

文章编号 : 0253-2239(2001)12-1482-04

主动锁模光纤激光器的孤子理论分析*

张劲冶 宋立军 李世忱

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)
(教育部光电信号技术科学重点实验室, 天津 300072)

摘要: 系统考虑了光纤激光器腔构参数与锁模脉冲参数的制约关系, 建立了完整形式的振幅调制主动锁模光纤激光器的稳态方程, 据此方程分析了主动锁模光纤激光器腔参数对锁模孤子脉冲参数的影响, 分析了无啁啾孤子脉冲形成条件。

关键词: 光纤激光器; 主动锁模; 光孤子

中图分类号: TN241 文献标识码: A

1 引 言

实验证明锁模掺铒光纤激光器能够产生变换限制的孤子脉冲^[1]。1991 年 Hause 等人^[2,3]采用加成脉冲锁模理论对锁模光纤激光器进行了理论分析, 但在分析过程中只考虑了增益色散的影响, 没有考虑谱滤波影响, 而且这套理论仅适用于被动锁模。随后 Hause 等采用微扰理论分析了主动锁模激光器的稳定性条件, 在分析中忽略了增益色散的影响^[4]。1993 年 Fontana 等人^[5]依据主动锁模光纤激光器稳态方程, 通过分别考虑群速度色散和自相位调制作用, 分析了主动锁模激光器锁模脉冲由啁啾高斯脉冲向变换限制孤子脉冲的演变, 基本上解释了实验现象, 但在分析过程中采用的是分步近似方法, 没有考虑增益色散的影响, 并忽略了调制器的调制作用。

本文依据主动锁模光纤激光器的稳态锁模方程, 综合考虑了滤波器滤波、增益色散、群速度色散、自相位调制、调制器主动调制、增益和损耗等因素, 分析了主动锁模光纤激光器中色散参量、光纤长度、增益饱和和功率等参数对锁模孤子脉冲参数的影响; 分析了无啁啾孤子脉冲形成条件, 并分析了稳定锁模的条件。

2 主动锁模光纤激光器的孤子解

主动锁模环形光纤激光器主要由掺铒光纤放大

器(EDFA)、LiNbO₃ 调制器、偏振器、滤波器、光隔离器以及输出耦合器构成。射频信号源驱动 LiNbO₃ 调制器, 对腔内光场进行幅度调制(AM)或相位调制(FM); 掺铒光纤是增益介质, 提供腔内增益, 带通滤波器用来选择输出波长, 同时考虑不致影响锁模脉冲脉宽, 因此其透射带宽一般选为 2 nm ~ 5 nm。光隔离器保证光在腔内的单向运转构成行波腔。而偏振器看作是与调制器联用以保证激光器的损耗调制状态。由于通常锁模激光器采用普通单模光纤, 1550 nm 附近的光在光纤的负色散区传输, 而且环形激光器腔内光功率较高, 自相位调制(SPM)效应很强, 腔内脉冲可以变成孤子形式。

为描述振幅调制的主动锁模光纤环形激光器的工作原理, 许多人都作了理论尝试, 现实的方法是从腔内传播的光脉冲的稳态场方程出发, 分析其自洽解。这些成果中, 以文献[3,5]给出的稳态方程最具代表性, 但如上所述, 它们都有不完整性。我们综合了各种应用的主要影响因素, 将稳态锁模方程写为如下较为完整的形式:

$$\left(\frac{1}{\Delta\Omega_f^2 L} - \frac{1}{2}i\beta_2\right)\frac{d^2 u}{dt^2} + \left[g\left(1 + \frac{1}{\Delta\Omega_g^2}\frac{d^2}{dt^2}\right) - l\right]u - \frac{1}{2L}m\Omega_m^2 t^2 u - i\psi u + i\gamma|u|^2 u = 0, \quad (1)$$

式中 $1/(\Delta\Omega_f^2 L)$ 代表腔内带宽为 $\Delta\Omega_f$ 的带通滤波器的滤波作用, L 为掺铒光纤激光器腔长, β_2 为群速度色散参量, g 为增益系数, $\Delta\Omega_g$ 为增益介质的增益带宽, l 为损耗系数, m 为振幅调制的调制深度, Ω_m 为调制角频率, ψ 表示单位腔长的光波相移, γ 为非线性系数。(1)式的精确解可设为孤子形式^[3]

