

文章编号 1004-924X(2009)11-2719-05

被动锁模掺铒光纤激光器中的有理数谐波锁模

况庆强, 桑明煌, 聂义友, 张祖兴

(江西师范大学 物理与通信电子学院, 江西 南昌 330022)

摘要: 为了获得稳定的谐波锁模脉冲, 分析了有理数谐波锁模的理论和非线性放大环路的传输特性。构建了包括一个外部环和一个内部环的 8 字形被动锁模掺铒脉冲光纤激光器, 对被动锁模掺铒光纤激光器进行了相关理论分析和实验研究。实验发现, 当调整泵浦功率分别为 167, 146 和 126 mW 时, 除了观测到了稳定的谐波锁模脉冲外, 还观察到了分别类似于 3 阶、5 阶、6 阶的有理数谐波锁模脉冲产生现象, 分析其脉冲重复频率, 证实此类脉冲序列具有属于 3 阶、5 阶和 6 阶有理数谐波锁模脉冲序列重复频率的一样的规律, 认为其产生原因是 8 字形光纤激光器中的 Sagnac 环起了和主动锁模中调制器一样的作用。

关键词: 掺铒光纤激光器; 被动锁模; 有理数谐波锁模; 非线性放大环路

中图分类号: TN248.8 **文献标识码:** A

Rational harmonic mode-locking of passively mode-locked erbium-doped fiber laser

KUANG Qing-qiang, SANG Ming-huang, NIE Yi-you, ZHANG Zu-xing

(College of Physics & Communication Electronics, Jiangxi Normal
University, Nanchang 330022, China)

Abstract: To achieve a steady harmonic mode-locked pulse (HMLP), the theory of rational harmonic mode-locking and the transmission characteristics of a nonlinear amplifying loop mirror were analyzed. A figure-8 shape pulse laser including an outer ring and an inner ring was constructed to theoretically and experimentally investigate the passively mode-locked technology of an erbium-doped fiber laser. By modulating the pump power to 167 mW, 146 mW or 126 mW, not only a steady HMLP, but also several rational HMLPs were observed. It is found that these pulses show the same properties as those of 3th-order, 5th-order, 6th-order HMLPs by analyzing the repetition rate of pulse train. The reason is that the Sagnac ring in the figure-8 shape pulse laser plays the same role as the modulator used in an actively mode-locked pulse laser.

Key words: erbium-doped fiber laser; passive mode-locking; rational harmonic mode-locking; nonlinear amplifying loop mirror

收稿日期: 2008-10-14; 修订日期: 2008-12-05.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60807014); 江西省自然科学基金资助项目 (No. 0512007); 江西师范大学青年成长基金资助项目 (No. 1996)

1 引言

在光纤通信系统中,超短光脉冲光源性能的优劣直接影响着系统传输质量的好坏与容量的大小。掺铒光纤激光器具有工作阈值低、输出脉宽窄、峰值功率高、脉冲质量好、与传输光纤可高效耦合实现全光通信等优点,在众多有潜力的光源中倍受研究人员的重视,迄今为止已经有了许多研究方案^[1-2]。主动谐波锁模技术是光纤激光器里产生高重复频率短脉冲的一个非常有效的方法^[3-6],主动锁模光纤激光器因具有输出脉冲啁啾小、可调谐范围大、重复频率高等优点,被认为是一种极其重要的超短脉冲光源^[7]。这种短脉冲产生机制对未来的超高速光通信有很重要的意义。主动锁模光纤激光器输出谐波脉冲的重复频率等于调制器的调制频率,因而在实际工作中会受到调制器的最大调制频率的影响,不能获得很高的脉冲重复频率。

幸运的是,N. Onodera 等人^[8]提出了一种有理数谐波锁模方法。当输出谐波锁模脉冲频率为 nf_c 时,将调制器的频率 f_m 调整为腔的基频 f_c 的分数倍,这时输出脉冲重复频率将变为 $f_p = (np+1)f_c$, n 为调制器的整数谐波调制次数, p 为调制器的有理数调制次数, n, p 都为整数。可见,有理数谐波锁模技术可以产生效率很高的重复脉冲。最近的研究结果表明,可以获得 80~200 GHz 的脉冲。

