

半导体光放大器相位补偿特性的研究*

金 韬 黄德修

(华中理工大学光电子工程系 武汉 430074)

丘军林

(华中理工大学激光研究所 武汉 430074)

摘要 本文详细分析了饱和工作状态下的行波半导体光放大器(TW-SOA)的啁啾特性,从理论上证实了利用其增益饱和所引起的自相位调制来对光源啁啾进行相位补偿的可行性,并且发现,对于不同脉宽的入射脉冲,光放大器均能发挥相位补偿的作用,这一特性可用来补偿光源啁啾.

PACC: 4255P, 4260F, 4260H

1 引言

超短光脉冲在许多领域有重要应用. 然而,在一般情况下,光源输出的光脉冲不可避免地附加有频率啁啾,无疑,这将不同程度地给实际应用带来不良影响. 例如,在光纤通信系统中,光源的啁啾将限制传输距离和数据容量. 因此,必须设法消除光源的频率啁啾.

本文详细研究了利用饱和工作状态下的行波半导体光放大器的相位补偿特性来消除光源啁啾的机理,分析了实现相位补偿的各种条件,为进一步的实验研究提供理论依据.

2 增益饱和和工作状态下的光放大器的啁啾特性

行波半导体光放大器可看成是一两能级系统,如果入射光脉冲的脉宽 T_0 远大于放大器的带内弛豫时间 τ_m (一般 $\tau_m \leq 0.1$ ps, 只要 $T_0 \geq 1$ ps 就可满足要求),那么速率方程可简化为^[1]

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \nabla^2 N + \frac{I}{qV} - \frac{N}{\tau_c} - \frac{\alpha(N - N_0)}{\hbar \omega_0} |E|^2 \quad (1)$$

式中 N 是载流子浓度; D 是扩散系数; I 是注入电流; q 是电子电荷; V 是放大器有源区体积;

* 国家教委博士点基金项目

金 韬 男, 1968 年生, 博士, 主要从事行波半导体光放大器非线性特性以及外腔锁模半导体激光器的研究
1994 年 7 月 31 日收到初稿, 1994 年 12 月 12 日收到修改稿

τ_c 是自发射载流子寿命; $\hbar\omega_0$ 是光子能量; α 是增益系数; N_0 是透明时载流子浓度; E 是光放大器内的电场.

考虑理想的行波半导体放大器, 假定其有源区尺寸只保证放大器单模工作, 入射光是线偏振的, 并在传输过程中保持线偏振, 这样它在放大器中的电场可描述为^[2]

$$E(x, y, z, t) = \hat{x} \frac{1}{2} \{ F(x, y) A(z, t) \exp[i(\kappa_0 z - \omega_0 t)] + c \} \quad (2)$$

式中 \hat{x} 是偏振单位矢量; $F(x, y)$ 是波导模式分布; 传播常数 $\kappa_0 = \bar{n}\omega_0/c$; $A(z, t)$ 是与光脉冲相关联的一个慢变包络函数.

一般, 半导体光放大器有源区的宽度和厚度都很小, 而其长度则远大于扩散长度. 另外, 由于载流子在有源区横截面上几乎是均匀分布的, 可用其平均值来作很好的近似. 这样, (1) 式可简化为^[2]

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{I}{qV} - \frac{N}{\tau_c} - \frac{g(N)}{\hbar\omega_0} |A|^2 \quad (3)$$

这里增益 $g(N)$ 定义为

$$g(N) = \Gamma\alpha(N - N_0) \quad (4)$$

式中 Γ 是限制因子.

为简化计算, 将 A 分解为幅度和相位之积

$$A = \sqrt{p} \cdot \exp(i\varphi) \quad (5)$$

式中 p 和 φ 分别表示功率和相位. 另外作以下代换

$$\tau = t - z/v_g \quad (6)$$

其中 v_g 是群速度. 这样由 (3) — (6) 忽略 $A(z, t)$ 关于 z 和 t 的二阶导数, 并结合波动方程

$$\nabla^2 E - \frac{\epsilon}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (7)$$

可得到放大器输出脉冲的相位 Φ_{out} . (7) 式中 c 是光速, ϵ 是介电常数.