* 国家自然科学基金(69877012)、信息产业部武汉邮电科学研究院合作项目、天津市光电子联合科学研究中心资助课题。

$$u = A \operatorname{sech}(t/\tau) \exp[iC \ln \operatorname{sech}(t/\tau)], \quad (2)$$

式中 A 为脉冲幅度, τ 为脉冲脉宽, C 为啁啾参数。

对(2)式取二阶导数, 可得:

$$\frac{d^2 u}{dt^2} = \frac{1}{\tau^2} [-(2 + 3iC - C^2) \operatorname{sech}^2(t/\tau) + (1 + iC)^2] u. \quad (3)$$

将(3)式中的 $\operatorname{sech}^2(t/\tau)$ 按幂级数展开, 忽略高次项, 近似取为二项:

$$\operatorname{sech}^2(t/\tau) \approx 1 - (t/\tau)^2, \quad (4)$$

则有

$$\frac{d^2 u}{dt^2} = \frac{1}{\tau^2} [-(1 + iC) + (2 + 3iC - C^2) \frac{t^2}{\tau^2}] u, \quad (5)$$

$$|u|^2 = A^2 \operatorname{sech}^2(t/\tau) = A^2 - A^2 t^2 / \tau^2. \quad (6)$$

将(5)式、(6)式代入(1)式, 有

$$g - l - i\psi + i\gamma A^2 + \frac{-1 - iC}{\tau^2} \left[\frac{1}{(\Delta\Omega_f)^2 L} - \frac{1}{2} i\beta_2 + \frac{g}{\Delta\Omega_g^2} \right] + \frac{2 + 3iC - C^2}{\tau^4} \left[\frac{1}{(\Delta\Omega_f)^2 L} - \frac{1}{2} i\beta_2 + \frac{g}{\Delta\Omega_g^2} \right] t^2 - \frac{1}{2L} m\Omega_m^2 t^2 - i\gamma \frac{A^2}{\tau^2} t^2 = 0, \quad (7)$$

(7)式包含一个常数项和一个含 t^2 项, 令它们分别等于零, 可得两个方程:

$$g - l - i\psi + i\gamma A^2 + \frac{(-1 - iC)}{\tau^2} \left[\frac{1}{\Delta\Omega_f^2 L} - \frac{1}{2} i\beta_2 + \frac{g}{\Delta\Omega_g^2} \right] = 0, \quad (8)$$

$$\frac{2 + 3iC - C^2}{\tau^4} \left[\frac{1}{\Delta\Omega_f^2 L} - \frac{1}{2} i\beta_2 + \frac{g}{\Delta\Omega_g^2} \right] - \frac{1}{2L} m\Omega_m^2 - i\gamma \frac{A^2}{\tau^2} = 0. \quad (9)$$

(8)式的实部反映了腔增益与损耗的关系, 它决定了方程的稳定性条件; (9)式反映了腔参数对锁模脉冲特性的影响。其中增益是光功率的函数, 考虑增益饱和表达式为,

$$g = \frac{g_0}{1 + P/P_s} = \frac{g_0}{1 + A^2 \Omega_m \tau (\pi P_s)}, \quad (10)$$

式中, g_0 为峰值增益系数, P_s 为饱和功率, P 为腔内

光脉冲序列的平均功率。对于双曲正割脉冲, 通过积分并取平均, 可得腔内光脉冲序列的平均功率 $P = A^2 \Omega_m \tau / \pi$ 。

在激光器稳定工作情况下, 腔内增益抵消损耗, 有 $g = l$ 。当腔内光功率由 $g = l$ 确定以后, $A^2 \tau$ 即可确定, 令(9)式的实部和虚部分别等于零, 即可得到光脉冲的脉宽 τ 和啁啾参数 C 的方程组:

$$\left(\frac{1}{\Delta\Omega_f^2 L} + \frac{l}{\Delta\Omega_g^2} \right) (2 - C^2) + \frac{3}{2} \beta_2 C - \frac{1}{2L} m\Omega_m^2 \tau^4 = 0, \quad (11)$$

