

文章编号: 0253-2239(2001)05-0567-04

有理数谐波主被动锁模掺铒光纤激光器

王 林 李景镇 徐 平
(深圳大学科技研究院, 深圳 518060)

摘要: 在理论上详细分析了利用非线性光学环形镜(NOLM)来减小输出脉冲幅度波动、消除噪声并对脉冲进行压缩整形的物理机制。在主动锁模掺铒光纤环形激光器(AHML-EDFL)接入一个非线性光学环形镜,形成结构新颖的主被动锁模掺铒光纤激光器(APHML-EDFL),利用非线性光学环形镜所具有的饱和吸收体功能,成功地抑制了 4 阶有理数谐波锁模(RHML)中较大的幅度噪声,在 1 GHz 量级的调制频率下,由主被动锁模掺铒光纤激光器获产生重复频率为 5.1 GHz、幅度相当稳定的 4 阶有理数谐波锁模脉冲序列。

关键词: 非线性光学环形镜;主被动锁模掺铒光纤激光器;饱和吸收体;有理数谐波锁模

中图分类号: TN248 文献标识码: A

1 引 言

在光纤通信系统中,超短光脉冲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。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光脉冲源^[1]。随着光纤通信系统传输速率不断上升,各国科研人员正在努力研制能够产生高重复率(1 GHz~200 GHz)输出脉冲的途径。其中有理数谐波锁模(RHML)技术是一种获取高重复率光脉冲序列行之有效的新方法^[2]。然而在主动锁模掺铒光纤环形激光器(AHML-EDFL)中使用有理数谐波锁模方法时,仅能够获得较为稳定的 2 阶($n = 2$)有理数谐波锁模脉冲序列;当 $n > 2$ 时,输出脉冲序列出现较大的幅度波动^[3],这是光纤通信系统所不容许的。

导致有理数谐波锁模高阶($n > 2$)输出脉冲幅度不等的原因有两个:一是超模噪声,二是幅度噪声。消除超模噪声的方法通常有以下两种:一是通过在主动锁模掺铒光纤环形激光器中设置一个由两个单向环形腔构成的复合腔,利用该复合腔具有控制纵模的作用来抑制超模噪声^[4];二是利用自相位调制(SPM)效应和光学滤波器来抑制超模噪声^[5]。幅度噪声在有理数谐波锁模中是不可避免的,其诱因是失配的低阶谐波所为。根据有理数谐波锁模运转机理可知腔内的幅度噪声会随着谐波锁模阶数 n 的上升而变大,该噪声一般是难于通过调节调制器偏

压或调制信号电压以及法布里-珀罗(F-P)滤波器来有效地加以抑制。为此我们尝试利用非线性光学环形镜(NOLM)所具有的非线性调制特性来对主腔中的光脉冲进行再调制,从而使主动锁模掺铒光纤环形激光器输出的高阶锁模脉冲序列幅度较为均衡。

2 非线性光学环形镜传输特性分析

非线性光学环形镜(NOLM)因其特有的调制性能越来越受到众多光学信息处理工作者的青睐,它很可能在高速光信号产生与处理以及全光通信中崭露头角,发挥着其他光学元件难以替代的作用。非线性光学环形镜的工作原理是将一个光纤耦合器的两个输出端相连,构成一个萨尼亚克(Sagnac)光纤干涉环,如图 1 所示。

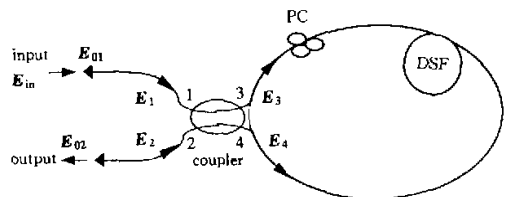


Fig. 1 Schematic of the NOLM

当一束光从光纤耦合器端口 1 输入时,将在萨尼亚克光纤环中形成两束相向传输的光波,若这两束光具有不同光强,由于光纤的非线性克尔效应,沿顺时针方向和逆时针方向传输的两束光将获得不同的非线性相移,其大小可分别表示为^[6]

$$\delta\phi_s = \frac{2\pi n_2 |E_3|^2 L_{\text{NOLM}}}{\lambda A_{\text{eff}}}, \quad (1a)$$

$$\delta\phi_c = \frac{2\pi n_2 |E_4|^2 L_{\text{NOLM}}}{\lambda A_{\text{eff}}}. \quad (1b)$$

这两束光在绕非线性光学环形镜运行一周后所产生的非线性相位差,即克尔相差为

$$\Delta\phi = \delta\phi_s - \delta\phi_c = \frac{2\pi n_2 L_{\text{NOLM}}}{\lambda A_{\text{eff}}} (|E_4|^2 - |E_3|^2), \quad (2)$$

