

# TW-SLA 在耦合腔锁模激光器中的调制特性

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 激光技术国家实验室 武汉 430074)

**摘要** 本文将行波半导体激光放大器(TW-SLA)引入耦合腔锁模激光器中,详细分析了外腔的有效反射系数.结果表明:TW-SLA的增益饱和及自相位调制对光脉冲具有调制特性,利用这类耦合腔激光器可实现自启动锁模以及具有获得超短光脉冲的可能性.

**PACC:** 4255N, 4280K

## 1 引言

随着锁模技术的发展,耦合腔锁模技术的研究受到了普遍的重视.近几年来,应用耦合腔锁模的最大成果是光孤子激光器的实现<sup>[1]</sup>.耦合腔锁模激光器是由一个包含增益介质的主腔与一个有非线性介质的外腔耦合而形成.外腔中的非线性介质形成光脉冲的自相位调制,该脉冲与主腔中光脉冲在耦合镜处相干叠加后,光脉冲峰值获得增长,从而使光脉压缩.合理地选择主腔与外腔的参数,可使激光器实现稳定的锁模运转.在外腔中的非线性介质(如光纤等)实际上相当于一个调相调制器.激光器的锁模特性便由其所决定.但是,外腔中的无源非线性介质势必要造成光脉冲能量的衰减.

能量较大的光脉冲易引起行波半导体激光放大器(TW-SLA)的增益饱和,且光脉冲经TW-SLA后,也会造成光脉冲的自相位调制,因此,它既可作为调制器而应用于锁模激光器中,还能补偿光脉冲在外腔中传播时的能量损耗. R. S. Grant 等人<sup>[2]</sup>在外腔中放置 TW-SLA,实现了 KCl:Ti<sup>3+</sup>(1)色心激光器的锁模运转,获得了具有  $\text{sech}^2$  形状的光脉冲.本文对 TW-SLA 在锁模激光中的调制特性作了理论分析,为这类激光器的设计提供了理论依据.

## 2 基本原理

带有行波半导体激光放大器的有源耦合腔激光器如图 1 所示.设从主腔入射至耦合镜

孙军强 男,1965年生,博士,从事光纤通信系统中有源器件的研究

黄德修 男,1937年生,教授,主要从事光纤通信系统中有源及无源器件的研究

1993年5月28日收到初稿,1993年7月27日收到修改稿

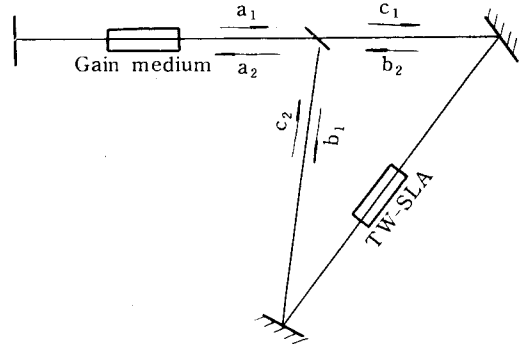


图1 带有行波半导体激光放大器的有源耦合腔锁模激光器示意图

上的光脉冲为  $a_1$ , 经耦合镜分束变为  $b_1, c_1$ , 且有如下关系:

$$c_1 = (1 - r^2)^{1/2} a_1 \quad (1)$$

$$b_1 = r c_1 \quad (2)$$

$r$  为耦合镜对振幅的反射率. 设经 TW-SAL 后, 光脉冲变为  $b_2, c_2$  及经反馈到主腔的光脉冲为  $a_2$ , 且有:

$$a_2 = (1 - r^2)^{1/2} b_2 + r c_2 \quad (3)$$

其中

$$b_2 = G_b^{1/2} \exp[i(\Delta\Phi_b + \varphi)] b_1 \quad (4)$$

$$c_2 = G_c^{1/2} \exp(i\Delta\Phi_c) c_1 \quad (5)$$

$G_b$  和  $G_c$  为外腔中 TW-SLA 对正向和反向光脉冲的增益;  $\Delta\Phi_b, \Delta\Phi_c$  为光脉冲经历 TW-SLA 后而引起的自相位调制;  $\varphi$  为相向光脉冲之间的线性相位偏差. 因此, 可得外腔的有效反射系数  $R$  为:

$$R = |a_2|/|a_1| = r(1 - r^2)^{1/2} |G_b \exp[i(\Delta\Phi_b + \varphi)] + G_c \exp(i\Delta\Phi_c)| \quad (6)$$

$G_b, G_c, \Delta\Phi_b, \Delta\Phi_c$  同光脉冲的瞬态功率有关, 因而是时间  $\tau$  的函数. 有效反射系数不但同自相位调制有关, 而且同 TW-SLA 的瞬态增益有关. 因而, TW-SLA 在锁模激光器所具有的调制特性是增益和自相位调制共同作用的结果.

