

脉冲形状对半导体激光放大器用于 啾啾补偿的影响*

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: 光脉冲经过增益饱和的行波半导体激光放大器后, 由于放大器的自相位调制, 使放大脉冲附加上频率啾啾。合适的附加啾啾不但能抵销入射脉冲的初始啾啾, 而且还有可能借助简单的群速度延迟线对脉冲进行压缩。本文计算了不同形状的入射脉冲经光放大器放大后的输出脉冲形状及其附加的频率啾啾, 分析了它们对光放大器用于啾啾补偿的影响。

关键词: 行波半导体激光放大器 频率啾啾 增益饱和 自相位调制

Effect of the pulse shape on chirp compensation using semiconductor laser amplifiers

Jin Tao, Huang Dexiu

(Department of Optoelectronic Engineering, HUST)

Qiu Junlin

(Institute of Laser, HUST)

Abstract: As a result of self-phase modulation (SPM), the frequency chirp is imposed on optical pulses when the optical pulses are amplified in gain-saturated traveling-wave semiconductor laser amplifiers. The proper impressed chirp results in not only canceling the primary chirp of input pulses, but also possibly compressing pulses with a simple group velocity delay line. In this paper, the shape of the amplified output pulses and impressed frequency chirp are calculated for different input pulses, and the effect on chirp compensation of using optical amplifier is analyzed.

* 国家教委博士点基金项目。

Key words: traveling-wave semiconductor laser amplifier (TW-SLA) self-phase modulation (SPM) frequency chirp gain saturation

一、引 言

光放大器作为全光高速通信系统的关键器件日益得到人们的重视。然而,工作在线性状态下的光放大器只能补偿功率损耗,而对由于光源啁啾和光纤色散引起的脉冲展宽却无能为力。P. A. Yazaki 等人提出了利用增益饱和的半导体激光放大器中的自相位调制特性来对啁啾脉冲进行啁啾补偿,并且在实验中得到了初步的验证^[1]。他们在理论计算中假设光源输出脉冲是高斯形的,但这一假设在许多实际情况中并不适用,特别是对于直接高速调制的半导体激光器的输出脉冲更是如此。因此,本文将详细讨论由于脉冲形状不同而对光放大器实现啁啾补偿所带来的影响。

二、理 论 模 型

考虑理想的单模工作的行波半导体激光放大器,其速率方程表示为^[2]

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{I}{qV} - \frac{N}{\tau_c} - \frac{g(N)}{\hbar\omega_0} |A|^2 \quad (1)$$

式中, N 是载流子浓度, I 是注入电流, q 是电子电荷, V 是放大器有源区体积, τ_c 是自发射载流子寿命, $\hbar\omega_0$ 是光子能量, $A(z, t)$ 是与光脉冲相关的一个慢变包络函数。增益 $g(N)$ 定义为

$$g(N) = \Gamma a(N - N_0) \quad (2)$$

式中, Γ 是波导限制因子, a 是增益系数, N_0 是透明时载流子浓度。

为简化计算,将 A 分解为

$$A = \sqrt{P} \exp(i\varphi) \quad (3)$$

式中, P 和 φ 分别表示功率和相位。另外,作以下代换

$$\tau = t - z/v_g \quad (4)$$

式中, v_g 是群速度。这样,由(1)~(4)式,忽略 $A(z, t)$ 关于 z 和 t 的二阶导数,并结合波动方程,可得到放大器输出脉冲的功率 $P_{\text{out}}(\tau)$ 和相位 $\varphi_{\text{out}}(\tau)$

$$P_{\text{out}}(\tau) = P_{\text{in}}(\tau) \exp[h(\tau)] \quad (5)$$

$$\varphi_{\text{out}}(\tau) = \varphi_{\text{in}}(\tau) - \frac{1}{2} ah(\tau) \quad (6)$$

式中, $h(\tau)$ 定义为

$$h(\tau) = \int_0^L g(z, \tau) dz \quad (7)$$

并满足以下常微分方程

$$\frac{dh}{d\tau} = \frac{g_0 L - h}{\tau_c} - \frac{P_{\text{in}}(\tau)}{E_{\text{sat}}} [\exp(h) - 1] \quad (8)$$

式中, L 是放大器有源区长度, g_0 是放大器的小信号增益, $P_{\text{in}}(\tau)$ 是归一化入射脉冲功率, E_{sat} 是放大器饱和能量, $\varphi_{\text{in}}(\tau)$ 是入射脉冲的初始相位, a 是放大器的线宽增强因子。 $h(\tau)$ 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。