其中 E_3 和 E_4 分别为沿顺时针方向和反时针方向传输的光矢量, $\delta\phi_s$ 和 $\delta\phi_c$ 分别为它们各自所产生的相移, n_2 是非线性克尔系数, L_{NOLM} 为非线性光学环境的长度, A_{eff} 为有效模场面积, λ 为入射光脉冲的中心波长。

当输入光较弱时, $\Delta\phi$ 很小, 入射光将从入射端反射回去; 如果入射光较强, 则 $\Delta\phi$ 将随着相向传输的两束光的强度差的加大和光学环形镜长度的增加而变大, 从而在端口 2 会有光强随 $\Delta\phi$ 而变的透射光输出。若从端口 1 和 2 输入光波的光矢量分别为 E_1 和 E_2 , 它们经过耦合器后被分成光矢量分别为 E_3 和 E_4 的两束相向传输光波, 这两束光波在端口 3 和 4 的光场可表示为

$$\begin{pmatrix} E_3 \\ E_4 \end{pmatrix} = K \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{\alpha} & i\sqrt{1-\alpha} \\ i\sqrt{1-\alpha} & \sqrt{\alpha} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

(3)式中 K 为耦合器的传输矩阵, α 为耦合器的耦合系数(功率耦合比), 根据耦合器的传输矩阵, 得到输出光场与输入光场的关系式

$$\begin{pmatrix} E_{01} \\ E_{02} \end{pmatrix} = K \begin{pmatrix} E_{43} \\ E_{34} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{\alpha} & i\sqrt{1-\alpha} \\ i\sqrt{1-\alpha} & \sqrt{\alpha} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{43} \\ E_{34} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

其中 E_{34} 和 E_{43} 分别表示从端口 3 和 4 射出的两相向传输光波在绕环形镜运行一周后分别到达端口 4 和 3 时的光矢量。若输入到耦合器上的光波仅从端口 1 入射, 设其光矢量为 E_m , 根据上式我们可得到非线性光学环形镜端口 2 出射光场的表达式

$$|E_{02}|^2 = |E_m|^2 \left(1 - 2\alpha(1-\alpha)|1 + \cos[(1-2\alpha)|E_m|^2 \times 2\pi n_2 L_{\text{NOLM}}/(\lambda A_{\text{eff}})] \right), \quad (5)$$

由(5)式得到如图 2 所示的非线性光学环形镜输出光功率 P_0 随输入光功率 P_m 变化的关系曲线。该图表明非线性光学环形镜对输入光波具有非线性调制

特性, 当 $P_m < P_1$ 时, 非线性光学环形镜可等效为一个饱和吸收体; 而当 $P_1 < P_m \leq P_2$ 时, 透射光强将随入射光强的增大而减小直到为零, 此时非线性光学环形镜犹如一个饱和透射体。

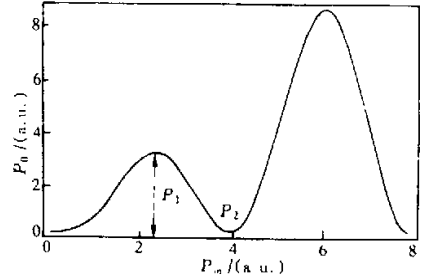


Fig.2 Transmission characteristic of the NOLM

从(5)式可知非线性光学环形镜的非线性调制特性不仅取决于输入脉冲的峰值功率 P_m 和腔长 L_{NOLM} , 而且与耦合器的耦合系数密切相关。当 $\alpha = 1/2$ 时, 在非线性光学环形镜内运行的两相向传输的光波将有相同的光强, 从而使得 $\Delta\phi = 0$, 此时非线性光学环形镜相当于一个全反射镜; 而当 $\alpha \neq 1/2$ 时, 若 E_m 满足下式

$$\frac{n_2 2\pi |E_m|^2 L_{\text{NOLM}}}{\lambda A_{\text{eff}}} = \frac{m\pi}{1-2\alpha} \quad (m \text{ 为奇数}), \quad (6)$$

则入射光将从耦合器的端口 2 全部透射, 这时非线性光学环形镜可以视为一个全透镜。图 3 给出了在腔长一定的情况下, 非线性光学环形镜传输特性随 α 而变的情况。

事实上, 在光纤中还存在着双折射, 这使得在非线性光学环形镜中相向传输的两束光脉冲会因偏振态的不同而引入一定的相差, 调节环内偏振控制器(PC)可改变由双折射引起的相差, 即非线性光学环形镜的非线性传输特性会随偏振控制器所引入的偏振旋转角度 θ 不同而有所改变。

