

文章编号: 1001-3806(2008)06-0631-04

利用 NALM 结构的被动锁模掺铒光纤激光器的研究

况庆强, 桑明煌, 聂义友, 张祖兴, 付贵阳

(江西师范大学 物理与通信电子学院, 南昌 330022)

摘要: 为了研究光纤中的非线性效应对锁模脉冲的影响, 采用非线性放大环路来实现被动锁模, 在分析非线性放大环路传输特性理论的基础上, 对被动锁模掺铒光纤激光器进行了相关的实验研究。实验中观察到了重复频率为 280 MHz 中心波长是 1556.235 nm、线宽是 0.4 nm 的稳定的锁模脉冲现象。研究结果对更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。

关键词: 激光技术; 被动锁模; 非线性放大环路; 锁模脉冲

中图分类号: TN242 **文献标识码:** A

Study on passively mode-locked erbium-doped fiber laser by means of NALM

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

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

Abstract The passively mode-locked of nonlinear amplifying loop mirror (NALM) configuration is used to study the influence of mode-locked pulse induced by the nonlinear effect of optical fiber. After analyzing the transmission characteristic theory of nonlinear amplifying loop mirror, experiments were executed for a passively mode-locked erbium-doped fiber laser. It was found that the steady mode-locked pulse phenomenon with repeat frequency of 280 MHz, center wavelength of 1556.235 nm and linewidth of 0.4 nm. The study is helpful for thorough understanding the passively mode-locked phenomenon and follow-up research.

Key words laser technique; passively mode-locked; nonlinear amplifying loop mirror; mode-locked pulse

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的研究方案。主动的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^[1-4], 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^[5-6]。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, 因而在实际上会受到调制器的最大调制频率的影响, 不能达到一个很大的脉冲重复频率。

而被动锁模是一种全光技术, 能在腔内不用调制

器之类的任何有源器件的情况下实现超短脉冲输出。被动锁模光纤激光器是利用光纤中的非线性效应来实现被动锁模的, 它无需外加电调制信号或外界注入脉冲, 因而不会象主动锁模光纤激光器那样要受到调制频率的影响。它的结构简单, 能够充分利用掺铒光纤的增益带宽, 是真正的全光器件, 获得了非常广泛的应用。

1 光纤激光器中的被动锁模技术

被动锁模的原理是利用非线性器件对输入脉冲的强度依赖性, 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、使用非线性光纤环路、利用非线性偏转旋转效应等 3 种方法。

被动锁模^[7-11]的一种代表结构为非线性光纤放大环路结构, 见图 1。非线性光纤环路 (nonlinear optical loop mirror, 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。使用非线性光纤环路进行被动锁模的光纤激光器, 因为腔的形状像“8”字, 通常被称为 8 字形激光器。

作者简介: 况庆强 (1974-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事光波导及光纤通信的研究。

E-mail: kqq1209@163.com

收稿日期: 2007-08-30 收到修改稿日期: 2008-01-29

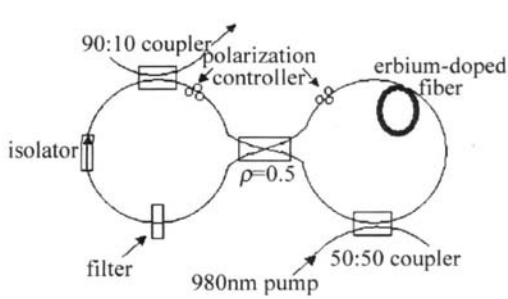


Fig 1 Configuration of the eight figure fiber laser

8字形光纤激光器的工作原理为: 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, 能提供放大的掺杂光纤靠近中央耦合器, 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, 这种结构又被称为非线性放大环境 (nonlinear amplifying loop mirror NALM^[12])。两列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, 而且位相差不是一个常数, 而是随脉冲的色散形状变化。如果将 NALM 调节到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。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决定其响应速度可达飞秒量级。