设外腔中传播的光脉冲包络为:

$$A(z, \tau) = [P(z, \tau)]^{1/2} \exp[i\Phi(z, \tau)] \quad (7)$$

由半导体放大器中载流子密度的速率方程和波动方程有<sup>[3]</sup>:

$$\partial P / \partial z = (g - \alpha_{\text{int}}) P \quad (8)$$

$$\partial \Phi / \partial z = - (1/2) \alpha g \quad (9)$$

$$\partial g / \partial \tau = (g_0 - g) / \tau_c - g P / E_{\text{sat}} \quad (10)$$

$P$  为光脉冲的峰值功率;  $g, \alpha, g_0, \alpha_{\text{int}}, E_{\text{sat}}$  分别为 TW-SLA 的增益、线宽增强因子、小信号增益、内部损耗及饱和能量.  $\Phi$  为光脉中的位相,  $\tau_c$  为载流子的自发辐射寿命. 若  $g \gg \alpha_{\text{int}}$ , 对 (8) — (10) 式积分, 得瞬态增益及自相位调制为:

$$G(\tau) = \exp[h(\tau)] \quad (11)$$

$$\Delta\Phi(\tau) = - (1/2) \alpha h(\tau) \quad (12)$$

$$h(\tau) = \int_0^L g(z, \tau) dz \quad (13)$$

及

$$dh/d\tau = (g_0 L - h)/\tau_c - P_{in}(\tau)[\exp(h) - 1]/E_{sat} \quad (14)$$

对较短的光脉冲, 满足  $\tau_p/\tau_c \ll 1$ ,  $\tau_p$  为脉宽, 有:

$$h(\tau) = -\ln[1 - (1 - 1/G_0)\exp(-\int_{-\infty}^{\tau} P_{in}(\tau') dc'/E_{sat})] \quad (15)$$

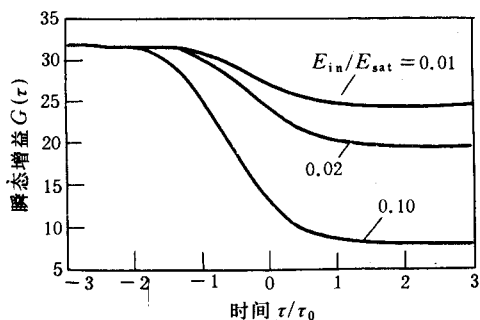
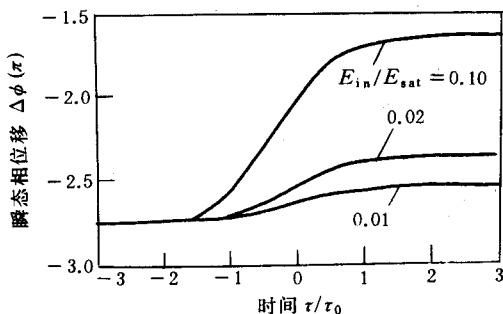
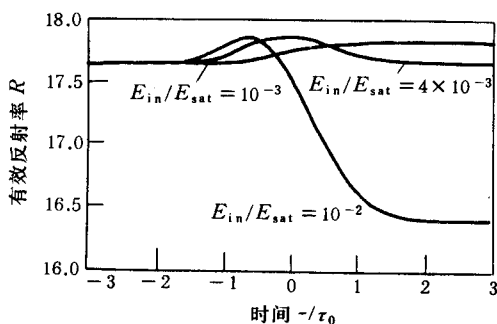
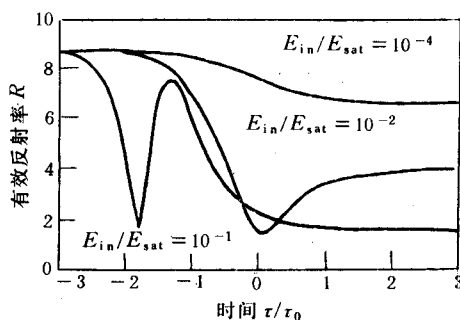
$$G_0 = \exp(g_0 L) \quad (16)$$

$G_0$  为线性放大器单程增益;  $L$  为放大器有源区长度. 联立上述各式, 可求放大器的瞬态增益、自相位调制量以及外腔的有效反射率.

