

# 有源耦合腔激光器锁模特性研究

孙军强 黄德修

(华中理工大学光电子工程系, 武汉 430074)

李再光

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

## 提 要

本文在理论上首次发现有源耦合腔激光器的自启动锁模和时域调制特性, 并对其进行了全面的分析和计算. 对有源耦合腔激光器的自启动锁模机制和时域调制特性给予详尽的数值计算结果和清晰的物理图象解释, 提出在有源耦合腔锁模激光器中可用连续泵浦源代替锁模泵浦源, 而且有产生更短的光脉冲可能性.

**关键词** 有源耦合腔激光器, 自启动锁模, 时域调制特性.

## 1 引 言

随着锁模技术的发展, 相干叠加脉冲锁模激光器的研究受到了普遍重视, 先后在色心激光器<sup>[1]</sup>、Ti: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器<sup>[2]</sup>、Nd: YAG 激光器<sup>[3]</sup>、Nd: YLF 激光器<sup>[4]</sup>、钕玻璃激光器<sup>[5]</sup>实现了相干叠加脉冲锁模的锁模运转, 并获得 ps 甚至 fs 的锁模脉冲宽度. 这种激光器是由一个包含增益介质的主腔和一个包含无源非线性介质(如光纤)的外腔组成. 外腔中非线性相位调制的脉冲与主腔中的脉冲在耦合镜处产生相干叠加而达到锁模目的. 非线性介质中的自相位调制效应引起光脉冲中心跟两翼的相位产生差异, 而这相位差在耦合镜处转变为对脉冲幅值的调制, 合理控制主腔与外腔的腔长, 幅值的调制助长脉冲峰值的增长, 从而使激光器实现锁模运转.

行波半导体激光放大器的增益带宽高达 5 THz<sup>[6]</sup>, 如此宽的增益带极有可能来对亚皮秒脉冲的放大, 对能量高的光脉冲, 易引起行波半导体激光放大器的增益饱和和非线性, 同时, 它也有着自相位调制效应, 所以, 它也有可能对光脉冲进行压缩. Grant 等人<sup>[7]</sup>在外腔中放置半导体激光放大器, 对 KCl: Ti<sup>3+</sup>(1) 色心激光器实现了锁模运转, 获得了具有 Sech<sup>2</sup> 形的光脉冲. 但对有源耦合腔激光器的理论分析至今未见国内外有过报道. 本文正是在这方面作了理论分析和计算, 发现有源耦合腔激光器易实现自启动锁模和具有时域调制特性, 并且提出由此效应获得更短光脉冲以及脉冲序列的可能性.

## 2 有源耦合腔激光器的锁模原理

耦合腔激光器包含主腔与外腔两部分, 如图 1 所示, 外腔中有行波半导体激光放大器, 主腔与外腔是通过平面镜 M<sub>0</sub> 来耦合. 假设初始的激光脉冲由噪声或跳模引起, 且主腔中的电场

形式为  $A(\tau) \exp(i\omega\tau)$ , 外腔中的电场形式为  $B(\tau) \exp(i\omega\tau)$ ,  $\tau$  是运动坐标系中的时间参量, 脉冲在腔内经过第  $n$  次和第  $n+1$  次渡越后, 场的关系有

$$\begin{bmatrix} A_{n+1}(\tau) \\ B_{n+1}(\tau) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Rg & iTg \\ iTlG \exp[i(\Phi + \Delta\Phi)] & RlG \exp[i(\Phi + \Delta\Phi)] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_n(\tau) \\ B_n(\tau) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$A_n(\tau)$ 、 $B_n(\tau)$  为图 1 所示传播方向的场;  $R$ 、 $T$  分别为耦合镜  $M_0$  对场振幅的反射率和透过率;  $l$  为光脉冲在外腔中的传输效率;  $G$  为行波半导体激光放大器振幅的增益系数;  $\Phi$  为由于主腔跟外腔的腔长失配而带来的相位差异;  $\Delta\Phi$  为光脉冲经行波半导体激光放大器后所引起的自相位调制量;  $g$  为激光介质能量增益系数的平方根.

