

主被动锁模光纤激光器的脉宽计算 及其稳定性分析*

曹顺湘 王发强 陈明华 温扬敬 杨祥林

(东南大学电子工程系光纤室, 南京 210096)

摘 要 分析了主被动锁模光纤环形孤子激光器的运行机理, 用分裂步长法作了数值模拟, 获得了重复频率为 10 GHz, 脉宽为 985 fs 的稳定的孤子脉冲序列。通过孤子参量演化方程的求解, 获得了光纤环形孤子激光器的稳定运行条件及孤子脉宽的解析表达式。

关键词 孤子激光器, 重复频率, 主被动锁模。

1 引 言

光孤子通信是高速度长距离的全光通信, 理论和实验的研究都取得了很大的进展。实验已证明 5 GHz 编码的光孤子可以进行几百万公里无误码传输^[1]。10 GHz、20 GHz 的孤子传输实验也有报道。为了更大地提高传输容量, 高重复频率、脉宽在亚皮秒至飞秒量级光孤子源的研究就显得更加重要。

利用非线性偏振旋转作为锁模机制的光纤环形孤子激光器可产生飞秒量级的输出脉冲, 但这种激光器重复频率较低, 并且不够稳定^[2]。用主动锁模可以提高激光器的重复频率, 但是其输出孤子的脉宽较宽。若将主被动锁模结合起来就能获得脉宽窄、重复频率高的孤子脉冲序列。本文详细分析了损耗调制非线性偏振旋转主被动锁模光纤环形孤子激光器的运行机理, 用分裂步长法作了数值模拟, 获得了重复频率为 10 GHz、脉宽为 985 fs 的稳定的孤子脉冲序列。并用守恒量扰动法获得了激光器稳定运行条件及脉宽的解析表达式。

2 光纤环形孤子激光器的结构及数学模型

损耗调制偏振旋转光纤环形孤子激光器由起偏器、偏振控制器、光调制器、光滤波器、光隔离器、掺铒光纤、波分复用器和泵浦源等部件组成, 其结构如图 1 所示, 激光器腔长为 L , 光纤的损耗为 α 。光隔离器使腔内的光信号单向传输。电光幅度调制器用来产生主动锁模, 调制频率为腔基频率为腔基频的整数倍。光纤滤波器用来滤除因腔内扰动引起的孤子频谱的次峰, 提高系统的稳定性^[3]。光信号经起偏器后变成线偏振光, 线偏振光经偏振控制器

* 国家科委 863 高科技项目及国家自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1996 年 5 月 12 日; 收到修改稿日期: 1996 年 7 月 7 日

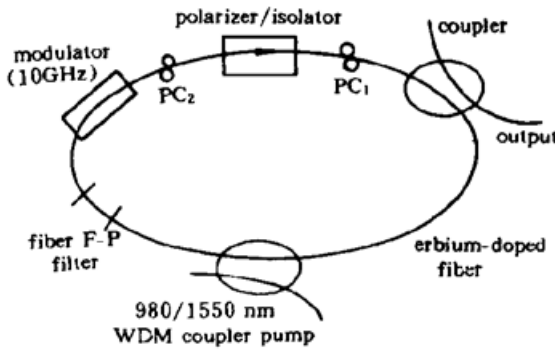


Fig. 1 The configuration of fiber ring laser

耦合传输方程为^[4]:

$$i \frac{\partial U_x}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U_x}{\partial \tau^2} + [|U_x|^2 + \frac{2}{3} |u_y|^2] U_x = \frac{i}{2} (g - \alpha) L_D + \frac{L_D}{B^2 L T_0^2} \frac{\partial^2 U_x}{\partial \tau^2} \quad (1)$$

$$i \frac{\partial U_y}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U_y}{\partial \tau^2} + [|U_y|^2 + \frac{2}{3} |u_x|^2] U_y = \frac{i}{2} (g - \alpha) L_D + \frac{L_D}{B^2 L T_0^2} \frac{\partial^2 U_y}{\partial \tau^2} \quad (2)$$