有理数谐波锁模技术和普通的谐波锁模技术差别很大。但相关理论研究发现,如果把光纤激光器的腔长看成 ρL (L 为激光器的腔长),有理数谐波锁模技术和普通谐波锁模技术并没有太大区别^[9]。

由文献^[9]可知,谐波锁模时,脉冲序列的解依然是厄米高斯函数的形式,但是每个脉冲的宽度变窄了。可以认为,谐波锁模时,同一时刻,激光腔中有 n 个光脉冲。同样的道理,在有理数谐波锁模条件下,如果我们认为存在一个等效的腔长 ρL ,那么模式之间的耦合是可以发生的,同时在任一时刻激光腔中有 $(np+1)$ 个脉冲。

上述有理数谐波锁模现象都是在主动锁模光纤激光器里获得的,而到目前为止,还没有在被动锁模光纤激光器里获得有理数谐波锁模现象的报

道。本文介绍了作者对被动锁模光纤激光器产生有理数谐波锁模现象的研究情况。

2 光纤激光器中的被动锁模技术

被动锁模是一种全光非线性技术,在不用调制器之类的任何有源器件的情况下能在腔内实现超短脉冲输出。被动锁模的原理是,利用非线性器件对输入脉冲强度的依赖性,得到与输入脉冲相比更窄的脉冲。基于这一基本思想的几种方法都可用于被动锁模激光器。实现被动锁模的技术主要有:使用可饱和吸收体、使用非线性光纤环形镜、利用非线性偏转旋转效应等 3 种方法。

被动锁模^[10-14]的一种代表结构为非线性光纤放大环腔结构(见图 1)。非线性光纤环形镜(Nonlinear Optical Loop Mirror,简称 NOLM)(sagnac 干涉仪)是一种全光纤的被动锁模技术,它具有与强度有关的透射特性,可以像可饱和吸收体一样窄化脉冲。使用非线性光纤环形镜进行被动锁模的光纤激光器,因为腔的形状与 8 字相似(见图 1)通常被称为 8 字形激光器。

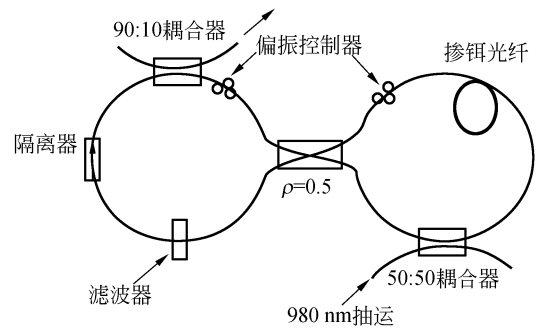


图 1 8 字形光纤激光器

Fig. 1 Figure-eight shape fiber laser

图 1 中的 3 dB 耦合器将入射光分成幅值相等、传播方向相反的两部分,且能提供放大的掺铒光纤靠近图 1 中没有标示中央耦合器,使得一路光刚进入环路即被放大,另一路则在离开环路时被放大,这种结构称为非线性放大环形镜(Nonlinear amplifying loop mirror, NALM^[15-16])。两列沿相反方向传播的光在 NALM 内往返一次后获得了不同的非线性相移,位相差不是一个常数,而是随脉冲的色散形状变化。如果调节 NALM 使脉冲的中央较强部分的相移接近 π ,则脉冲的这部分能量被透射,而边沿部分由于其功率较低,

所得相移小,从而被反射^[17]。总的结果是,从NALM输出的脉冲要比输入脉冲窄,因而从功能上说,NALM的作用与快速可饱和吸收体类似。其主要区别是,光纤非线性效应的电极化起源可使其响应速度达飞秒量级。

采用NALM锁模的光纤激光器有一个很大的缺陷:锁模脉冲的重复频率无法控制,会在很大的范围内变化。这是因为与主动锁模相比,腔内没有元件能精确决定重复频率。这个问题可以通过引入附加的重复频率控制技术来实现。一种方法是在图1中的左侧环上再加上一个带有隔离器的附加环;另一种方法是在靠近输出耦合器端口处放置一反射镜,F-P腔的长度决定了脉冲的重复频率。