(1)式对应的本征值方程为

$$\begin{bmatrix} C_{n+1}(\tau) \\ D_{n+1}(\tau) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_+ & \\ & \lambda_- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_n(\tau) \\ D_n(\tau) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$C_{n+1}(\tau)$ 、 $D_{n+1}(\tau)$  为对应于征值  $\lambda_+$ 、 $\lambda_-$  的本征函数, 是腔的本征模, 所以,  $A_n(\tau)$ 、 $B_n(\tau)$  是  $C_n(\tau)$ 、 $D_n(\tau)$  的线性组合, 求解本征值方程有:

$$\lambda_{\pm} = \frac{R(g + Le^{i\varphi}) \pm [R^2(g + Le^{i\varphi})^2 - 4gLe^{i\varphi}]^{1/2}}{2} \quad (3)$$

$L = lG$ ,  $\varphi = \Phi + \Delta\Phi$ . 假设初始的脉冲为  $C_0(\tau)$ 、 $D_0(\tau)$ , 则经过  $n$  次往返后有:

$$C_n(\tau) = \lambda_+^n C_0(\tau), \quad D_n(\tau) = \lambda_-^n D_0(\tau) \quad (4)$$

利用(3)式, 经过计算  $|\lambda_+|$ 、 $|\lambda_-|$  与相位角  $\varphi$  的关系如图 2(a)~2(c)所示. 图 2(a)是对应于在外腔中放置无源非线性介质(如光纤)的情况<sup>[2]</sup>,  $|\lambda_+|$ 、 $|\lambda_-|$  相差无异, 无突变现象. 图 2(b)、2(c)是对应于在外腔中放置有源介质的情况. 随着  $L$  的增加,  $\varphi$  从  $-\pi/2 \sim \pi/2$  的变化范围内,  $|\lambda_+|$  远大于 1,  $|\lambda_-|$  远小于 1. 因此, 随着光脉冲在主腔与外腔内的往返次数的增加, 一个本征模逐渐地衰减, 直至猝灭, 而另一个本征模将不断地获得加强, 由于光脉冲强度的增加势必引起激光增益介质的饱和, 又使  $|\lambda_+|$  逐渐下降直至 1, 此时, 激光器实现稳定锁模. 令人感兴趣的是,  $\varphi = -\pi/2$  附近,  $L$  的增加, 引起  $|\lambda_+|$ 、 $|\lambda_-|$  数值发生突变,  $|\lambda_+|$ 、 $|\lambda_-|$  的差异更大, 因此, 有源耦合腔激光器比无源耦合腔激光器的锁模更易实现.

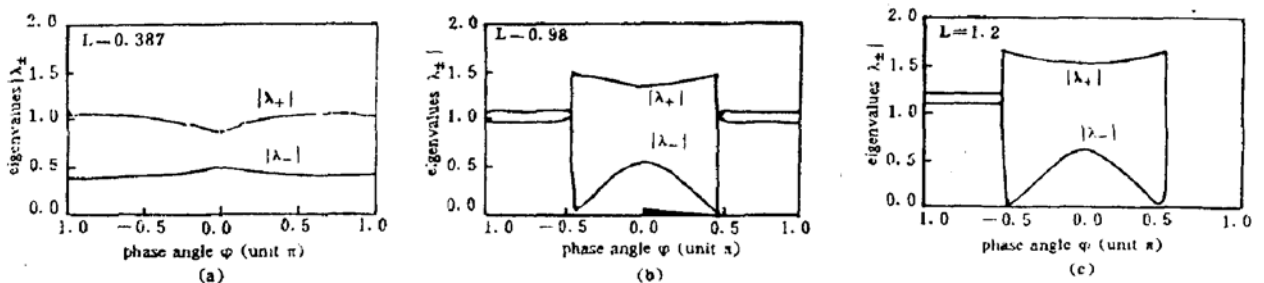


Fig. 2 Eigenvalues  $|\lambda_+|$  and  $|\lambda_-|$  as a function of the phase angle  $\varphi$ . The parameters are  $g = 1.1$ ,  $R = 0.92$  and (a)  $L = 0.387$ ; (b)  $L = 0.98$ ; (c)  $L = 1.2$

在连续泵浦的条件下, 由于各种涨落的存在, 激光器开始振荡时, 必然存在着噪声, 在工作过程中, 不可避免地有跳模现象存在, 上述结果表明, 当跳模和噪声满足本征值条件, 而且相位

控制合适时(如  $\varphi = -\pi/2$ ), 脉冲将不断地获得加强, 所以在连续泵浦条件下也能实现激光器的锁模运转, 称之为自启动锁模. 连续的泵浦源代替了锁模的泵浦源, 在减小系统的尺寸, 降低系统的复杂程度和价格方面有着重要的意义.