$$\Phi_{out}(\tau) = \Phi_{in}(\tau) - \frac{1}{2} \alpha_{AMP} h(\tau) \quad (8)$$

式中 Φ_{in} 是入射光的初始相位; α_{AMP} 是光放大器的线宽增强因子. $h(\tau)$ 定义为

$$h(\tau) = \int_0^L g(z, t) dz \quad (9)$$

并且满足以下的常微分方程

$$\frac{dh}{d\tau} = \frac{g_0 L - h}{\tau_c} - \frac{P_{in}(\tau)}{E_{sat}} [\exp(h) - 1] \quad (10)$$

式中 L 是光放大器的长度; g_0 是放大器的小信号增益; p_{in} 是归一化入射光脉冲的功率. $h(\tau)$ 的物理意义是光脉冲上每一点经过放大器后所得到的积分增益.

当放大器发生增益饱和时, 由此引起载流子浓度变化, 使其折射率随光强发生变化, 从而导致自相位调制. 因此, 当光脉冲沿放大器传输时, 就会使自身附带频率啁啾, 频率啁啾 $\Delta\nu_{out}(\tau)$ 可表示为:

$$\Delta\nu_{out}(\tau) = - \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \Phi_{out}}{\partial \tau} \quad (11)$$

将(8)式代入(11)式,得到

$$\Delta v_{\text{out}}(\tau) = \Delta v_{\text{in}}(\tau) + \frac{\alpha_{\text{AMP}}}{4\pi} \frac{dh}{d\tau} \quad (12)$$

由(10)式和(12)式就可描述不同情况下放大器输出脉冲的啁啾特性. 以下分别就入射脉冲的脉宽 T_0 远小于、相当于和远大于载流子寿命 τ_c 三种情况分别进行详细的分析和讨论.

考虑一高斯形脉冲

$$p_{\text{in}}(\tau) = \frac{E_{\text{in}}}{T_0 \sqrt{\pi}} \exp\left[-\frac{\tau^2}{T_0^2}\right] \quad (13)$$

式中 E_{in} 是入射脉冲能量.

当 $T_0 \ll \tau_c$ 时, 由于脉冲足够短, 使得由于放大器饱和而减小的增益在脉冲经过的时间内得不到恢复, 这样, 方程(10)中右边第一项可以忽略, 于是可得到 $h(\tau)$ 的解为

$$h(\tau) = -\ln\left[1 - \left(1 - \frac{1}{G_0}\right) \exp\left(-\frac{u_{\text{in}}}{E_{\text{sat}}}\right)\right] \quad (14)$$

式中 $G_0 = \exp(g_0 L)$, 放大器的非饱和单程增益; E_{sat} 是放大器的饱和能量. u_{in} 定义为

$$u_{\text{in}}(\tau) = \int_{-\infty}^{\tau} p_{\text{in}}(\tau') d\tau' \quad (15)$$

根据定义, 显然 $u_{\text{in}}(+\infty) = E_{\text{in}}$. 将(13)式代入(15)式, 得到

$$u_{\text{in}}(\tau) = \frac{1}{2} E_{\text{in}} [1 + \text{erf}(\tau/T_0)] \quad (16)$$

式中 $\text{erf}(x)$ 是误差函数.

由(12)式和(14)式可导出放大器输出脉冲的频率啁啾

$$\Delta v_{\text{out}}(\tau) = \Delta v_{\text{in}}(\tau) - \frac{\alpha_{\text{AMP}}}{4\pi} \left(1 - \frac{1}{G_0}\right) \frac{p_{\text{out}}(\tau)}{E_{\text{sat}}} \cdot \exp\left[-\frac{u_{\text{in}}(\tau)}{E_{\text{sat}}}\right] \quad (17)$$

式中 $p_{\text{out}}(\tau) = p_{\text{in}}(\tau) \exp[\eta(\tau)]$.