放大器发生增益饱和时,由此引起载流子浓度的改变,使折射率随光强而变化,从而导致自相位调制。因此,当光脉冲沿放大器传播时,就会使自身附上频率啾啾,频率啾啾 $\Delta\nu(\tau)$ 定义为

$$\Delta\nu = -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} \quad (9)$$

将(6)式代入(9)式,得到

$$\Delta\nu_{\text{out}}(\tau) = \Delta\nu_{\text{in}}(\tau) + \frac{\alpha}{4\pi} \frac{dh}{d\tau} \quad (10)$$

由(8)式和(10)式就可得到不同情况下放大器输出脉冲的啾啾量,而其功率则由(5)式给出。

三、分析和讨论

直接高速调制的半导体激光器的输出脉冲形状往往并不是高斯形的,它们可描述为超高斯形或其它更复杂的形式。即使是对于锁模激光器,实验表明,锁模良好的激光器的输出脉冲形状接近于双曲正割形,而锁模不良的激光器的输出脉冲则会出现尖峰变陡,而前后沿向两侧延伸。这些不同的脉冲形状都会影响到放大器的输出特性。

由文献[1]可知,只有当放大器的啾啾特性与入射脉冲的啾啾特性相反时,才能使两者相互抵销。对普通的半导体激光器和工作波长比光纤零色散波长长的情况,一般要求光放大器的啾啾应是线性递增的。

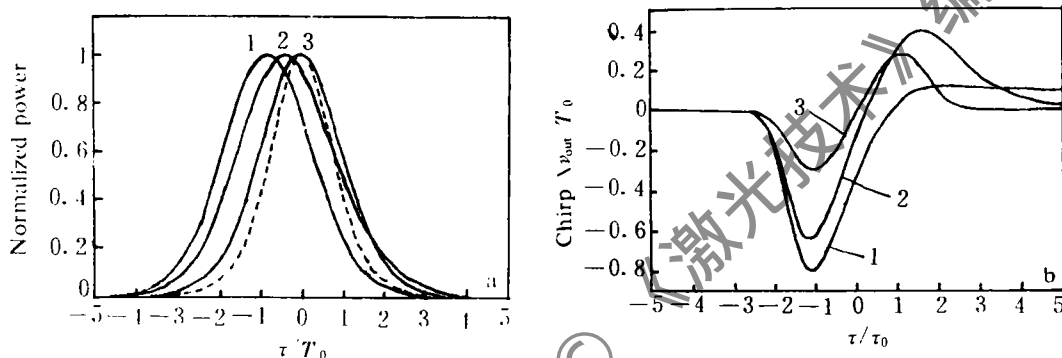


Fig. 1 Normalized output pulse shape

a - and frequency chirp imposed on the output pulses b - for Gaussian shape input pulses, $E_{\text{in}}/E_{\text{sat}} = 0.5$, $G_0 = 20\text{dB}$,
1 - $T_0/\tau_c = 0.1$ 2 - $T_0/\tau_c = 1$ 3 - $T_0/\tau_c = 10$. The dashed curve shows the shape of input pulses

图1~图4分别是不同入射脉冲形状下放大器输出脉冲的形状及其附加的频率啾啾。图1表示高斯形入射脉冲,其入射功率为

$$P_{\text{in}}(\tau) = \frac{E_{\text{in}}}{T_0 \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{\tau^2}{T_0^2}\right) \quad (11)$$

式中, E_{in} 是脉冲能量, T_0 是脉宽。

图2对应超高斯形入射脉冲,其入射功率为

$$P_{\text{in}}(\tau) = \frac{E_{\text{in}}}{T_0} \frac{m}{\Gamma\left(\frac{1}{2m}\right)} \exp\left[-\left(\frac{\tau}{T_0}\right)^{2m}\right] \quad (12)$$