然而, 在外腔中引入半导体激光放大器后, 因放大器瞬时增益和自相位调制, (3) 式中  $L, \varphi$  将是  $\tau$  的函数. 设对应于  $\lambda_-$  的本征模已猝灭, 仅考虑本征值  $\lambda_+$ , 则光脉冲将进一步被调制.

### 3 锁模光脉冲的压缩

由于行波半导体激光放大器的自相位调制及增益饱和非线性, 在耦合腔激光器中会引起锁模的时域调制特性. 设外腔中传播的光脉冲包络为:

$$A(Z, \tau) = [P(Z, \tau)]^{1/2} \exp[i\Phi(Z, \tau)], \quad (5)$$

由放大器中载流子密度方程和波动方程有<sup>[8]</sup>:

$$(\partial P / \partial z) = (g' - \alpha_{int})P, \quad (\partial \Phi / \partial z) = - (1/2) \alpha g', \quad (\partial g' / \partial \tau) = [(g'_0 - g') / \tau_0] - (g' P / E_{sat}), \quad (6)$$

$P$  为光脉冲的功率;  $\alpha_{int}, g', \alpha, g'_0, E_{sat}$  分别为行波半导体激光放大器的内部损耗、增益、线宽增强因子、小信号增益和饱和能量.  $\Phi$  为光脉冲的位相;  $\tau_0$  为载流子的自发辐射寿命. 假设  $g' \gg \alpha_{int}$ , 对(6)式积分, 得瞬时增益及位相差

$$G(\tau) = \exp[h(\tau)], \quad \Delta\Phi(\tau) = - (1/2) \alpha h(\tau), \quad h(\tau) = \int_0^L g'(z, \tau) dz, \quad (7)$$

并有关系

$$\frac{dh}{d\tau} = \frac{g'_0 L - h}{\tau_c} - \frac{P_{in}(\tau)}{E_{sat}} [\exp(h) - 1]. \quad (8)$$

对皮秒级的光脉冲, 则  $(\tau_p / \tau_c) \ll 1$ , 有

$$\left. \begin{aligned} h(\tau) &= - \ln \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1}{G_0} \right) \exp \left( - \int_{-\infty}^{\infty} P_{in}(\tau') d\tau' / E_{sat} \right) \right], \\ G_0 &= \exp(g'_0 L), \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$G_0$  为线性放大器的单程增益,  $L$  为放大器有源区长度, 由(3)、(7)、(9)式可计算放大器的瞬时增益、附加相位、及反映时域调制特性的  $|\lambda_+(\tau)|$ .

计算时设在腔中传播的光脉冲是高斯脉冲,  $P_{in}(\tau) = (E_{in} / \tau_0 \sqrt{\pi}) \exp(-\tau^2 / \tau_0^2) \cdot \tau_p = 1.665 \tau_0$ ,  $\tau_p$  是注入脉冲宽度. 参数选择如下:  $g = 1.19, l = 0.3, R = 0.92, G_0 = 30 \text{ dB}, \alpha = 5$ . 瞬时增益、附加相位如图 3、图 4 所示. 图 3 表明随着注入能量的增加, 光放大器的增益饱和程度, 注入能量低, 增益饱和弱, 注入能量高, 增益饱和就强. 图 4 表明光脉冲经放大器后, 附加相位的状况, 由于相位是  $\pi$  的数倍, 因而对光脉冲产生周期性的时域调制.