$T_0 \ll \tau_c$ 时的无啁啾高斯脉冲通过放大器后的频率啁啾如图 1(a) 所示, 图中的三条曲线分别为对应三种不同的放大器非饱和单程增益 G_0 . 线宽增强因子对不同的放大器是不同的, 它与增益峰相对于入射光波长的间隔有关, 计算时取 $\alpha_{\text{AMP}} = 5$. 由图可见, 在整个脉冲时间内, $\Delta v_{\text{out}}(\tau)$ 均是负的, 即瞬时频率相对于入射频率是减小的, 并且可以注意到, 在脉冲中心部分 ($|\tau| \leq T_0$), 啁啾几乎是线性增大的, 这一特性使得相位补偿更易得到充分实现. 另外可以看到, 随着放大器 G_0 的增大, 输出脉冲所附带的啁啾量也随之增大, 因此, 可以通过调节放大器的增益来控制光脉冲获得相位补偿的多少.

当入射脉冲的脉宽 T_0 与载流子寿命 τ_c 相当时, 在脉冲通过大量的时间内, 由于放大器饱和而减小的增益就有时间得到部分的恢复, 这将会影响输出脉冲的啁啾特性. 此时, 微分方程(10)不再有解析解, 只能进行数值解, 结果如图 1(b) 所示, 在此取 $T_0 = \tau_c$. 由图可见, 饱和增益的部分恢复使得啁啾曲线变得趋向中心对称. 在脉冲前部, $\Delta v_{\text{out}}(\tau)$ 仍是负的, 但在脉冲后半部分, $\Delta v_{\text{out}}(\tau)$ 变成正的, 这意味着瞬时频率相对于入射频率地增大的, 并且在脉冲中心部分, 啁啾的线性度变差, 使得实现充分的相位补偿变得困难一些.

当入射脉冲的脉宽 $T_0 \ll \tau_c$ 时, 在脉冲通过放大器的时间内, 由于放大器饱和而减小的

增益就有足够的时间得到完全恢复. 在此简单地认为 $T_0 \ll \tau_c$ 对应于放大器准连续工作, 忽略微分方程(10)中 h 对时间的微分, 可得到以下积分增益 h 的隐式关系

$$h(\tau) = g_0 L - \frac{p_{in}(\tau)}{p_{sat}} \{ \exp[h(\tau)] - 1 \} \quad (18)$$

式中 $p_{sat} = E_{sat}/\tau_c$.

将(18)式代入(12)式, 得到此时放大器输出脉冲所附带的频率啁啾为

$$\Delta v_{out}(\tau) = \Delta v_{in}(\tau) + \frac{\alpha_{AMP} \tau}{2\pi T_0^2} \times \frac{\exp[h(\tau)] - 1}{\exp[h(\tau)] + \frac{p_{sat}}{p_{in}(\tau)}} \quad (19)$$

脉宽 $T_0 \ll \tau_c$ 时, 放大器输出脉冲的频率啁啾特性如图 1(c)所示, 这里取 $T_0 = 100\tau_c$. 由图可见, 这时啁啾曲线已完全中心对称, 而脉冲中心部分啁啾的线性度变得更差, 使得放大器的相位补偿能力大为降低.

由以上分析可见, 放大器在饱和工作状态下, 均能使通过它的光脉冲附上相应的频率啁啾, 而这种附带的啁啾有可能部分补偿或完全抵消光源的啁啾. 以下将作具体讨论.

3 放大器相位补偿的实现

将光源输出的脉冲注入到光放大器, 放大器输出脉冲的啁啾就是光源啁啾和放大器啁啾之和, 为分析方便, 分别定义光源啁啾参数 K_{LS} 和放大器啁啾参数 K_{AMP} .

$$K_{LS} = \left. \frac{\partial(\Delta v_{LS})}{\partial \tau} \right|_{\tau=0} \quad (20)$$

$$K_{AMP} = \left. \frac{\partial(\Delta v_{AMP})}{\partial \tau} \right|_{\tau=0} \quad (21)$$

在高速调制的单模半导体激光器中, 啁啾主要是由载流子浓度调制引起. 光源(LS)输出的一个光脉冲中的相位变化由速率方程的小信号分析导出^[3].

$$\frac{d\varphi_{LS}}{dt} = \alpha_{LS} \frac{1}{2S} \frac{dS}{dt} \quad (22)$$

式中 S 是光子密度; α_{LS} 是光源的线宽增强因子.

