

半导体光放大器啁啾特性分析

金 韬 周 文

黄德修

(浙江大学信息与电子工程系, 杭州, 310027) (华中理工大学光电子工程系, 武汉, 430074)

摘要: 改进了分析行波半导体光放大器啁啾特性的理论模型, 其中考虑了有限的端面反射率和自发辐射。理论研究表明, 这些因素的介绍将减小光放大器附加到放大光脉冲上的非线性频率啁啾。

关键词: 行波半导体光放大器 频率啁啾 端面反射率 自发辐射

Analysis of chirping characteristics of a semiconductor optical amplifier

Jin Tao, Zhou Wen

(Dept. of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, 310027)

Huang Dexiu

(Dept. of Optoelectronic Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract A numerical method for analyzing of the chirping characteristics of a traveling-wave semiconductor optical amplifier is developed. Including the factors of the finite facet reflectivities and the spontaneous emission. The theoretical research show that introduce of these factors will reduce the amplitude of nonlinear frequency chirping imposed on amplified light pulse.

Key words: a traveling-wave semiconductor optical amplifier frequency chirping facet reflectivity spontaneous emission

引 言

行波半导体光放大器的啁啾特性已被人们研究利用^[1, 2], 理论和实验研究显示, 光放大器中的自相位调制效应会使放大光脉冲附加上新的频率分量, 它可以用来补偿光源啁啾和光纤色散^[2, 3]。

在以往的大多数理论模型中都只考虑理想的行波半导体光放大器, 而忽略了光放大器端面残留反射率和自发辐射对器件啁啾特性的影响。虽然人们已经在建立接近实际的光放大器模型上做了许多工作^[4-6], 但却没有深入到其啁啾特性的研究上。我们提出一种分析光放大器啁啾特性的数值方法, 以克服以往工作中由理想近似条件而引入的结果误差。

一、理 论 模 型

在考虑行波半导体光放大器端面残留反射率和自发辐射的情况下, 我们对 G. P. Agrawal 等人的理论模型^[1]进行了修改。图 1 表示了光放大器中的信号功率; 下标+ 和- 分别代表了信号传播的正反方向。于是, 光放大器可以由

下列方程组来描述: $\partial P^+ / \partial z = gP^+$ (1)

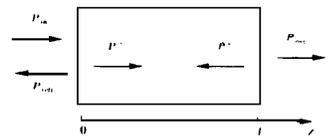


Fig. 1 Schematic of a SOA showing input and output signal power

$$\partial P^- / \partial z = gP^- \quad (2)$$

$$\partial N / \partial \tau = I / (qV) - N / \tau_c - \{ [g / (\hbar \omega_0)] [(P^+ + P^-) / (wd)] + \sum X_{sp} \} \quad (3)$$

式中, P 是归一化功率, N 是载流子密度, I 是注入电流, q 是电子电荷, V 是有源区体积, τ_c 是自发载流子寿命, $\hbar \omega_0$ 是光子能量, τ 是本地时间, X_{sp} 代表自发辐射项, w , d 和 L 分别为光放大器的宽度、厚度和长度。增益 g 定义为: $g = \Gamma a(N - N_0)$ (4)

式中, Γ 为限制因子, a 是增益系数, N_0 是透明时的载流子密度。

因为光放大器腔中每一点的自发光子密度在我们的计算中并不重要, 所以(3)式中与自发辐射相关的项可近似为^[7]

$$\sum X_{sp} = \{ (G - 1) [(1 - R_2)(1 + R_1 G) + (1 - R_1)(1 + R_2 G)] / [h(1 - R_1 R_2 G^2)] - 2 \} \times (N / \tau_c) \times \beta \quad (5)$$

式中, 对光放大器腔中的所有模式进行累加。 R_1 和 R_2 分别为光放大器输出和输入端面反射率, β 是自发辐射系数, 单程增益 $G = \exp(h)$ 。系数 h 定义为:

$$h(\tau) = \int_0^L g(z, \tau) dz \quad (6)$$

$$\text{联合方程(1)~(4), 可得 } \frac{\partial g}{\partial \tau} = \frac{g_0 - g}{\tau_c} - \left[\frac{1}{E_{\text{sat}}} \left(\frac{\partial P^+}{\partial z} - \frac{\partial P^-}{\partial z} \right) \right] - \Gamma a \sum X_{sp} \quad (7)$$

式中, $g_0 = \Gamma a N_0 (I \tau_c / q V N_0 - 1)$ 是小信号增益, $E_{\text{sat}} = \hbar \omega_0 w d / \Gamma a$ 是饱和能量。

对方程(7)在光放大器腔长的区间上进行积分, 得到

$$\frac{dh}{d\tau} = \frac{g_0 L - h}{\tau_c} - \frac{1}{E_{\text{sat}}} \{ [P^+(L, \tau) - P^+(0, \tau)] - [P^-(L, \tau) - P^-(0, \tau)] \} C_{sp} \frac{\Gamma a \beta}{\tau_c} \left(N_0 L + \frac{h}{\Gamma a} \right) \quad (8)$$

$$C_{sp} = \frac{(G - 1) [(1 - R_2)(1 + R_1 G) + (1 - R_1)(1 + R_2 G)]}{h(1 - R_1 R_2 G^2)} - 2 \quad (9)$$