$$\frac{1}{2} \beta_2 (2 - C^2) - 3 \left(\frac{1}{\Delta\Omega_f^2 L} + \frac{l}{\Delta\Omega_g^2} \right) C + \gamma A^2 \tau^2 = 0, \quad (12)$$

$$g = l = \frac{g_0}{1 + A^2 \Omega_m \tau (\pi P_s)}. \quad (13)$$

3 孤子稳态方程的数值计算

对(11)式~(13)式, 采用如下参数进行数值模拟: 谐波调制角频率为 $\Omega_m = 2\pi \times 2.5$ GHz, 调制深度 $m = 0.2$, 调制器引入损耗为 5 dB, 滤波器带宽为 $\Delta\Omega_f = 2\pi \times 172.6$ GHz (2.5 nm) (3 dB FWHM), 插入损耗为 2.68 dB; 光纤的非线性系数 $\gamma = 20$ (W·km)⁻¹, 损耗系数为 0.2 dB/km, 耦合器输出 10%, 对应损耗为 0.46 dB; 光纤放大器带宽为 40 nm, 腔长为 $L = 60$ m。

图 1 分别是当腔长为 60 nm 时, 对应不同的腔内光脉冲的平均功率, 腔内光纤的色散参数对输出锁模脉冲脉宽、啁啾、谱宽和时间带宽积的影响。

由图 1 可以发现如下几点:

1) 由图 1(a) 发现, 对应最窄的锁模脉冲输出, 腔内光纤的色散值为负 (即 $D > 0, \beta_2 < 0$);

2) 由图 1(b) 发现, 实现最窄锁模脉冲对应的啁啾量并不为零, 即最窄脉冲处是带正啁啾的孤子脉冲, 而无啁啾孤子脉冲的脉宽较宽;

3) 由图 1(a) 可发现在负色散区, 随着腔内脉冲平均功率的增加, 输出脉冲宽度越来越窄, 而且最窄

脉冲对应的色散参数 D 也越来越大;

4) 由图 1(b) 发现, 随着腔内脉冲光平均功率的增加, 锁模脉冲的啁啾加大, 对于零啁啾锁模脉冲的

建立, 也需要较大的腔内色散;