光源的啁啾参数 K_{LS} 可由(20)式和(22)式导出, 假设光源输出脉冲是高斯形的, 则有

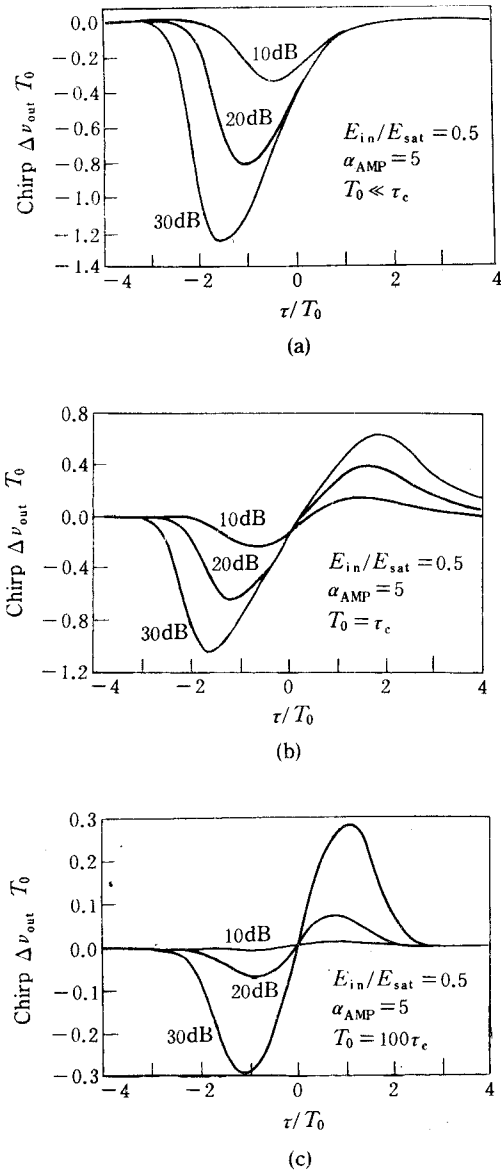


图 1 在放大无啁啾高斯形入射脉冲期间所附带的频率啁啾

$$K_{LS} = -\frac{1}{2\pi} \frac{\alpha_{LS}}{T_0^2} \tag{23}$$

放大器的啁啾参数 K_{AMP} 可由(12)式和(21)式得到((12)式中的 Δv_{out} 即为(21)式中的 Δv_{AMP})

$$K_{AMP} = \frac{\alpha_{AMP}}{4\pi} \frac{d^2 h}{dt^2} \Big|_r = 0 \tag{24}$$

式中 h 是微分方程(10)的解。

于是,放大器输出脉冲的啁啾参数 K 为

$$K = K_{LS} + K_{AMP} \tag{25}$$

在三种不同入射脉宽下,啁啾参数之比 $K_{AMP}/(-K_{LS})$ 与放大器饱和度 E_{in}/E_{sat} 之间的关系如图 2 所示,其中每一分图中的三组曲线分别对应不同的放大器非饱和增益 G_0 。根据定义,当 $K_{LS} + K_{AMP} = 0$ 时,放大器输出接近于无啁啾的脉冲(只考虑脉冲中心部分);当 $K_{LS} + K_{AMP} > 0$ 时,放大器不但补偿了光源的啁啾,还可借助后续的相位延迟线(如光纤),对光脉冲进行压缩。例如,对于 $T_0 = \tau_c$ 的情况,当 $G_0 = 20\text{dB}$, $\alpha_{AMP} = 2\alpha_{LS}$ 时,饱和度在 0.1~5 之间,放大器均能对脉冲进行完全的相位补偿。由图可见,在相同入射脉宽情况下,随着放大器非饱和和增益 G_0 的增大,放大器实现完全相位补偿所要求达到的饱和度和下降,若 G_0 过小,则难以达到完全的相位补偿。并且,选用线宽增强因子之比 α_{AMP}/α_{LS} 较大的器件更为有利。另外,在放大器参数相同的情况,随着入射脉宽的增加,放大器实现完全相位补偿所要达到的饱和度也增大,特别是当脉宽远大于放大器载流子寿命时,这种增大更为明显。

