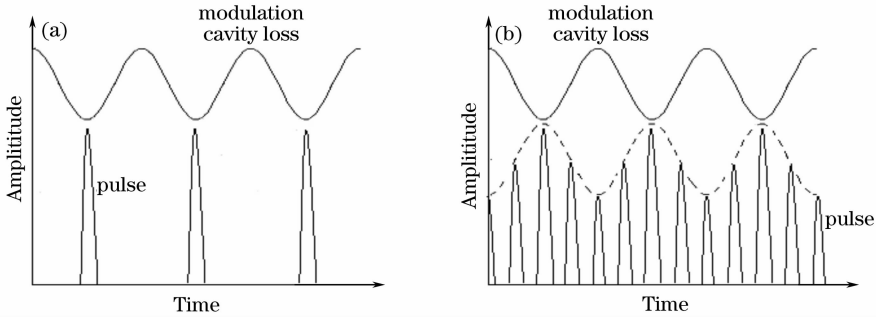


图 1 脉冲幅度与调制腔损耗。(a)谐波锁模,(b)有理谐波锁模

Fig. 1 Pulse amplitude and modulation cavity losses. (a) Actively harmonic mode locking, (b) rational harmonic mode locking

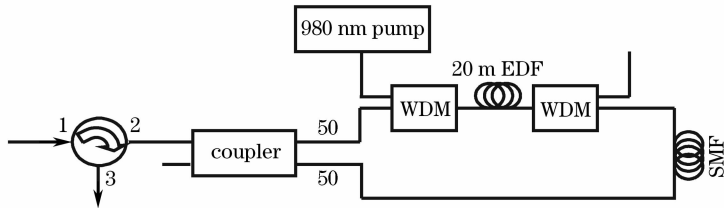


图 2 非线性光纤放大环境

Fig. 2 Schematic of nonlinear amplified loop mirror

为了表征脉冲幅度的不均匀性,我们引入了归一化的均方根值,其定义式如下:

$$\Delta = \sqrt{\sum_{n=0}^{m-1} (P_n - \bar{P})^2 / [m(m-1)\bar{P}^2]}$$

式中 \bar{P} 是脉冲幅度的平均值, $\bar{P} = (\sum_{n=0}^{m-1} P_n) / m$, m 是有理数因子, P_n 表示一个振幅抖动周期内不同时刻光脉冲的幅值。该式与广义的均方根差的数学定义式相比,分母中多了一项 \bar{P}^2 ,它表示在不同的功

率水平下,脉冲幅度的相对均方根值。当未加入 NALM 环时,输出脉冲的幅度用下式表示:

$$P_n = P_s \cos^2(n\pi/m),$$

式中 $n = 0, 1, \dots, m-1$ 。该脉冲序列经过 NALM 环后,得到新的一组脉冲序列,其幅度满足

$$P_{out}^n = P_n G T_R^n =$$

$$G P_s \cos^2\left(\frac{n\pi}{m}\right) \cos^2\left[\frac{\pi\alpha \cos^2(n\pi/m)}{2}\right],$$

式中 G 为 NALM 环的增益因子, $\alpha = P_s / P_{th}$ 为归一

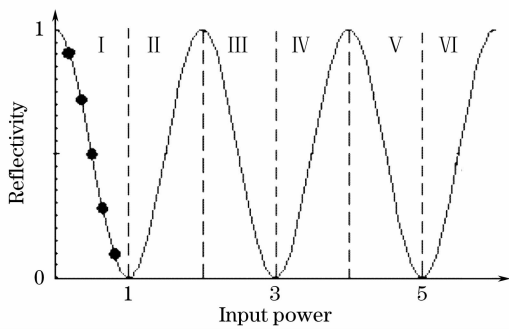


图 3 非线性光纤放大环境的反射率与入射功率的关系

Fig. 3 Relationship between the reflectivity and the input power in NALM

化功率, $P_{th} = \frac{2\pi}{(1-G)\gamma L}$, 并假定 $P_s < P_{th}$, 以 $m = 5$ 为例, 将其代入上面两式中, 可得到在光脉冲序列在未经过 NALM 环和经过一次 NALM 环之后它们的归一化均方根值, 如图 4 所示。从图中可以看出, 在经过一次 NALM 的整幅后, 脉冲幅度的均匀性在不同的输入功率下均有了不同程度的改善, 但是一次的改善并不能得到满意的结果, 因此我们实验设计将 NALM 环放入激光器谐振腔中, 使得光脉冲在腔中振荡的过程中不断地通过 NALM 环, 从而使光脉冲序列的幅度均匀性获得足够的改善。