对  $G_0$  为 30 dB 的行波半导体激光放大器, 当  $E_{in} / E_{sat} = 0.002$  时, 便开始饱和<sup>[8]</sup>, 计算中为了体现放大器增益饱和的非线性, 选择  $E_{in} / E_{sat}$  高于 0.002. 反映锁定脉冲的时域调制的  $|\lambda_+|$  如图 5 所示. 锁模脉冲的时域调制效应同光脉冲的注入能量, 主腔与外腔腔长匹配密切相关的. 当  $\Phi = -\pi/2, E_{in} / E_{sat} = 0.01$  时,  $|\lambda_+|$  仅有一个峰值, 脉冲的时域调制效应将使脉冲不断压缩, 最后达到衍射极限. 随着  $E_{in} / E_{sat}, \Phi$  的变化,  $|\lambda_+|$  也在不断地变化着, 类似之处是  $|\lambda_+|$  的最大数值趋于  $\tau / \tau_0$  数值较小的一边, 这是由半导体激光放大器的增益特性所决定的. 当脉冲前沿进入放大器后, 放大器的增益很快达到饱和, 若脉宽  $\tau_p$  小于增益饱和的弛豫时间, 整个光脉冲经过后, 增益来不及恢复, 因此, 反映在  $|\lambda_+|$  上, 对应于脉冲前沿的数值大, 而后沿的数值小.

当注入的  $E_{in}$  数值较大时, 光脉冲受此非线性的作用很强烈, 附加相位  $\Delta\Phi$  将是  $\pi$  的数倍, 因此在  $|\lambda_+|$  上有几个周期出现, 光脉冲经此时域调制后, 在光脉冲压缩的同时, 单个光脉冲将演变为一列高重复率的超短光脉冲输出.

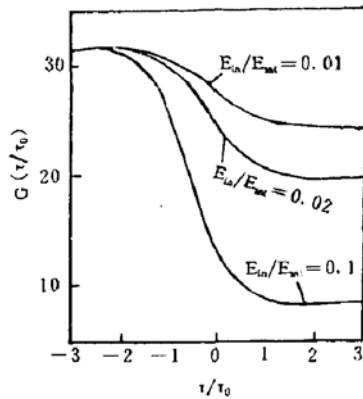


Fig. 3 The instantaneous amplifier gain  $G(\tau/\tau_0)$  as a function of  $\tau/\tau_0$  with different values of  $E_{in}/E_{sat}$

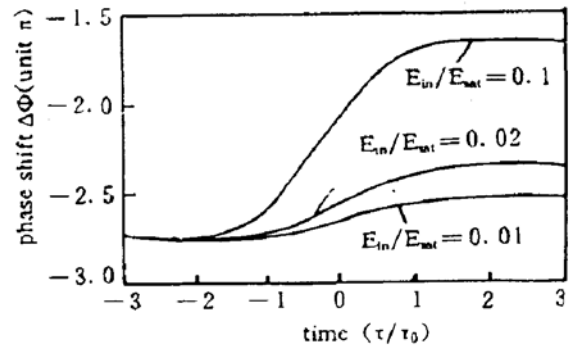


Fig. 4 The phase difference of pulses propagating through TW-SLA as a function of  $\tau/\tau_0$  with different values of  $E_{in}/E_{sat}$

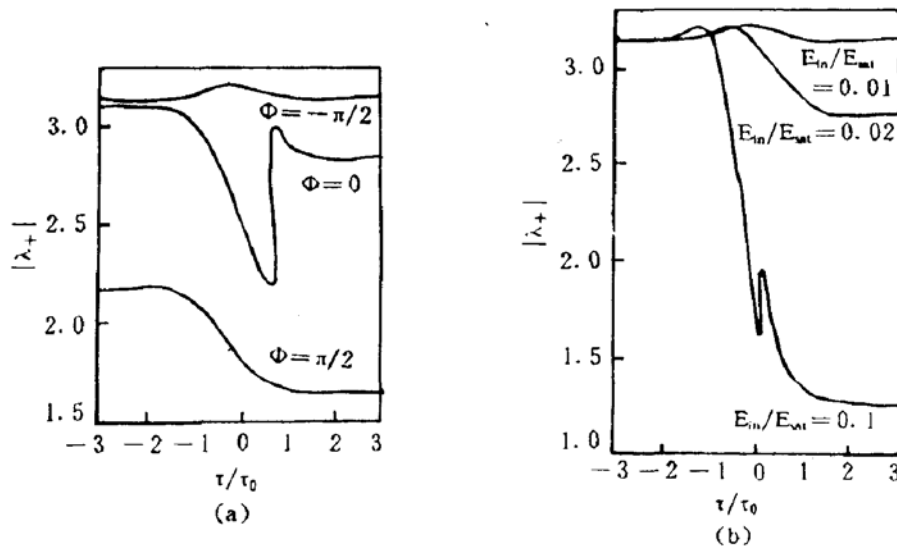


Fig. 5 Time-dependent modulation values of modelocking pulses as a function of  $\tau/\tau_0$  with (a)  $E_{in}/E_{sat} = 0.01$  and different values of phase angle  $\Phi$ ; (b)  $\Phi = -\pi/2$  and different values of  $E_{in}/E_{sat}$