2 NOIM 和 NALM 的传输特性分析

非线性光学环境的工作原理是用一段光纤将光纤耦合器的两个输出端口连接起来形成一个环, 就是一个 Sagnac 干涉仪结构^[13], 见图 2。

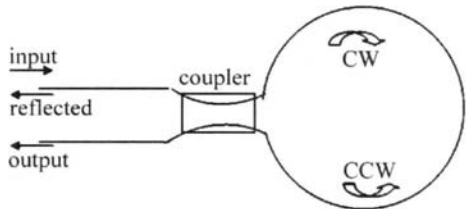


Fig 2 Basic parts of the NOIM

当一束振幅为 A_0 的光进入分光比为 ρ 的光纤耦合器, 分成顺时针 (clockwise, CW) 和逆时针 (counterclockwise, CCW) 方向传输的光, 则这两束光的光场振幅为:

$$A_{CW} = \sqrt{\rho} A_0, A_{CCW} = i \sqrt{1-\rho} A_0 \quad (1)$$

耦合器对 CCW 波引入了 $\pi/2$ 的相移。经过一次往返后, CW 光和 CCW 光不但获得了线性的相移, 而且还获得了自相位调制和交叉相位调制引入的非线性相移。结果两个光到达耦合器后变为:

$$A_{CW}' = A_{CW} \exp[i\phi_0 + i\gamma(|A_{CW}|^2 + 2|A_{CCW}|^2)L] \quad (2)$$

$$A_{CCW}' = A_{CCW} \exp[i\phi_0 + i\gamma(|A_{CCW}|^2 + 2|A_{CW}|^2)L] \quad (3)$$

式中, $\phi_0 = \beta L$ 是线性相移, L 为环境长度, β 为环内传播常数; γ 为非线性系数。

利用光纤耦合器的传输矩阵可以得到反射和透射的光场为:

$$\begin{bmatrix} A_i \\ A_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\rho} & i\sqrt{1-\rho} \\ i\sqrt{1-\rho} & \sqrt{\rho} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{CW}' \\ A_{CCW}' \end{bmatrix} \quad (4)$$

把 (1) 式 ~ (3) 式代入 (4) 式得 Sagnac 环的透射率 $T_s = \frac{|A_i|^2}{|A_0|^2}$ 为:

$$T_s = 1 - 2\rho(1-\rho)\{1 + \cos[\phi_0 + \gamma P_0 L]\} \quad (5)$$

式中, $P_0 = |A_0|^2$ 为输入功率, ρ 为耦合器的耦合系数。若 $\rho = 0.5$, $T_s = 0$ 即环对任何功率信号的反射率均为 100%。即当耦合器的分光比为 1 时, 两束光的非线性相移相等, 结果这两束光的相对相位差为 0。

$\rho = 0.5$ 的耦合器把入射光分成幅值相等、传播方向相反的两部分, 能提供放大的掺铒光纤靠近耦合器的一端口, 使得 CW 光刚进入环路就被放大, CCW 光在离开环路时被放大, 这种结构称为非线性放大环境, 见图 3。

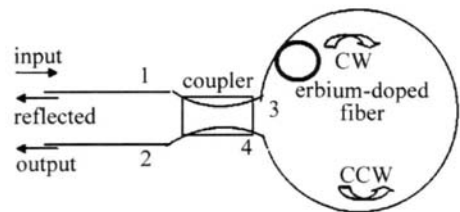


Fig 3 Basic parts of the NALM

在小的光输入功率情况下, NALM 环工作在线性区域, 1 端口进入的脉冲将被放大后返回 1 端口。在大的光输入功率时, 有非线性折射率 n_2 , 则 CW 光和 CCW 光经过 1 圈后, 会有一个相位的变化, 分别为 $\delta\phi_{CW}$ 和 $\delta\phi_{CCW}$ 。假设脉冲长度、放大器长度和环的总长度相比小得多, 而单个脉冲不能让放大器饱和, 则 CW 光、CCW 光的相位延迟为:

$$\delta\phi_{CW} = (\pi/\lambda_c) n_2 g I_0 L \quad (6)$$

$$\delta\phi_{CCW} = (\pi/\lambda_c) n_2 I_0 L \quad (7)$$

式中, I_0 为 1 端口的输入光强度, L 为光纤环长, λ_c 为单个波长, g 为放大器的增益。

从 (6) 式和 (7) 式可以看到, CW 光、CCW 光环行 1 周后, 获得了不同的非线性相移, 而且相位差不是常数, 随着脉冲强度的变化而变化。如果调整偏振控制器, 将 NALM 调节到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, 而边沿部分由于功率较小, 相移较小, 从而被反射。也就是说, 从 NALM 输出的脉冲比输入的脉冲要窄, 从功能上说, NALM 起

到了与饱和吸收体一样的作用。

3 实验结果

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 1 个外部环和 1 个内部环 (非线性放大环镜^[12]), 外部环由 1 个 90:10 的输出耦合器、1 个隔离器、1 个滤波器、1 个偏振控制器组成, 内部环由 1 个偏振控制器、1 段 20m 的掺铒光纤、1 个耦合 980nm 的抽运输入的波分复用组成。两个环由 1 个耦合器连接, 耦合比是 50:50 共同组成 1 个 Sagnac 结构, 以达到被动锁模的目的。整个光纤环长 42.45m, 90:10 耦合器输出的脉冲光由 1ns 光电转换器接受, 并输入到惠普 54610B 型的 500MHz 示波器观测脉冲波形, 其输出光谱用 EXFO 的 Q-5240 光谱分析仪来探测。

采用 8 字形结构的光纤激光器, 如果没有滤波器的结构, 可以得到皮秒和飞秒的脉冲^[14-16]。

实验过程中, 在外部环中再加入了一个滤波器, 其通光中心波长是 1556.1nm, 带宽是 0.8nm。通过调整偏振控制器和抽运功率的大小, 可以观测到不同强度的脉冲现象。

图 4 是 980nm 激光器的抽运功率为 187mW 和 180mW 时, 用 NEW FOCUS 的 1ns 光电转换器、惠普 54610B 的 500MHz 示波器来探测到的锁模脉冲信号。

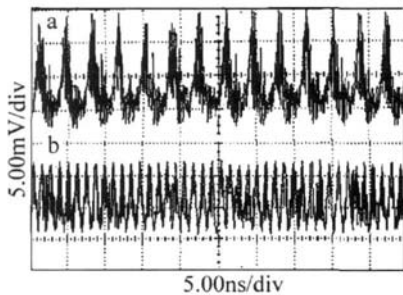


Fig 4 Measured sampling oscilloscope traces of stable output pulses

a—pump power is 187mW b—pump power is 180mW

从图 4a 可以看到, 在 187mW 的抽运功率下, 通过调整偏振控制器, 观测到了明显的锁模现象, 得到了比较明显的脉冲图像。

换用 EXFO 的光谱分析仪 Q-5240 来探测信号, 得到如图 5 的光谱线, 重复频率为 280.2MHz, 中心波长是 1556.235nm, 线宽是 0.4nm。而锁模激光脉冲的时间分布是光谱分布的傅里叶变换。锁模脉冲宽度与增益线宽有关, 当全部激光模以同相位或模之间有恒定的相位差振荡时, 把它称为变换极限激光脉冲。根据 Heisenberg 不确定原理, 脉冲光谱半峰全宽 $\Delta\nu$ 和脉冲宽度 τ_p 的乘积等于常数 K , 即 $\tau_p \Delta\nu = K$ (K 是近似为 1 的常数)。由关系式 $v = \frac{c}{n\lambda}$ 有 $\Delta\nu = \frac{c}{n\lambda^2} \Delta\lambda$ (其中, n