式中, m 是正整数。

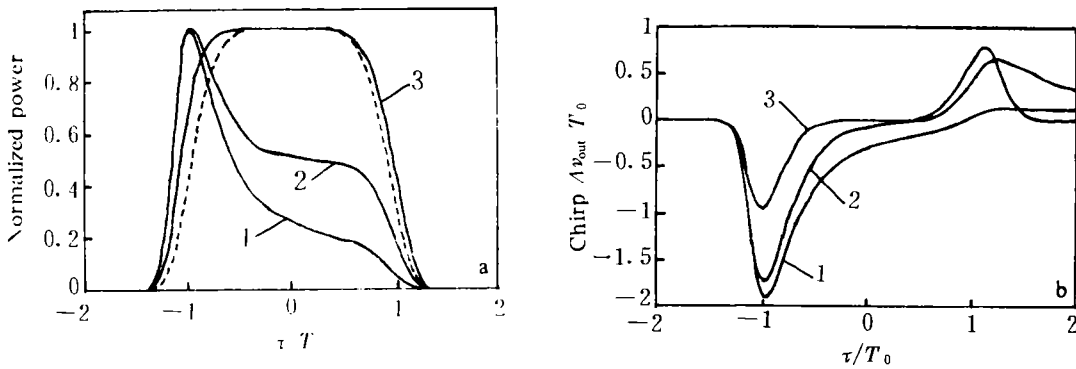


Fig.2 Normalized output pulse shape

a- and frequency chirp imposed on the output pulses b- for super-Gaussian shape input pulses, $E_{in}/E_{sat} = 0.5$, $G_0 = 20\text{dB}$, 1- $T_0/\tau_c = 0.1$ 2- $T_0/\tau_c = 1$ 3- $T_0/\tau_c = 10$. The dashed curve shows the shape of input pulses.

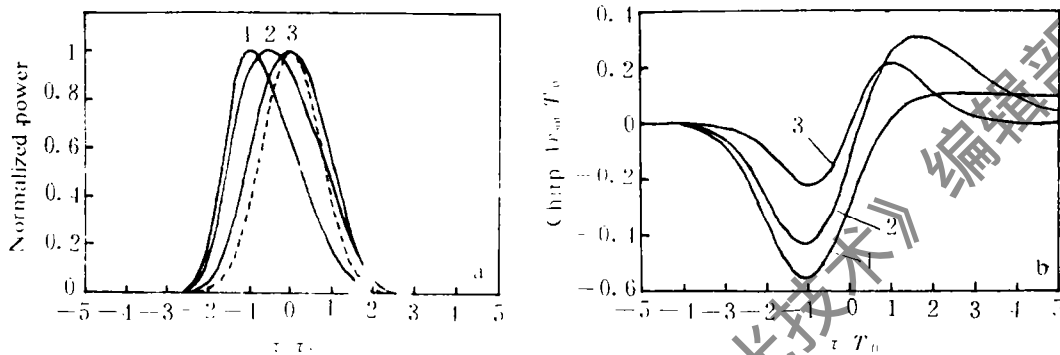


Fig.3 Normalized output pulse shape

a- and frequency chirp imposed on the output pulses b- for sech^2 shape input pulses, $E_{in}/E_{sat} = 0.5$, $G_0 = 20\text{dB}$, 1- $T_0/\tau_c = 0.1$ 2- $T_0/\tau_c = 1$ 3- $T_0/\tau_c = 10$. The dashed curve shows the shape of input pulses

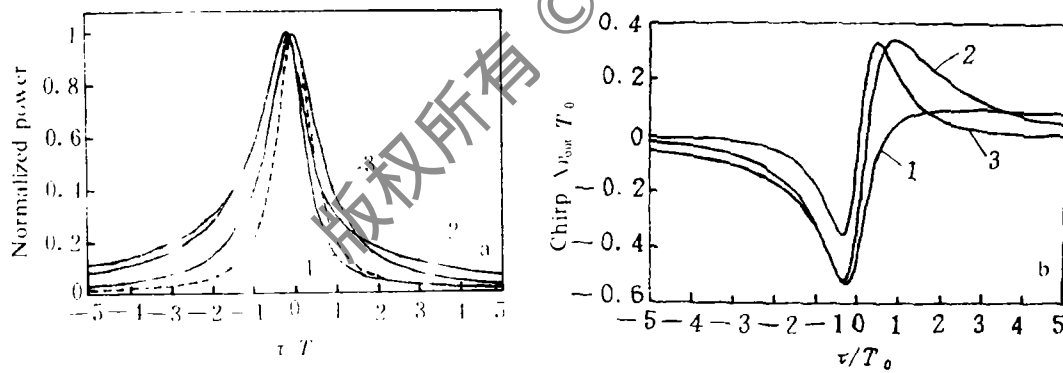


Fig.4 Normalized output pulse shape

a- and frequency chirp imposed on the output pulses b- for Lorentzian shape input pulses, $E_{in}/E_{sat} = 0.5$, $G_0 = 20\text{dB}$, 1- $T_0/\tau_c = 0.1$ 2- $T_0/\tau_c = 1$ 3- $T_0/\tau_c = 10$. The dashed curve shows the shape of input pulses.

图3是双曲正割形入射脉冲的情况,其入射功率表示为

版权所有 © 《激光技术》编辑部