5) 加大锁模脉冲光平均功率使得零啁啾脉冲对应的色散值更加远离最窄脉冲对应的色散点。

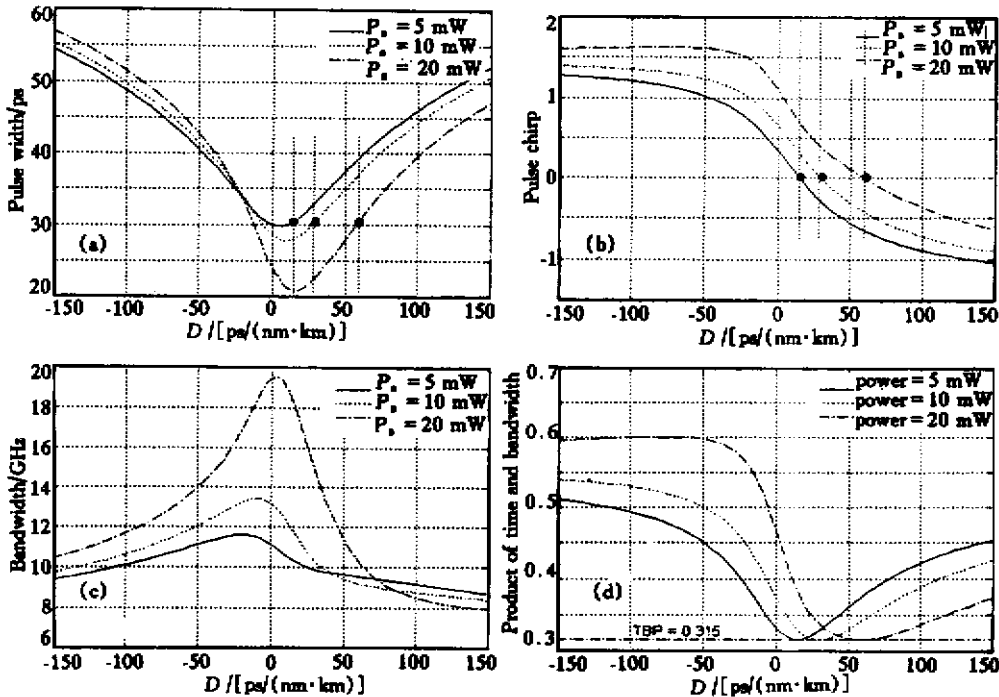


Fig. 1 The effects of dispersion parameters in intracavity fiber on the output mode-locked pulse width (a) pulse chirp (b), bandwidth (c) and product of time and bandwidth (d)

关于上面几点可以作如下理解: 腔内的正啁啾主要是由于自相位调制效应引起的, 在光纤的反常色散区, 光纤色散、滤波器的滤波效应和增益效应同时用来补偿由于自相位调制效应引入的正啁啾。当腔内锁模脉冲的平均功率较低时, 对应脉冲峰值功率低, 自相位调制效应张的啁啾量较小, 而其啁啾补偿主要是通过光纤的色散进行, 滤波器和增益色散的作用较小, 此时相应的无啁啾孤子脉冲对应的色散值接近于脉冲最窄处对应的色散值; 而当腔内脉冲的平均功率加大时, 脉冲峰值功率加大, 自相位调制效应在脉冲中心引入很强的线性啁啾, 脉冲的前后沿带有很强的非线性啁啾, 导致谱展宽 [如图 1(c)]。此时若腔内色散量较小时, 只能补偿部分线性啁啾, 而滤波器的滤波效应和增益色散效应可以有效地限制脉冲前后沿的增益, 同时滤波效应和增益色散效应也可有效地限制自相位调制效应引起的谱展宽, 引起快速损耗效应, 得到窄脉冲锁模输出, 但此时锁模脉冲带有明显的正啁啾; 若要得到无啁啾的孤子脉冲, 只有增加腔内色散, 利用腔内足够的色散补偿由自相位调制引入的线性啁啾, 即通过孤子整形效应使脉冲形成基态孤子。由基态孤子条件^[6]

$$P_1 = 3.11 |\beta_2| (\chi \gamma T_{FWHM}^2), \quad (14)$$

当腔内色散增加时, 脉冲展宽, 脉冲峰值功率相应降低, 因而当色散参数、脉宽和脉冲峰值功率满足上式时, 腔内色散足可以补偿非线性效应引起的正啁啾, 才能形成无啁啾的孤子锁模脉冲。所以当腔内放大器的饱和输出功率很大时, 形成基态孤子脉冲的脉宽是很宽的。

4 基态孤子的形成条件

综合图 1(a) 图 1(b) 可发现, 对于不同的腔内脉冲平均功率, 对应无啁啾孤子脉冲的脉宽基本上是一致的。而且当光脉冲平均功率加强时, 需要更大的光纤色散参量才能形成基态孤子。令(11)式和(12)式中的啁啾项 $C = 0$, 得到

$$2 \left(\frac{1}{\Delta \Omega_1^2 L} + \frac{l}{\Delta \Omega_g^2} \right) - \frac{1}{2L} m \Omega_m^2 \tau^4 = 0, \quad (15)$$

$$\beta_2 + \gamma A^2 \tau^2 = 0, \quad (16)$$

$$g = l = \frac{g_0}{1 + A^2 \Omega_m \tau (\pi P_s)}. \quad (17)$$

通过以上三式, 消去参数 A 和 τ , 即得到无啁啾孤子脉冲形成的条件:

$$2\left(\frac{1}{\Delta\Omega_r^2 L} - \frac{l}{\Delta\Omega_g^2}\right) - \frac{1}{2} m\Omega_m^2 \left[\frac{\beta_2 \Omega_m l}{(g_0 - l)\pi P_s} \right]^4 = 0, \quad (18)$$

由(15)式可发现,无啁啾锁模脉冲的脉宽由滤波器带宽、增益带宽、腔长、调制频率和调制深度等参数决定。孤子脉宽表达式为

$$\tau^4 = \frac{4L[1(\Delta\Omega_r^2 L) + 1(\Delta\Omega_g^2)]}{m\Omega_m^2}, \quad (19)$$