### 3 数值计算及讨论

在本文的计算中, 设  $a_1$  为无初相位的高斯光脉冲包络, 放大器的增益为 30dB. 线宽增强因子取  $\alpha=5$ . 放大器的瞬态增益及光脉冲经放大器后的相位变化如图 2、图 3 所示. 图 2 表明随着注入能量的增加 TW-SLA 的增益的饱和程度. 光脉冲前沿使放大器增益的饱和, 光脉冲后沿经历了较小的增益. 图 3 表明光脉冲经 TW-SLA 后相位的变化. 由于不同的部位引起不同的自相位调制, 因而相向而行的光脉冲在耦合镜处相干叠加后, 相位调制转变为对光脉冲的幅值调制. 如图 4 所示, 取耦合镜的反射率为 0.8,  $\varphi = -\pi/2$ , 在  $E_{in}/E_{sat} = 4 \times 10^{-3}$ 、 $10^{-2}$ 、 $10^{-3}$  时, 在不同的光脉冲部位, 外腔的有效反射率.  $E_{in}$  为  $a_1$  光脉冲能量. 当  $E_{in}/E_{sat} = 10^{-3}$  时, 光脉冲产生的自相位调制较弱, 并且光脉冲的能量不足以使 TW-SLA 饱和, 因此, 光脉冲前沿增益小, 而后沿增益高, 光脉冲经此外腔反射后, 峰值后移. 而当  $E_{in}/E_{sat} = 4 \times 10^{-3}$  时, 有效反射率在接近脉冲中心处有一个峰值, 光脉冲经此外腔反射后, 将使光脉冲向中心压缩. 经过多次往返后, 达到增益带宽所限制的极限. 同时表明若激光器开始启动时有噪声存在, 或激光器在连续工作状态时有跳模现象存在, 当产生噪声或跳模形成的光脉冲满足这一条件时, 光脉冲就会不断地获得增强, 至到激光器稳定锁模. 因而, 连续工作的激光器也能过渡到锁模工作状态, 这便是所谓的自启动锁模. 由  $E_{in}/E_{sat}$  的大小表明, 自启动锁模的实现, 光脉冲的能量存在着一个阈值. 当  $E_{in}/E_{sat}$  的数值增加至  $10^{-2}$  时, 有效反射率  $R$  的峰值趋向  $\tau/\tau_c$ . 小的一边, 这是由 TW-SLA 的增益饱和和特性所决定的. 光脉冲前沿进入放大器后, 放大器很快达到饱和状态, 若脉宽  $\tau_p$  小于增益饱和和弛豫时间, 整个光脉冲经过后, 放大器的增益来不及恢复, 反映在有效反射率上, 对应于光脉冲前沿数值大, 而光脉冲后沿数值小.

如图 5 所示, 当  $r=0.2$ ,  $\varphi = -\pi/2$  时, 在不同的  $E_{in}/E_{sat}$  下, 有效反射率的变化情况.  $E_{in}/E_{sat} = 10^{-4}$  时, 反射  $R$  呈现同增益饱和相同趋势, 此时, 由 TW-SLA 引起的光脉冲自相位调制量较小, 相向而行的光脉冲间无相干增强出现. 逐渐地增加  $E_{in}/E_{sat}$  至 0.1 时, 自相位调制量也逐渐增加, 因而, 两光脉冲相干叠加后, 有多个峰值出现, 反映在有效反射率上有多个峰值出现, 光脉冲经此外腔反射后, 光脉冲在被压缩的同时, 单个光脉冲演变为一列超短脉冲. 上述的讨论表明, TW-SLA 完全可充当被动锁模激光器中的调制器.

图2 瞬态增益与  $E_{in}/E_{sat}$  的关系图3 经过 TW-SLA 后,光脉冲瞬态相位移  $\Delta\phi$  同  $E_{in}/E_{sat}$  的关系图4  $r=0.8, \varphi=-\pi/2$  时,有效反射率同  $E_{in}/E_{sat}$  的关系图5  $r=0.2, \varphi=-\pi/2$  时,有效反射率同  $E_{in}/E_{sat}$  的关系

## 4 结语

由于 TW-SLA 的自相位调制及增益饱和特性,在 TW-SLA 的外腔中相向而行的光脉冲产生自相位调制,两脉冲在耦合镜处相干叠加,结果相位调制转化为幅度调制,在有效反射率上,其大小同光脉冲的瞬态功率有关,且具有时域调制特性.当两光脉冲的线性偏置为  $-\pi/2$ ,且  $r=0.8, E_{in}/E_{sat}=4 \times 10^{-3}$  时,有效反射率在脉冲中心的数值大于边缘数值,此时,光脉冲获得压缩.增加  $E_{in}/E_{sat}$  的数值,使放大器强烈饱和,外腔的有效反射率的峰值将右移.当  $r=0.2$  时,有效反射率受自相位调制影响较大,出现多峰值.这样,光脉冲经此外腔调制后,出现窄脉冲序列.本文所述的 TW-SLA 可作锁模激光器的调制器已被 R. S. Grant 等人<sup>[2]</sup>的实验所证实.

## 参 考 文 献

- [1] L. F. Mollenauer, R. Stolen and J. P. Gordon, Phys. Rev. Lett., 1980, **45**:1095.
- [2] R. S. Grant, P. N. Kean, D. Burns *et al.*, Opt. Lett., 1991, **16**:384.
- [3] G. P. Agrawal and N. Anders Olsson, IEEE J. Quantum Electron., 1989, **25**:2297.

## Modulation characteristics of TW-SLA in coupled-cavity Modelocking Laser

Sun Junquang, Huang Dexiu and Li Zaiguang\*

*(Department of Optoelectronic Engineering, \* National Laboratory of Laser Technology,  
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)*

Received 28 May 1993, revised manuscript received 27 July 1993

**Abstract** A travelling-Wave semiconductor laser amplifier(TW-SLA) is introduced in a coupled-cavity modelocking laser and the effective reflection coefficient of the external cavity is analyzed in detail. The results show that the TW-SLA can modulate the optical pulse due to its gain saturation and self-phase modulation (SPM). The self-starting modelocking can be achieved by such lasers and there would be the possibility to get shorter pulses.

**PACC:** 4255N, 4280K