3 被动锁模掺铒光纤激光器的实验研究

实验中的脉冲光纤激光器的结构如图1所示。该8字型激光器包括一个外部环和一个内部环(非线性放大环境NALM),外部环由一个90:10的输出耦合器、一个隔离器、一个滤波器、一个偏振控制器组成,内部环由一个偏振控制器、一段20 m的掺铒光纤、一个耦合980 nm的泵浦输入的WDM组成。两个环由一个耦合器连接,耦合比是50:50,共同组成一个萨格纳克(Sagnac)结构,以达到被动锁模的目的。整个光纤环长42.45 m。90:10耦合器输出的脉冲光由1 ns光电转换器接受,并输入到惠普54610B型的500 MHz示波器观测脉冲波形,其输出光谱用EXFO的IQ-5240光谱分析仪来探测。

采用8字形结构的光纤激光器,如果没有滤波器,可以得到ps和fs脉冲^[18-20]。

在之前的实验过程中,作者在外部环中再加入了一个滤波器,其通光中心波长是1 556.1 nm,带宽是0.8 nm。通过调整偏振控制器和泵浦功率的大小,已经观测到了不同强度的脉冲现象。当980 nm激光器的泵浦功率为187、180 mW的时,用光电转换器、500 MHz示波器来探测得到的锁模脉冲信号。通过调整偏振控制器,观测到了明显的稳定的谐波脉冲锁模现象,得到了比较明显的脉冲图像^[21]。测量的光纤环长度

为42.45 m,考虑到光纤中的光传播速度,腔的基频应为 $f_0 = \frac{c}{nL}$ (n 为光纤折射率, c 为光在真空中的传播速度),估算为4.7 MHz。通过实验,可以准确的推断出基频为 $f_0 = 4.669$ MHz^[21]。

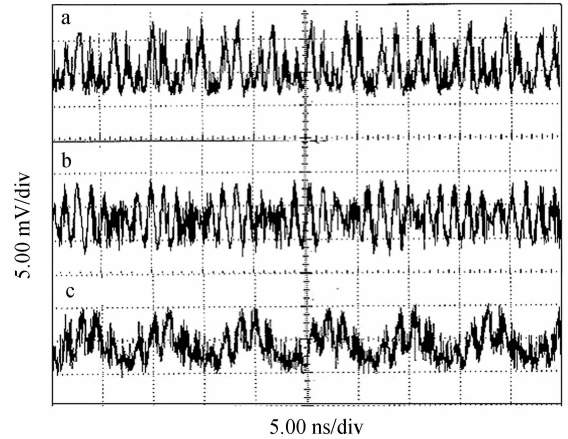


图2 锁模脉冲波形:(a)泵浦功率为167 mW;(b)泵浦功率为146 mW;(c)泵浦功率为126 mW

Fig. 1 Shape of mode-locked pulse:(a) pump power at 167 mW;(b) pump power at 146 mW;(c) pump power at 126 mW

当调整泵浦功率分别为167,146和126 mW时,实验还观察到了并不十分稳定的锁模脉冲现象,如图2。图2的这种脉冲强度分布和主动锁模光纤激光器中的有理数谐波锁模现象很相似。图2(a)、(b)、(c),分别类似于3阶、5阶、6阶的有理数谐波锁模脉冲。因此,可以确定观察到的现象是有理数谐波锁模现象。在主动有理数谐波锁模中,当调制频率 $f_m = (p \pm 1/m)f_0$ 时,光脉冲的频率 $f_p = (mp \pm 1)f_0$, (其中 p 是激光腔的谐波数目, m 为RF调制的谐波数)。因此,如果这种脉冲属于有理数谐波锁模脉冲,其重复频率应该满足 $f_p = (mp \pm 1)f_0$ ^[6]。

为了论证本文的推论,用之前实验中得到的 $f_0 = 4.669$ MHz分析了图2的脉冲^[21]。结果表明,图2(a)的脉冲周期 $T = 1.159$ ns,重复频率 $f_p = 862.8$ MHz。满足 $f_p = 184.8f_0 \approx 185f_0 = (3 \times 62 - 1)f_0$ 。该结果证实此类脉冲序列为3阶的有理数谐波锁模脉冲。图2(b)的脉冲周期 $T = 1.371$ ns,重复频率 $f_p = 729.4$ MHz,满足 $f_p = 156.2f_0 \approx 156f_0 = (5 \times 31 + 1)f_0$,该结果证实