但同时,锁模脉冲还要满足(16)式,即基态孤子条件:

$$\tau^2 = |\beta_2|(\gamma A^2), \quad (20)$$

这说明当光脉冲峰值功率增加时,由于自相位调制效应加强,需要增加腔内色散以平衡自相位调制效应,形成基态孤子。

5 孤子脉冲稳定性分析

令(8)式的实部为零,得到

$$g = l + \frac{C\beta_2}{2\tau^2} + \frac{1}{\tau^2} \left(\frac{1}{\Delta\Omega_r^2 L} + \frac{g}{\Delta\Omega_g^2} \right) = l_1, \quad (21)$$

其中 l_1 是腔内总损耗系数(21)式实际上是代表了当光脉冲存在时($1/\tau^2 \neq 0$)和光脉冲不存在($1/\tau^2 = 0$)时腔内增益与损耗的情况。当 $1/\tau^2 = 0$ 时,对应连续运转时的情况,此时有 $g_{CW} = l$; 当 $1/\tau^2 \neq 0$ 时,如果要形成快速损耗,应有 $l_1 > l$, 即

$$\frac{C\beta_2}{2\tau^2} + \frac{1}{\tau^2} \left(\frac{1}{\Delta\Omega_r^2 L} + \frac{g}{\Delta\Omega_g^2} \right) > 0, \quad (22)$$

亦即

$$\frac{C\beta_2}{2} + \frac{1}{\Delta\Omega_r^2 L} + \frac{g}{\Delta\Omega_g^2} > 0, \quad (23)$$

即滤波器的滤波效应和增益色散作用引入足够大的快速损耗,锁模脉冲才能稳定。

结论 依据主动锁模光纤激光器的孤子锁模稳态方程,综合考虑了带通滤波器滤波、增益色散、群速度色散、自相位调制、调制器主动调制、增益和损耗等因素,分析了主动锁模光纤激光器中腔构参数对锁模孤子脉冲参数的影响;分析了无啁啾孤子脉冲形成条件,并分析了稳定锁模的条件。利用这一理论分析和数值计算模型可以精确、完善地描述主动环型锁模光纤激光器中孤子锁模脉冲的特性参数,为实现激光器基态孤子锁模提供了理论指导和优化设计原则。

参 考 文 献

- [1] Takara H, Kawanishi S *et al.*. Generation of highly stable 20 GHz transform limited optical pulses from actively mode locked Er doped fiber lasers with an all polarization maintaining ring cavity. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(22): 2095 ~ 2096
- [2] Smith K, Greer E J, Wytt R. Totally integrated erbium fiber soliton laser pumped by laser diode. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(3): 244 ~ 246
- [3] Haus H A, Fujimoto J G, Ippen E P. Structures for additive pulse mode locking. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1991, **8**(10): 2068 ~ 2076
- [4] Haus H A, Mecozzi A. Long-term storage of a bit stream of solitons. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(21): 1550 ~ 1552
- [5] Fontana F, Bordogna G, Franco P *et al.*. Condition for soliton generation in harmonically mode-locked erbium-doped fiber lasers. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(18): 1652 ~ 1654
- [6] Agrawal G P 著, 胡国锋, 黄超译, 李世忱校. 非线性光纤光学. 天津: 天津大学出版社, 1992

Soliton Theory of Actively Mode-Locked Fiber Ring Laser

Zhang Jinye Song Lijun Li Shichen

(College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)
(Opto-Electronics Informan Science and Technology Lab, MOE, Tianjin 300072)

(Received 21 July 2000; revised 27 November 2000)

Abstract: Based on the steady state master equation of actively mode-locked fiber ring laser, the relationship between pulse parameters and the cavity parameters including gain, gain dispersion of Er-doped fiber, filtering of band-pass filter, modulation effect of amplitude modulator, GVD and SPM of single mode fiber is investigated theoretically and numerically. The conditions for generating transform-limited soliton pulses is analyzed.

Key words: fiber ring laser; actively mode-locking; optical soliton