其中 $\xi = (|\beta_2|/T_0)Z$, $\tau = (1/T_0)(t - Z/v_g)$, $U_x = A/\sqrt{P_0}$, $U_y = A_y/\sqrt{P_0}$, $P_0 = |\beta_2|/YT_0$, L_D 为色散长度, B 为滤波器的带宽, L 为腔长, g 为掺铒光纤的增益, α 为光纤损耗, 偏振控制器是用来改变输入脉冲偏振态的, 它在腔中对脉冲的作用可用其琼斯矩阵来表示:

$$P = \begin{bmatrix} \cos^2 \rho e^{i\delta/2} + \sin^2 \rho e^{-i\delta/2} & 2i \cos \rho \sin \rho \sin \delta/2 \\ 2i \cos \rho \sin \rho \sin \delta/2 & \cos^2 \rho e^{-i\delta/2} + \sin^2 \rho e^{i\delta/2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中 ρ 为腔内传输脉冲的坐标系和偏振控制器坐标系之间的夹角, δ 为偏振控制器 x 分量和 y 分量之间的相位延迟。电光幅度调制器的调制函数可由下式来表示:

$$T = \exp[-d_a \sin^2(\omega_m t)] \quad (4)$$

其中 d_a 为调制深度, $\omega_m = 2\pi n c/Ln$ 为调制频率, m 为整数, n 为光纤的折射率, 如果 ω_m 为腔基频的整数倍, 则在任何一个瞬时, 腔内都会有 m 个脉冲在同时传输。

为了了解主被动锁模光纤环形孤子激光器的运行机制, 用分裂步长法对(1)~(4)式作了数值模拟, 设初始条件为随机噪声, 激光器参数为: $n_2 = 3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, $\alpha = 0.25 \text{ dB/km}$, $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$, $D = 2.5 \text{ ps/km} \cdot \text{nm}$, $L = 15.2 \text{ m}$, $d_a = 0.5$, $f_m = 10 \text{ GHz}$, $\delta = \pi/2$, $\rho = 30^\circ$, $B = 16.83 \text{ nm}$ 激光器单程增益为 3.075 dB , 脉宽的度量单位为 $T_0 = 980 \text{ fs}$, 耦合输出为 3 dB , 则可得到重复频率为 10 GHz 、脉宽为 985 fs 的稳定的孤子脉冲序列^[5]。

3 激光器脉宽的计算及其稳定性分析

为了分析方便, 把由偏振旋转所引起的附加脉冲锁模等效为快速饱和吸收体的作用^[6], 快速饱和吸收体的作用可表示为: $-L_{FSR} + \gamma|U|^2$, 其中 L_{FSR} 为饱和吸收体的线性损耗, γ_3 为饱和吸收体的非线性增益系数, 激光器稳定运行必须满足下面的路径平均锁模方程^[7]:

$$\frac{\partial U}{\partial Z} - \frac{i}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - i\delta_3 |U|^2 U = (g - l)U + \frac{1}{B^2 L} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + \gamma_3 |U|^2 U - \frac{1}{L} d_a \omega_m^2 t^2 U \quad (5)$$

其中 $l = \alpha + L_{FSR}$, δ_3 为自相位调制系数, B 为滤波器的带宽。采用与上节相同的归一化变量, 由(5)式即可得到脉冲慢变包络所满足的路径平均归一化的非线性薛定谔方程:

(PC)后变成椭圆偏振光, 而椭圆偏振光可以看成两个振幅不等但偏振相互垂直的圆偏振光的合成, 这两个圆偏振光沿光纤相互耦合传输, 受到光纤中非线性效应的作用, 它们的合成矢量沿光纤不断旋转, 当它们回到起偏器时又成为线偏振光, 这样就获得了与强度有关的损耗, 产生被动锁模。在传输过程中光信号还受到电光幅度调制器的作用, 此过程不断重复进行形成主被动锁模。偏振相互垂直的两个圆偏振光在掺铒光纤中

$$i \frac{\partial A}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + |A|^2 A = i[\delta A + \beta \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \alpha_1 |A|^2 A - \alpha_2 T^2 A] \quad (6)$$