此类脉冲序列为 5 阶有理数谐波锁模脉冲。图 2 (c) 的脉冲周期 $T = 1.438 \text{ ns}$, 重复频率 $f_p = 695.3 \text{ MHz}$, 满足 $f_p = 148.9f_0 \approx 149f_0 = (6 \times 25 - 1)f_0$, 该结果证实此类脉冲序列为 6 阶有理数谐波锁模脉冲。

可能的解释是 8 字型光纤激光器中的 Sagnac 环起了和主动锁模中的调制器一样的作用。因为 NALM 使得 CW 光刚进入环腔的时候得到放大, 而 CCW 光在离开环腔的时候得到放大, 两列沿相反方向传播的光在 NALM 中往返一次后获得不同的相移, 而且相位差不是一个常数, 而是随着脉冲色散形状而变化。当调节 NALM, 使脉冲中央部分的相移接近 π 时, 这部分的脉冲能量透射, 脉冲边缘部分就不能透射, 从而形成了稳定的脉冲。但包括了非线性放大环镜(NALM)的 Sagnac 环的传输函数要随着泵浦功率的变化而变化, 如果泵浦功率较低, 就不能够提供足够的能量来刺激产生稳定的脉冲, 脉冲中央部分的相移并不完全等于 π , 当与 π 相移的差移等于 π/p 时, 就产生如图 2 所示的有理数谐波锁模脉冲。

当脉冲中央部分的相移为 $\pi/3$, 环形一周的

相移为 $2\pi/3$ 时, 产生了 3 阶的有理数谐波锁模; 当脉冲中央部分的相移为 $\pi/5$, 环形一周的相移为 $2\pi/5$ 时, 产生了 5 阶的有理数谐波锁模; 当脉冲中央部分的相移为 $\pi/6$, 环形一周的相移为 $2\pi/6$ 时, 产生了 6 阶的有理数谐波锁模。因此, 在实验中, 随着泵浦功率的下降, 脉冲由稳定的整数谐波锁模变成了不稳定的有理数谐波锁模现象。

4 结 论

本文分析了有理数谐波锁模的理论和非线性放大环镜的传输特性, 并将其用于被动锁模光纤激光器中。在 8 字形被动锁模掺铒光纤激光器的脉冲实验中, 除了观测到稳定的谐波锁模脉冲外, 还观察到产生有理数谐波锁模脉冲的现象: 其脉冲强度分布具有有理数谐波锁模脉冲的强度分布特性。分析其脉冲重复频率也证实此类脉冲序列具有与 3 阶、5 阶和 6 阶有理数谐波锁模脉冲序列重复频率一样的规律。该实验研究结果对更加深入地了解被动锁模产生现象, 进一步开展后续研究具有极其重要的意义。

参考文献:

[1] 颜纷纷, 王葵如, 余重秀, 等. 增益平坦的多波长泵浦宽带拉曼光纤放大器[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2):155-158.
YAN B B, WANG K R, YU CH X, *et al.*. Broad-band gain-flattened multiwavelength pumped Raman fiber amplifier[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2):155-158. (in Chinese)

[2] 刘颖刚, 乔学光, 贾振安, 等. 基于 FBG 的波长可调谐环形掺铒光纤激光器[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5):811-815.
LIU Y G, QIAO X G, JIA ZH A, *et al.*. Wavelength tunable erbium-doped fiber ring laser based on FBG[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5):811-815. (in Chinese)

[3] KAO K C, HOCKNAM G A. Dielectric-fiber surface wave-guide for optical frequencies[J]. *IEEE Proc. J.*, 1966, 113:1151-1158.

[4] SARUWATORI M. All-optical signal processing in ultrahigh-speed optical transmission[J]. *Electron. Lett.*, 1994, 32(9):98-105.

[5] DESURVIRE E. The golden age of optical fiber

amplifiers[J]. *Physics Today*, 1994, 47(1):20-27.

[6] TAGA H. Long distance transmission experiments using the WDM technology [J]. *J. Lightwave Technology*, 1996, 14(6):1287-1298.