在光放大器腔长的区间上对方程(1)和(2)两边进行积分, 得

$$P^+(L, \tau) = P^+(0, \tau) \exp[h(\tau)] \quad (10)$$

$$P^-(L, \tau) = P^-(0, \tau) \exp[-h(\tau)] \quad (11)$$

光放大器腔的端面必须满足以下的边界条件

$$P^+(0, \tau) = (1 - R_1) P_{\text{in}} + R_1 P^-(0, \tau) \quad (12)$$

$$P^-(L, \tau) = R_2 P^+(L, \tau) \quad (13)$$

$$P_{\text{out}}(L, \tau) = (1 - R_2) P^+(L, \tau) \quad (14)$$

式中, P_{in} 是归一化功率。

将等式(10)~(13)代入方程(8), 给出 $dh/d\tau$

$$\frac{dh}{d\tau} = \frac{\ln G_0 - h}{\tau_c} - \frac{1}{E_{\text{sat}}} \cdot \frac{(G - 1)(1 - R_1)(1 + R_2 G)}{1 - R_1 R_2 G^2} P_{\text{in}} - C_{sp} \frac{\Gamma a \beta}{\tau_c} \left(N_0 L + \frac{h}{\Gamma a} \right) \quad (15)$$

式中, 非饱和单程增益 $G_0 = \exp(g_0 L)$ 。

光放大器输出光脉冲的频率啁啾 $\Delta \nu_{\text{out}}$ 可表示为^[1]: $\Delta \nu_{\text{out}}(\tau) = \Delta \nu_{\text{in}}(\tau) + \frac{\alpha}{4\pi} \frac{dh}{d\tau}$ (16)

式中, $\Delta \nu_{\text{in}}$ 是入射光脉冲的频率啁啾, α 是线宽增强因子。

用数值方法求解微分方程(15),于是放大光脉冲的功率和啁啾就很容易从等式(14)和(16)分别得到了。在此考虑无啁啾高斯形入射光脉冲的情况:

$$P_{in}(\tau) = (E_{in}/T_0\sqrt{\pi}) \exp(-\tau^2/T_0^2) \tag{17}$$

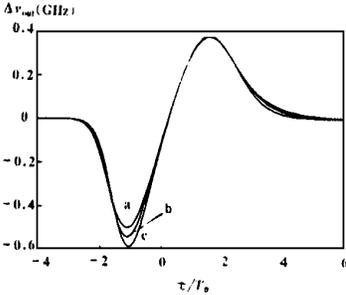


Fig. 2 Frequency chirping ΔV_{out} across the amplified pulse for $R_1 = R_2 = 9 \times 10^{-3}$ (curve a), 5×10^{-3} (curve b) and 10^{-4} (curve c). The amplifier operates with $L = 250\mu\text{m}$, $G_0 = 20\text{dB}$, $E_{in}/E_{sat} = 0.5$, $\Gamma = 0.47$, $a = 2.3 \times 10^{-8} \mu\text{m}^2$, $\alpha = 5$, $\beta = 10^{-3}$ and $N_0 = 10^6 \mu\text{m}^{-3}$

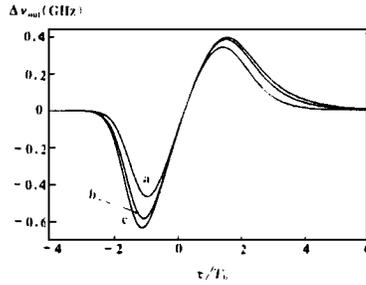


Fig. 3 Frequency chirping ΔV_{out} across the amplified pulse for $R_1 = R_2 = 10^{-4}$, $\beta = 5 \times 10^{-3}$ (curve a), 10^{-3} (curve b) and 10^{-4} (curve c). The other parameters are identical to those of Fig. 2

式中, E_{in} 是入射光脉冲能量, T_0 是光脉冲的宽度 ($1/e$ 光强处)。

在计算中选择 $T_0 = \tau_c$ 这一典型情况。图 2 是光放大器不同端面反射率下频率啁啾在放大光脉冲上的分布。由图可见, 端面反射率的增加导

致非线性频率啁啾幅度的减小。这可以解释为在高反射率的光放大器中, 反向信号功率的增加使得正向信号获得的增益减小, 而啁啾的大小与信号获得的增益大小有关^[1]。如果进一步增大端面反射率 (大于 10^{-2}), 那么光放大器将显示出与激光器相同的正啁啾特性。在此我们不讨论这种情况, 只考虑能用来补偿激光器啁啾的准行波半导体光放大器^[2]。

图 3 是自发辐射系数 β 时频率啁啾在放大光脉冲上的分布。图中显示 β 值的大小也影响放大光脉冲的啁啾分布, β 的增大使非线性频率啁啾幅度的减小。这是由于自发辐射复合引起的载流子消耗导致信号能得到的增益减小。

二、结 论

我们研究了端面反射率和自发辐射对光放大器啁啾特性的影响。端面反射率或自发辐射增大都将导致放大光脉冲非线性频率啁啾幅度的减小。严重的自发辐射对光纤通信系统有害, 而过高残留端面反射率将使光放大器产生强烈的增益波动, 这是实际使用中不希望出现的。

参 考 文 献

- 1 Agrawal G P, Olsson N A. IEEE J Q E, 1989; 25: 2297
- 2 Yazaki P A, Komori K, Arai S et al. J Lightwave Technol, 1992; 10: 1247
- 3 Olsson N A, Agrawal G P, Wecht K W. Electron Lett, 1989; 25: 603
- 4 Zaglanikis C D, Seeds A J, IEE Proceedings J, 1992; 139: 254
- 5 Brosson P. J Lightwave Technol, 1994; 12: 49
- 6 Chu C Y J, Ghafouri-Shirag H. J Lightwave Technol, 1994; 12: 1378
- 7 Henning I D, Adams M J, Collins J V. IEEE J Q E, 1985; 21: 609

作者简介: 金 韬, 男, 1968 年 5 月出生。博士后。主要从事光电子器件的研究和开发。