其中 $\delta = L_D(g - l)/2$, $\alpha_1 = \gamma_3/\delta_3$, $\alpha_2 = L_D d_a \omega_m^2/L$, $\beta = L_D/B^2 T_0^2 L$ 。设(6)式在 $\delta = \beta = \alpha_1 = \alpha_2 = 0$ 时的解为:

$$A(\xi, T) = \eta \operatorname{sech}[\eta(T + \kappa\xi)] \exp i[-\kappa T + (\eta^2 - \kappa^2)\xi/2] \quad (7)$$

其中 η 为孤子幅度, κ 为孤子频移。在有扰动情况下, (7) 式中的 η, κ 不再是常数而是传输距离的慢变函数, 由守恒量扰动法可求得孤子参数的演化方程:

$$d\eta/d\xi = -\alpha_2(\pi^2/6\eta + 2\eta\kappa^2\xi^2) + 2\delta\eta + (4/3)\alpha_1\eta^3 - 2\beta(\eta^3/3 + \kappa^2\eta) \quad (8)$$

$$d\kappa/d\xi = - (4/3)\beta\kappa\eta^2 \quad (9)$$

(8) 式右边的第一项反映了调制器对孤子幅度的影响, 它有明显的物理意义: 孤子幅度越大(对应脉宽越小), 损耗越小; 孤子中心越偏离同步位置, 损耗越大。

因(6)式右边各项均为微扰, 所以激光器最后的稳定输出接近于标准孤子, 由孤子面积定理知可用 τ (无量纲的孤子脉宽) 代替 $1/\eta$, $\Delta\omega$ (无量纲的频移) 代替 κ , 则(8)、(9)两式成为:

$$d\tau/d\xi = -\alpha_2(\pi^2\tau^3/6 + 2\tau\Delta\omega^2\xi^2) - 2\delta\tau + 4\alpha_1/3\tau + 2\beta(1/3\tau + 3\tau\Delta\omega^2) \quad (10)$$

$$d\Delta\omega/d\xi = - (4/3\tau^2)\beta\Delta\omega \quad (11)$$

由(10)式可见, 若系统受到某种扰动使 τ 增加, 调制器对系统的作用并不是使 τ 减小, 而是使 τ 继续加大, 这显然会导致系统的不稳定, 然而滤波器的作用却使得 τ 减小, 回到平衡状态, 显然由于滤波器的这种“回复力”作用使得系统趋于稳定。由(11)式可看出, 由于滤波器的存在, 使得孤子频移随着脉冲在腔内的演化越来越小, 脉冲在激光腔中经多圈演化之后, $\Delta\omega \rightarrow 0$, 所以若不考虑 $\Delta\omega^2\xi^2$ 对系统平衡点的影响, 则(10)、(11)式为一自治系统, 因而有平衡点 $(\tau_0, 0)$, 由 $d\tau/d\xi = d\Delta\omega/d\xi = 0$ 得:

$$\alpha_2\pi^2\tau_0^3/6 - 2\delta\tau_0 - 4\alpha_1/3\tau_0 + 2\beta/3\tau_0 = 0 \quad (12)$$

所以系统平衡时的脉宽为:

$$\tau_0 = 6\delta/\pi^2\alpha_2 \pm (6/\pi^2\alpha_2) \sqrt{\delta^2 + (\pi^2\alpha_2)/9(2\alpha_1 - \beta)} \quad (13)$$

由此式可见, 激光器似乎存在双稳态。一个对应于低峰值强度, 宽脉宽, 另一个对应于高峰值强度, 窄脉宽。下面来讨论这两个解的稳定性。

系统的平衡点并不一定是稳定点, 将 τ 在平衡点 τ_0 处线性展开, 令 $\tau = \tau_0 + \tau_1$, τ_1 为由微扰引起的脉宽的抖动, 将 τ 的表达式代入(10)式得:

$$\frac{d\tau_1}{d\xi} = \left[\frac{\pi^2\alpha_2}{2}\tau_0^2 - 2\delta + \frac{2}{3}(2\alpha_1 - \beta) \right] \tau_1 \quad (14)$$