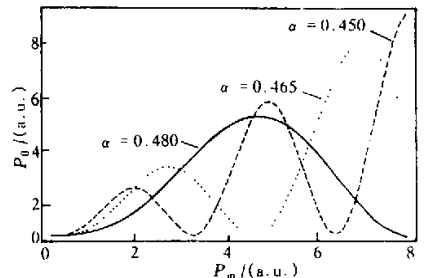


Fig.3 Transmission characteristic of the NOLM for different α

3 非线性光学环形镜在锁模掺铒光纤激光器中的作用

由以上对非线性光学环形镜调制特性的分析结果,可知非线性光学环形镜能够提供与强度有关的损耗。在我们的实验中由于注入到非线性光学环形镜上脉冲峰值功率 $P_m < P_1$,因此是将非线性光学环形镜作为一个等效饱和吸收体接入到主动锁模掺铒光纤环形激光器上。考虑到饱和吸收体的吸收调制类似于主动锁模情况下的损耗调制,所不同的是饱和吸收体的损耗调制是由腔内光强变化引起的,并受其制约。因此非线性光学环形镜在我们的实验中是作为一个被动锁模装置,用它来抑制在较高阶的非线性光学环形镜时,因模式耦合不紧,导致较低阶谐波往往处于失配状态所造成的相当严重的幅度噪声。作为一个饱和吸收体的非线性光学环形镜,它具有染料盒的光致透明效应,即强度高的光波由于染料接近漂白而遭受很小的损耗,而脉冲前、后沿因

其强度低于峰值而被染料吸收较多,所以脉冲的峰值经过非线性光学环形镜从端1、2射出时所受到的损耗要比其两翼小,这样就使得一些峰值功率较低的噪声或基座波只能从端口1反射回主腔,并在主腔的光隔离器处损耗掉。

根据三能级激光系统速率方程^[7],图4所示的主被动联合锁模掺铒光纤激光器腔模光子数可表示为

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\eta_s \sigma_e n_{2E} (1+q)}{A_{\text{eff}} \tau_c} - \frac{\eta_s \sigma_a n_{1E} q}{A_{\text{eff}} \tau_c} - \frac{\ln[\alpha_L R(\lambda)] q}{\tau_c}, \quad (7)$$

其中 q 为腔模光子密度, τ_c 为腔模光子的平均寿命, η_s 为信号光场, σ_e 为信号光受激截面, σ_a 为信号光吸收截面, n_{2E} 和 n_{1E} 分别表示激光系统上下能级的粒子数密度, α_L 为光纤激光器的剩余损耗, R 为非线性光学环形镜的反射率。

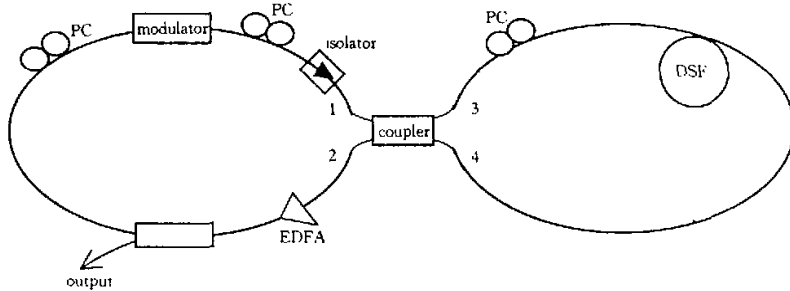


Fig. 4 Experimental setup of RH actively and passively modelocked Er-doped fiber laser

显然,(7)式等号右边第一项表示受激辐射引起腔内振荡模的光子数增加的速率,而第三项则表示与光强有关的腔内损耗所造成的腔内光子数减少速率。由(5)式我们可将非线性光学环形镜的反射率表示为

$$R(\lambda) = 4\alpha(1-\alpha) \times \cos^2 \left[\frac{\pi}{\lambda A_{\text{eff}}} (1-2\alpha) n_2 L_{\text{NOLM}} |E_m(\lambda)|^2 \right], \quad (8)$$

因 $R(\lambda)$ 对于一些振幅较小的光矢量具有很强的反射率,因此,非线性光学环形镜可以有效地抑制超模噪声和弛豫振荡。

4 实验结果

图4为我们的实验装置,该激光器实际上是在主动锁模掺铒光纤环形激光器上加了一个非线性光学环形镜来构成一个附腔,从而形成主被动联合锁

模光纤激光器(APHML-EDFL),用它可产生相当稳定的高阶锁模脉冲序列。非线性光学环形镜是由色散位移光纤(DSF)构成,其长度与注入脉冲的速率相匹配,为了加大非线性作用距离,取 L_{NOLM} 约为1.2 km,掺铒光纤放大器(EDFA)输出功率为4 mW。实验时,首先使主腔运行在4阶有理数谐波锁模状态。然后,仔细调节非线性光学环形镜环内的偏振控制器,使得输出光脉冲的峰值功率达到最