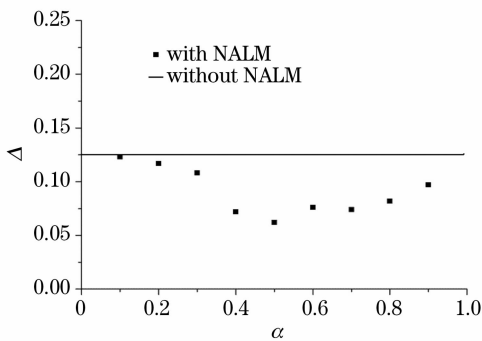


图 4 归一化的均方根值与归一化功率的关系

Fig. 4 Relationship between the normalized root-mean-square and normalized input power

3 实验结果与分析

图 5 是脉冲可均匀化有理数倍谐波锁模光纤激光器的原理图, 其中虚线部分表示未加非线性光纤放大环境时光信号的传播路径。实验中采用无锡中兴公司提供的 EDFA (WZEDFA-SO-B-c-22-1-1), 为激光器谐振腔提供增益; 函数信号发生器 (Agilent E8257D) 输出调制信号, 通过铷酸锂电光调制器对腔损耗进行周期性的调制; 调制后的光信号经环形器 1, 2 端口进入非线性环行腔镜, 其反射信号经环形器

的 3 端口输出, 其中 95% 的光信号被反馈回 EDFA, 并在激光腔中实现振荡, 剩余 5% 的光信号被光示波器 (Agilent 86100B) 接收。在非线性腔镜中, 我们使用 Nufern EDFC-980-HP C-Band 掺铒光纤 (EDF), 其长度为 20 m, 单模光纤 (SMF) 长度为 54 m, 并且使用了两个 980/1550 的波分复用器 (WDM), 这样做的目的是为了移除腔内剩余的 980 nm 抽运光。

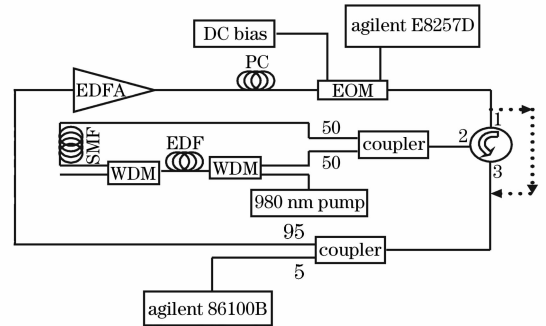


图 5 脉冲幅度均匀化的有理数倍谐波锁模光纤激光器原理图

Fig. 5 Schematic of pulse-amplitude equalization in rational harmonic mode-locked fiber laser

在实验中, 设定合适的 980 nm 抽运源输出功率, 并通过偏振控制器 (PC) 合理地设置偏振态, 同时 EDFA 采用自动功率控制输出模式 (APC 模式), 当调制信号频率满足有理数倍谐波锁模条件时, 通过调节调制深度以及直流偏置电压 (DC Bias) 的大小, 可以控制输出脉冲信号的幅度。实验中我们首先利用光示波器测定了在未加非线性光纤放大环境时, 工作在 4 倍和 5 倍频下的有理数倍谐波锁模激光器在不同直流偏置电压时的脉冲输出信号, 结果如图 6 所示, 调制频率分别为 1.0030606 GHz 和 1.0023960 GHz。由图中可以看出, 在未加 NALM 环时, 无论如何调节直流偏置电压, 输出脉冲的幅度都具有很大的不均匀性, 将实验所得光脉冲的幅度代入公式中计算, 可得其归一化均方根值为 0.120, 与理论计算值 0.125 较为吻合。而图 7 表示的则是加上 NALM 环后, 在适当的直流偏置电压和调制深度下, 输出脉冲幅度的不均匀性得到了很大的改善, 其归一化均方根值为 0.005。其中 4 倍频和 5 倍频时调制信号的调制深度分别为 21.4 dBm 和 22 dBm, 抽运功率分别为 136.76 mW 和 82.47 mW, EDFA 的输出功率分别为 23 dBm 和 20 dBm。另外由于 NALM 环的加入, 使得激光器的模式间隔发生了改变, 因此 4 倍和 5 倍频时的调制频率也与未加 NALM 环时有所不同, 分别是 1.0023460 GHz 和 1.0022704 GHz。

图7中脉冲信号的质量不高,有较为明显的抖动及噪声,其原因主要来自以下几方面:1)温度抖动以及实验平台的震动造成激光器腔长的抖动,使得调制频率与激光器模式间隔发生失配;2)NALM环中光放大引入了噪声;3)NALM环的引入增加了激

光器谐振腔腔长,从而加剧了锁模脉冲的不稳定性。可以通过引入反馈机制(如压电陶瓷)来锁定腔长,加入滤波元件(如光纤光栅)以降低噪声,使用具有高非线性系数的光纤来代替实验中的单模光纤以缩短NALM环的长度。