总之,放大器工作在饱和状态,能够对通过它传输的脉冲进行不同程度的相位补偿。入射脉冲的脉宽相对于放大器载流子寿命过长,放大器的非饱和增益过小,不利于相位补偿。脉冲太窄,虽然能够得到较好的啁啾补偿,但输出脉冲可能产生较大的畸变。

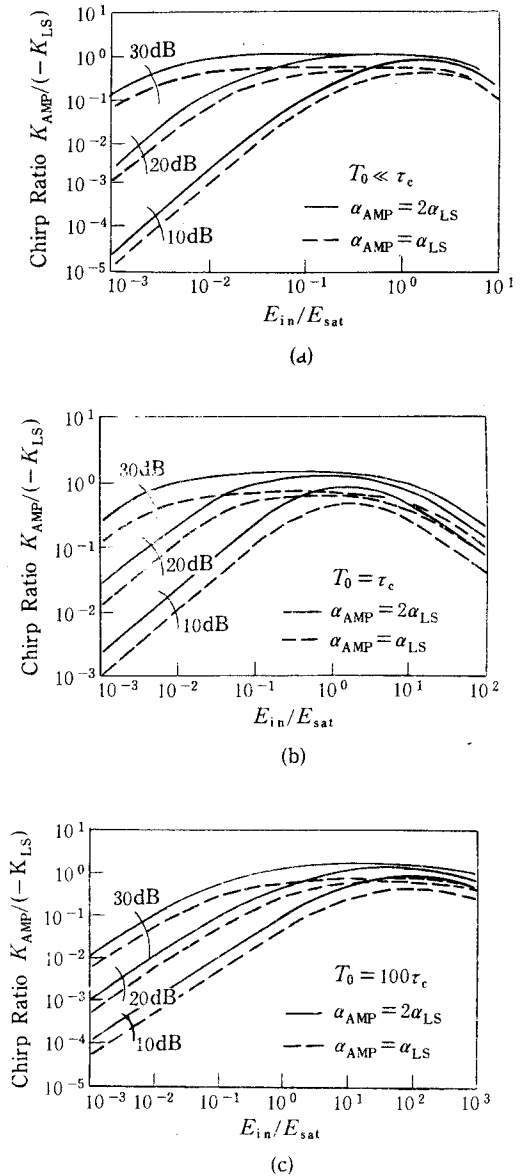


图 2 啁啾参数比 $K_{AMP}/(-K_{LS})$ 与放大器饱和度 E_{in}/E_{sat} 的关系曲线

4 结论

本文用详细的理论模型深入分析了各种情况下增益饱和的行波半导体光放大器的啁啾特性. 由自相位调制所引起的频率啁啾使得放大器传输的光脉冲得到不同程度的相位补偿, 结果取决于入射光脉冲的形状、脉宽和能量, 以及光放大器的工作状态. 入射脉冲的脉宽相对于光放大器的载流子寿命过长, 放大器的非饱和增益过小, 都不利于实现完全的相位补偿. 入射脉冲过窄, 则会出现放大脉冲形状的畸变, 当入射脉冲的脉宽与载流子寿命相当, 放大器工作在合适的状态(尺可能大的增益和相当的饱和度)时, 放大脉冲就能得到最为理想的相位补偿.

参 考 文 献

- [1] G. P. Agrawal and N. K. Dutta, Long Wavelength Semiconductor Lasers, New York: Van Nostrand, 1986, Ch. 2.
- [2] N. A. Ollson and G. P. Agrawal, Appl. Phys. Lett., 1989, **55**:13.
- [3] C. H. Henry, IEEE J. Quantum Electron., 1982, **18**:259.

Phase Compensation Effect of Semiconductor Optical Amplifiers

Jin Tao and Huang Dexiu

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

Qiu Junlin

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

Received 31 July 1994, revised manuscript received 12 December 1994

Abstract The chirp characteristics of traveling-wave semiconductor optical amplifiers (TW-SOAs) are analyzed in detail. The phase compensation of light source chirp using self-phase modulation (SPM) induced by gain saturation in a TW-SOA was theoretically demonstrated. The possibility of phase compensation is shown in all the cases of different input pulse widths much shorter, comparable, and far longer than the amplifier carrier lifetime. This feature can be used to compensate light source chirp.

PACC: 4255P, 4260F, 4260H