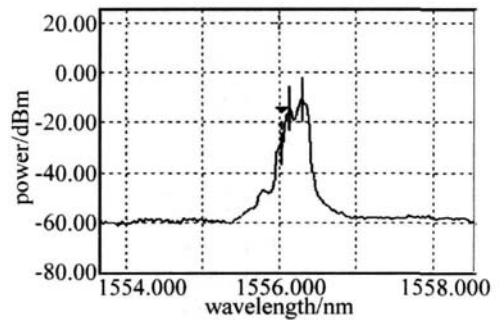


Fig 5 The spectrum of the laser output

为光纤折射率, c 为光在真空中的传播速度, λ 为波长), 再由 Heisenberg 不确定原理根据实验所测的光谱数据可以估算得到 30ps 的锁模脉冲宽度。在不加滤波器的 8 字型光纤激光器里, 由于存在很多的纵模, 它们之间有比较大的模式竞争, 所以调整偏振控制器, 虽然能得到皮秒、飞秒量级的光脉冲信号, 不过稳定性较差。而当加入一个滤波器的波长选择功能, 可以减少环形腔中不同波长的模式竞争, 从而增加了光纤环形激光器的稳定性, 更容易实现被动锁模现象。

在 187mW 和 180mW 的抽运功率下, 通过调整偏振控制器, 观察到了稳定的谐波锁模脉冲, 见图 4a 和图 4b。测量的光纤环长度为 42.45m, 考虑到光纤中的光传播速度, 腔的基频应为 $f_0 = \frac{c}{nL}$, 估算为 4.7MHz。根据图 4a 通过计算 50ns 中的脉冲峰数目, 得到了脉冲周期为 $T_1 = 3.569ns$, 于是脉冲频率为 $f_1 = 280.2MHz$ 。同理, 由图 4b 得到脉冲周期为 $T_2 = 1.19ns$, 脉冲频率为 $f_2 = 840.3MHz$ 。原则上, 脉冲的重复频率应该是基频的整数倍, 根据刚才估算的基频, 脉冲的重复频率必然满足 $f_1 = 60f_0$ 和 $f_2 = 180f_0$ 。因此, 可以准确地推断出基频为 $f_0 = 4.669MHz$ 与估算到的基频 $f_0 = 4.7MHz$ 是基本相吻合的。

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 NALM 调节到脉冲的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。

4 结论

对非线性放大环境的传输特性进行了分析, 并把它用到了被动锁模光纤激光器里。在关于 8 字形被动锁模掺铒光纤激光器中脉冲的实验中, 观察到了稳定

的锁模脉冲, 重复频率为 280 2MHz, 中心波长是 1556 235nm, 线宽是 0.4nm, 该实验研究结果对更加深入地了解被动锁模产生现象, 及进一步开展后续研究具有极其重要的意义。