要使激光器能稳定运行必须满足

$$\frac{\pi^2\alpha_2}{2}\tau_0^2 - 2\delta + \frac{2}{3}(2\alpha_1 - \beta) \leq 0 \quad (15)$$

(12)、(15)式即为激光器的稳定运行条件。将(12)式代入(15)式得:

$$\tau_0 < \frac{6\delta}{\pi^2\alpha_2} \quad (16)$$

所以激光器稳定运行时脉宽的解析表达式为:

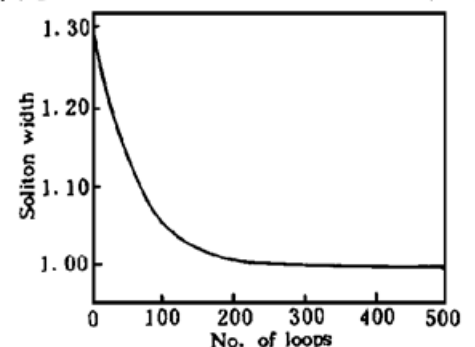


Fig. 2 Variation of soliton with the distance in the laser

$$\tau_0^2 = \frac{6\delta}{\pi^2\alpha_2} - \frac{6}{\pi^2\alpha_2} \sqrt{\delta^2 + \frac{\pi^2\alpha_2}{9} [2\alpha_1 - \beta]} \quad (17)$$

(10) 式可用四阶龙格-库塔法进行数值求解。激光器的参数与前面一致, 得到如图 2 所示脉宽的演化曲线。由图 2 可见, 随着脉冲在腔内的演化, 脉宽越来越趋向其稳定值 $\tau_0 = 1$, 并且与由(17)式所计算的理论值及前面所作数值模拟的结果相吻合。

结 论 通过守恒量扰动法导出了损耗调制非线性偏振旋转主被动锁模光纤环形孤子激光器的稳定运行条件及孤子脉宽的解析表达式, 并通过数值模拟对本文的结论作了验证。可作为激光器的参数设计的理论依据。

参 考 文 献

- [1] M. Nakazawa, K. Suzuki, E. Yamada *et al.*, Experimental demonstration of soliton data transmission of unlimited distances with soliton control in time and frequency domains. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(9) : 729~ 730
- [2] Eiji Yoshida, Yasuo Kiknuka, Masataka Nakazawa, Femtosecond erbium-doped fiber laser with nonlinear polarization rotation and its soliton compression. *Japan J. Appl. Phys.*, 1994, **23**(12) : 5779~ 5783
- [3] K. Tamura, C. R. Doerr, H. A. Haus, Soliton fiber ring laser stabilization and tuning with a broad intracavity filter. *IEEE Photo. Tech. Lett.*, 1994, **6**(6) : 697~ 699
- [4] C. R. Menyuk, Nonlinear pulse propagation in birefringent optical fibers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987, **23**(2) : 174~ 176
- [5] 曹顺湘, 王发强, 陈明华等, 主被动锁模光纤环形孤子激光器的研究。中国激光, 1996, **23**(12) : 1072~ 1076
- [6] H. A. Haus, E. P. Ippen, K. Tamura, Additive pulse mode-locking in filter lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **30**(1) : 200~ 208
- [7] H. A. Haus, J. G. Fujimoto, E. P. Ippen, Structures for additive pulse mode-locking. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1991, **18**(10) : 2068~ 2076

Pulsewidth Calculation of Active-Passive Mode-Locking Fiber Ring Soliton Laser and Its Stability Analysis

Cao Shunxiang Wang Faqiang Chen Minghua

Weng Yangjing Yang Xianglin

(*Electronic Engineering Department, Southeast University, Nanjing 210096*)

(Received 12 May 1996; revised 7 July 1996)

Abstract The mechanism of active-passive mode-locking soliton laser is analysed. Using the split-step algorithm for numerical integrating NLSE (1-2) a 985 fs soliton train at 10 GHz is obtained. By solving the evolution equations the stability condition and analytic expressions for soliton width of the active-passive mode-locking fiber ring solution laser are deduced.

Key words soliton laser, repetition rate, active-passive mode-locking.