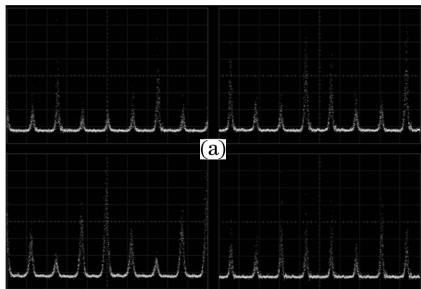


图6 未加入NALM环时锁模脉冲序列。(a)4倍频,(b)5倍频

Fig. 6 Pulse train without NALM. (a) 4th order, (b) 5th order

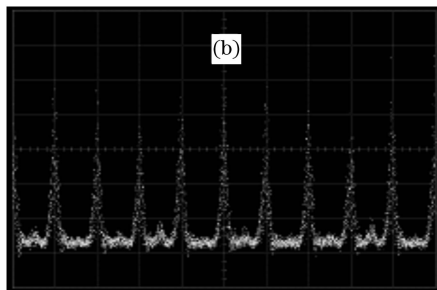
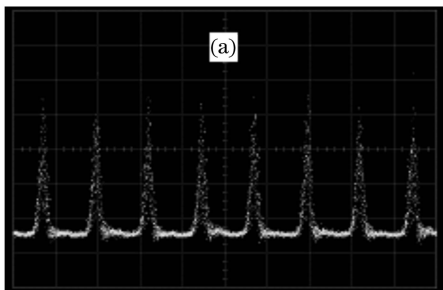


图7 加入NALM环时锁模脉冲序列。(a)4倍频,(b)5倍频

Fig. 7 Pulse train with NALM. (a) 4th order, (b) 5th order

4 结 论

设计并实现了一种脉冲可均匀化的有理数倍谐波锁模光纤激光器。该激光器利用非线性光纤放大环境的开关特性,结合有理数倍谐波锁模机制,在1 GHz的调制频率下,获得了重复频率为4 GHz和5 GHz的锁模脉冲信号输出,并且通过设定合适的抽运功率,直流偏置电压和调制深度,脉冲的幅度基本趋于均衡。

参 考 文 献

- 1 E. Yoshida, M. Nakazawa. 80~200 GHz erbium-doped fibre laser using a rational harmonic mode-locking techque [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(15): 1370~1372
- 2 Z. C. Deng, J. P. Yao. Photonic generation of microwave signal using a rational harmonic mode-locked fiber ring laser[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2006, **54**(2): 763~767
- 3 C. Wu, N. K. Dutta. High-repetition-rate optical pulse generation using a rational harmonic mode-locked fiber laser[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2000, **36**(2): 145~150
- 4 Wang Lin, Li Jingzhen, Xu Ping. Rational harmonic actively-passively mode-locked erbium-doped fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(5): 567~570
王 林,李景镇,徐 平. 有理数谐波主被动锁模掺铒光纤激光

- 器[J]. *光学学报*, 2001, **21**(5): 567~570
- 5 H. Sun, H. Dong, N. K. Dutta. Mode-locked erbium-doped fiber ring laser using intracavity polarization-maintaining loop mirror[J]. *IEEE. Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(12): 1311~1313
- 6 Zhan Li, Gu Zhaochang, Zhang Jianwen *et al.*. Critical behavior of a passively mode-locked laser: rational harmonic mode locking [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(16): 2276~2278
- 7 S. Ozharar, S. Gee, F. Quinlan *et al.*. Pulse-amplitude equalization by negative impulse modulation for rational harmonic mode locking[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(19): 2924~2926
- 8 X. H. Feng, Y. G. Liu, S. Z. Yuan *et al.*. Pulse-amplitude equalization in a rational harmonic mode-locked fiber laser using nonlinear modulation[J]. *IEEE. Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(8): 1813~1815
- 9 Yang Shiquan, Li Zhaohui, Zhao Chunliu *et al.*. Pulse-amplitude-equalization in a rational harmonic mode-locked fiber ring laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **23**(9): 1082~1085
杨石泉,李朝晖,赵春柳 等. 有理数谐波锁模光纤激光器中脉冲幅度的均衡[J]. *中国激光*, 2003, **23**(9): 1082~1085
- 10 Song Lijun, Li Shichen, Ge Chunfeng *et al.*. Generation of amplitude-equalized pulses from rational harmonic mode-locked fiber ring laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2001, **28**(10): 881~884
宋立军,李世忱,葛春风. 脉幅稳定的有理数谐波锁模光纤激光器[J]. *中国激光*, 2001, **28**(10): 881~884
- 11 S. Q. Yang, X. Y. Bao. Generating amplitude equalized repetition rate multiplexed pulses directly from a phase modulated fiber laser[J]. *IEEE Lasers & Electro-Optics Society*, 2006, TuNB(11:45~12:00): 282~283