#### 4 结论

在有源的耦合腔锁模激光器中, 由于外腔中行波半导体激光放大器的自相位调制和增益饱和非线性, 当主腔中的光脉冲和外腔中的光脉冲在耦合镜上相遇时, 相位调制转变为幅值调制, 使得光脉冲的不同部位产生不同程度的调制. 如果适当地控制主腔与外腔的光程差 (即线性相位移的偏置量  $\Phi$ ), 选择  $E_{in}/E_{sat} = 0.01$  时, 接近于峰值的调制值  $|\lambda_+|$  远大于边缘的数值, 此时脉宽获得有效的压缩, 这一情况对应于相位移的偏置量在  $-\pi/2$  附近. 如果  $E_{in}/E_{sat}$  数值较大, 则增益饱和的非线性将很明显, 并且光脉冲受此非线性的作用很强, 自相位的调制量

将是  $\pi$  的数倍,因此,出现周期性的时域调制,使原来的高斯脉冲包络中出现一系列窄脉冲序列,参数控制合适时,会出现高调制现象.利用这种有源耦合腔锁模激光器,在自启动锁模的基础上,具有获得超短激光脉冲的可能性,这种可能性已被 Grant 等人<sup>[7]</sup>的实验所证实.

### 参 考 文 献.

- [1] J. Mark, L. Y. Liu, K. L. Hall *et al.*, Femtosecond Pulse Generation in a Laser with a Nonlinear External Resonator. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(1):48~50
- [2] J. Goodberlet, J. Wang, J. G. Fujimoto *et al.*, Femtosecond Passively Mode-Locked Ti: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Laser with a Nonlinear External Cavity. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(20):1125~1127
- [3] J. Goodberlet, J. Jacobson, J. G. Fujimoto *et al.*, Self-Starting Additive-Pulse Mode-Locked Diode-Pumped Nd:YAG Laser. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(9):504~506
- [4] J. M. Liu, J. K. Chee, Passive Mode Locking of a CW Nd:YLF Laser with a Nonlinear External Coupled Cavity. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(12):685~687
- [5] F. Krausz, Ch. Spielmann, T. Brabec *et al.*, Self-Starting Additive-Pulse Mode Locking of a Nd:Glass Laser. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(19):1082~1084
- [6] Tadashi Saitoh, Takaaki Mukai, 1.5 $\mu$ m GaInAsP Traveling-Wave Semiconductor Laser Amplifier. *IEEE J. Q. E.*, 1987, **QE-23**(6):1010~1020
- [7] R. S. Grant, P. N. Kean, D. Burns *et al.*, Passive Coupled-Cavity Mode Locked Color-Center Lasers. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(6):384~386
- [8] Govind P. Agrawal, N. Anders Olsson, Self-Phase Modulation and Spectral Broadening of Optical Pulses in Semiconductor Laser Amplifiers. *IEEE J. Q. E.*, 1989, **25**(11):2297~2306

## Mode—locking characteristics of a coupled—cavity laser with a gain medium in an external cavity

SUN Junqiang      HUANG Dexiu

(Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science  
and Technology, Wuhan 430074)

LI Zaiguang

(National Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science  
and Technology, Wuhan 430074)

(Received 17 march 1992)

### Abstract

The self-starting mode-locking and the time-dependent modulation characteristics of a coupled-cavity laser (CCL) with a gain medium in an external cavity is discovered theoretically for the first time, and analysed and calculated in detail. Its mechanism is explained in this paper. We suppose that there will be a possibility to use a CW pump source in stead of a mode-locked pump source and to get shorter pulse in mode-locking CCL.

**Key word** coupled-cavity laser with a gain medium in an external cavity, self-starting modelocking, characteristics of time-dependent modulation.