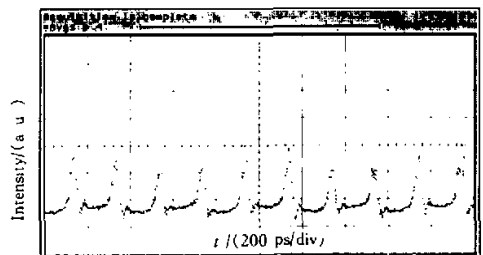


Fig. 5 Output pulse trains of 4RH from APHM-EDFL

大。图 5 和图 6 分别为主被动锁模掺铒光纤激光器和主动锁模掺铒光纤环形激光器产生的 4 阶有理数谐波锁模脉冲序列, 将这两个图进行比较, 可清楚地看出经非线性光学环形镜作用后, 由主被动锁模掺铒光纤激光器输出的高阶有理数谐波锁模脉冲序列的质量较未通过非线性光学环形镜作用时所得到的同样阶数的有理数谐波锁模脉冲序列有明显的提高。可见主被动锁模掺铒光纤激光器有效地抑制了腔内各种噪声对输出脉冲的影响。

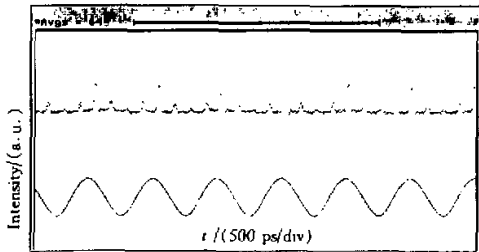


Fig.6 Output pulse trains of 4RH from AHML-EDFL

结论 本文在理论上对非线性光学环形镜在光纤激光器中所起的作用做了较详细的分析。在实验上, 通过在主动锁模光纤激光器中接入一个非线性光学环形镜来构成附腔, 形成主被动锁模掺铒光纤激光器, 在调制频率 f_m 为 1 GHz 量级情况下, 成功地利用有理数谐波锁模调制技术和非线性光学环形

镜非线性调制特性, 产生了幅度相当均衡的 4 阶有理数谐波锁模 ($f_0 = 4f_m = 5.1$ GHz) 脉冲序列。理论分析与实验结果表明在主被动锁模掺铒光纤激光器中采用非线性光学环形镜不仅可以有效地抑制多种噪声, 以较大地改善激光器处于高阶有理数谐波锁模运转时, 输出脉冲幅度大幅度涨落的不足; 而且还对腔内循环脉冲具有压缩整形和滤波的功能。

参 考 文 献

- [1] 马晓红, 于晋龙, 王 林等. 光时分复用系统中单路时钟提取. 光学学报, 1999, 19(11):1541~1545
- [2] 王 林, 于晋龙, 马晓红等. 有理数谐波锁模掺铒光纤环形激光器. 中国激光, 1999, A26(2):109~112
- [3] 王 林, 于晋龙, 马晓红等. 主动锁模掺铒光纤环形激光器有理数谐波锁模调制技术. 物理学报, 1999, 48(5):120~125
- [4] Onodera N. Supermode beat suppression in harmonically mode-locked erbium-doped fiber ring lasers with composite cavity structure. *Electron. Lett.*, 1997, 33(11):962~963
- [5] Nakazawa M, Tamura K. Supermode noise suppression in a harmonically modelocked fiber laser by self-phase modulation and spectral filtering. *Electron. Lett.*, 1996, 32(5):461~463
- [6] Doran N J, Wood D. Nonlinear-optical loop mirror. *Opt. Lett.*, 1994, 13(1):56~58
- [7] 陈英礼. 激光导论. 北京: 电子工业出版社, 1986. 162~165

Rational Harmonic Actively-Passively Mode-Locked Erbium-Doped Fiber Laser

Wang Lin Li Jingzhen Xu Ping

(Science and Technology College, Shenzhen University, Shenzhen 518060)

(Received 23 March 2000; revised 28 September 2000)

Abstract: It is analyzed that the physical mechanism of decreasing the amplitude fluctuation of output pulse train and eliminating some noise as well as compressing and shaping the pulse train by using a nonlinear optical loop mirror (NOLM). Experimentally the NOLM is placed in an actively harmonic mode-locked erbium-doped fiber ring laser to form an actively and passively mode-locked Er-doped fiber laser (APHML-EDFL). By means of function of saturable absorber of NOLM, the noise of the fourth rational harmonic mode-locked (RHML) pulse train is successfully suppressed and the fourth harmonic mode-locked of very stable amplitude with repetition rate of 5.1 GHz is obtained with modulation frequency of 1 GHz.

Key words: nonlinear optical loop mirror; actively-passively mode-locked erbium-doped fiber laser; saturable absorber; rational harmonic mode-locked