[7] 马晓红, 于晋龙, 王林, 等. 光时分复用系统中单路时钟提取[J]. 光学学报, 1999, 19(11):1541-1545.
MA X H, YU J L, WANG L, *et al.*. Clock recovery of single channel in OTDM system[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(11):1541-1545. (in Chinese)

[8] BRACKETT C A. Dense wavelength division multiplexing networks: principle and application [J]. *IEEE. J. Select. Areas Commun.*, 1990, 8(6):948-964.

[9] DAS P, KAECHELE W, THEIMER J P, *et al.*. Rational harmonic mode locking fiber laser[J]. *SPIE*, 1997, 3075:21-32.

[10] RICHARDSON D J, LAMING R I, PAYNE D N, *et al.*. Selfstarting passively mode-locked erbium fiber ring laser based on the amplifying Sagnac switch[J]. *Electron. Lett.*, 1991, 27(6):542-544.

[11] DULING I N. Subpicosecond all-fiber erbium laser [J]. *Electron. Lett.*, 1991, 27(6):544-545.

- [12] RICHARDSON D J, LAMING R I, PAYNE D N, *et al.*. Pulse repetition rates in passive, self-starting, femtosecond soliton fiber laser[J]. *Electron. Lett.*, 1991, 27(16): 1451-1453.
- [13] ZIRNGIBL M, STULZ L W, HUGI J, *et al.*. 1, 2 ps pulses from passively mode-locked laser diode pumped Er-doped fibre ring laser[J]. *Electron. Lett.*, 1991, 27(19): 1734-1735.
- [14] WANG Z Y, YU Z H, GAO P L, *et al.*. Rational harmonic figure-eight actively-passively mode-locked erbium-doped fiber laser[J]. *Chinese Optics Letters*, 2003, 1(5): 283-285.
- [15] O'MAHONY M J. Optical multiplexing in fiber networks; progress in WDM and OTDM [J]. *IEEE. Communications Magazine*, 1995, 33(12): 82-88.
- [16] MORIKA T. An ultrafast reflective optical Kerr demultiplexer using polarization rotation mirror [J]. *Electron. Lett.*, 1992, 28(6): 521-522.
- [17] 胡红武, 吴朗, 况庆强, 等. 四波混频中与强度有关的相位失配量及其影响[J]. *江西师范大学学报(自然科学版)*, 2006, 30(3): 271-273.
- HU H W, WU L, KUANG Q Q, *et al.*. Effects of Intensity-dependent phase-matching factor on four wave mixing[J]. *Journal of Jiangxi Normal University(Natural Sciences Edition)*, 2006, 30(3): 271-273. (in Chinese)
- [18] SMITH K. All optical clock recovery using a mode-locked laser[J]. *Electron. Lett.*, 1992, 28(19): 1814-1816.
- [19] ELLIS A D, SMITH K, PATRICK D M. All optical clock recovery at bit rates up to 40Gb/s[J]. *Electron. Lett.*, 1993, 29(15): 1323-1324.
- [20] YOSHIDA E, NAKAZAWA M. Low-threshold 115 GHz continuous-wave modulational instability erbium doped fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 1997, 22(18): 1409-1411.
- [21] 况庆强, 桑明煌, 聂义友, 等. 利用 NALM 结构的被动锁模掺铒光纤激光器的研究[J]. *激光技术*, 2008, 32(6): 631-638.
- KUANG Q Q, SANG M H, NIE Y Y, *et al.*. Study on passively mode-locked erbium-doped fiber laser by means of NALM[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(6): 631-638. (in Chinese)

作者简介:



况庆强(1974—),男,江西高安人,讲师,1998年,2005年于江西师范大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光纤通信、光纤激光器及光纤传感技术的研究。E-mail:kqq1209@163.com



桑明煌(1965—),男,江西德安人,硕士,副教授,1986年于江西师范大学获得学士学位,1993年于上海交通大学获得硕士学位,主要从事光纤通信及导波光学的研究。E-mail:sangqqli@yahoo.com.cn



聂义友(1963—),男,江西丰城人,硕士,教授,1983年于江西师范大学获得学士学位,1986年于广西师范大学获得硕士学位,主要从事量子密码通信等方面的研究。E-mail:nieyiyu@jxnu.edu.cn



张祖兴(1975—),男,江西峡江人,博士,副教授,2004年于江西师范大学获得硕士学位,2007年于上海交通大学获得博士学位,主要从事光纤光子学的研究。E-mail:stellarz@hotmial.com