参 考 文 献

- [1] CKAOK, HOCKNAM G A Dielectric fiber surface waveguide for optical frequencies [J]. Proc IEEE, 1966, 113: 1151-1158
- [2] SARUWATORIM. All optical signal processing in ultrahigh-speed optical transmission [J]. Electron Lett 1994, 32(9): 98-105
- [3] DESURVIRE E. The golden age of optical fiber amplifiers [J]. Physics Today 1994(1): 20-27
- [4] TAGA H. Long distance transmission experiments using the WDM technology [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(6): 1287-1298
- [5] 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).
- [6] HE H Ch, YANG L Zh, WANG Y C. Generation of 1.5ps pulses with 0.7nJ of energy based on polarization additive pulse mode locking [J]. Laser Technology, 2007, 31(1): 77-79(in Chinese).
- [7] RICHARDSON D J, LAM NG 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
- [8] DULNG IN. Subpicosecond all fiber erbium laser [J]. Electron Lett 1991, 27(6): 544-545
- [9] RICHARDSON D J, LAM NG R I, PAYNE D N, *et al*. Pulse repetition rates in passive selfstarting femtosecond soliton fiber laser [J]. Electron Lett 1991, 27(16): 1451-1453.
- [10] ZIRNGIBL M, STULZ L W, HUG I J, *et al*. 1.2ps pulses from passively mode locked laser diode pumped Er doped fibre ring laser [J]. Electron Lett 1991, 27(19): 1734-1735
- [11] 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
- [12] MOROKA T. An ultrafast reflective optical Kerr demultiplexer using polarization rotation mirror [J]. Electron Lett 1992, 28(6): 521-522
- [13] OMAHONY M J. Optical multiplexing in fiber networks: progress in WDM and OTDM [J]. IEEE Communication Magazine 1995, 33(12): 82-88
- [14] SMITH K. All optical clock recovery using a mode locked laser [J]. Electron Lett 1992, 28(19): 1814-1816
- [15] ELLIS A D, SMITH K, PATRICK D M. All optical clock recovery at bit rates up to 400Gb/s [J]. Electron Lett 1993, 29(15): 1323-1324
- [16] YOSHIDA E, NAKAZAWA M. Low-threshold 115GHz continuous-wave modulation instability erbium doped fiber laser [J]. Opt Lett 1997, 22(11): 1409-1411

(上接第 630页)

给定虚警率下设计 APD 反向工作电压和比较器阈值可以使探测器信噪比达到最大。鞍点算法由于对 APD 输出采用截断时刻发生函数来模拟, 其计算结果精确度比近似算法略差。传统的高斯算法会引起显著的误差, 因为高斯近似将 APD 的输出当作一个连续的高斯随机变量, 而 APD 的输出分布函数只有在接近平均值时才可以看作高斯分布函数。

参 考 文 献

- [1] HELSTROM C W. Computing the performance of optical receivers with avalanche diode detectors [J]. IEEE Transactions on Communication 1988, 36(1): 61-66
- [2] DAVIDSON F M, SUN X. Gaussian approximation versus nearly exact performance analysis of optical communication systems with PPM signaling and APD receivers [J]. IEEE Transactions on Communication 1988, 36(11): 1182-1192
- [3] SUN X, DAVIDSON F M. Receiver characteristics of laser altimeters with avalanche photodiodes [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 1992, 28(1): 268-271.
- [4] WANG L, YANG Zh J. Research of backscattered laser energy with the energy measurement for large caliber and high energy laser [J]. Laser Technology, 2006, 30(1): 43-46(in Chinese).
- [5] PALM L S, HARTW, HLAVKA D. Geoscience laser altimeter system (GLAS) algorithm theoretical basis document version 3.0 [M]. Goddard USA: NASA Goddard Space Flight Center, 1999, 66-89
- [6] ABHIRE J B, SUN X, AFZAL R S. Mars orbiter laser altimeter receiver model and performance analysis [J]. Appl Opt 2000, 39(15): 2440-2460.
- [7] PENG Q W, HE P K. Detecting probability and false alarm rate study of digital signal processor of laser ranger [J]. Laser Technology 2004, 28(5): 527-530(in Chinese).
- [8] LI R D, ZHANG Zh P, YANG F M. The selection of optimal wavelength pairs for two-color satellite laser ranging [J]. Laser Technology, 2005, 29(6): 645-648(in Chinese).
- [9] MONTYRE R J. The distribution of gains in uniformly multiplying avalanche photodiodes: theory [J]. IEEE Transactions on Electron Devices 1972, 19(6): 703-713
- [10] CONRADI J. The distribution of gains in uniformly multiplying avalanche photodiodes: experimental [J]. IEEE Transactions on Electron Devices 1972, 19(6): 713-718.
- [11] SUN B, WANG X B. Range finding capability of laser range finder by extinction-ratio measurement without target [J]. Laser Technology 2004, 28(1): 82-84(in Chinese).
- [12] EG&G Canada Ltd. Photodiode C30954E data sheet [M]. Arizona USA: Electro Optics RCA Inc, 1991, 1-6