

基于半导体光放大器交叉增益饱和的 波长转换的理论分析*

孙军强 张新亮 陈 娟 黄德修 易河清**

(华中理工大学光电子工程系; ** 武汉邮电科学研究院 武汉 430074)

摘要 建立了基于半导体光放大器交叉增益饱和的波长转换的理论模型。分别讨论了小信号下波长转换特性和大信号下转换波形的畸变情况。结果表明,半导体光放大器的载流子寿命是导致输出波形畸变的主要因素。

关键词 波长转换,交叉增益饱和,半导体光放大器

1 引 言

波分复用(WDM)技术将成为未来宽带光纤通信系统的重要技术,必将得到极其广泛的应用。通信容量的增大,用户数量的增加,导致光通信网络中节点数目的增加,但是在 WDM 的通信系统中,由于受到光纤损耗和色散所决定的传输窗口以及激光器的光谱宽度、探测器的响应带宽的限制,载波的波长数目不可能与节点数同步增长。同一载波波长在同一节点处作不同路由时,将导致波长瓶颈,形成信息阻塞^[1,2]。在网络节点处实现全光波长转换,对提高 WDM 通信系统网络的灵活性,解决信息阻塞问题,进一步提高通信容量具有重要意义。利用半导体光放大器的交叉增益饱和^[3]、四波混频效应^[4]可实现全光波长转换。而基于半导体光放大器的交叉增益饱和调制的波长转换是最简单且容易实现的。它具有较高的转换效率和较大的波长转换范围。D. D. Marcenac^[5], D. A. Davies^[6]和 A. Mecozzi^[7]等对基于半导体光放大器的交叉增益饱和调制的波长转换进行了实验与理论研究。然而他们都没有考虑对应于泵浦光、探测光波长的半导体光放大器的光参数(如增益、饱和功率等)的差异。事实上这种光参数的差异总是存在的。但是在实验过程中^[8],我们发现在泵浦光是小信号调制的情形下,必有较强的直流信号,才能实现半导体光放大器的增益饱和,以达到波长转换的目的。而更多的情况是泵浦光的直流信号较小,但具有较深交流调制光信号。因此,就要用大信号的理论模型进行分析。

本文正是在兼顾对应于泵浦光、探测光波长的半导体光放大器的光参数(如增益、饱和功率等)的差异的情况下,分别对小信号、大信号光泵浦下的波长转换进行了分析,并讨论了不同速率下的波形畸变情况。

* 国家 863 基金、华为科研基金和湖北省自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1997-12-08; 收到修改稿日期: 1998-03-23

2 理论模型

图 1 所示是基于半导体光放大器交叉增益饱和的波长转换器的示意图, 其基本原理可简述如下: 当一高强度的深度调制的泵浦光进入半导体光放大器传输后, 造成半导体光放大器的增益饱和, 随着泵浦光调制光强的增加, 半导体光放大器的增益将减小, 但调制光强减弱时, 放大器的增益将迅速恢复到原来的数值, 所以放大器的增益同光信号调制相比较呈反相调制。当两种波长的光(一种为强调制的泵浦光(λ_1), 另一种为微弱的连续探测光(λ_2))同时耦合进入半导体光放大器后, 则呈反相调制的增益将对连续的探测光作调制, 同时使泵浦光的信息通过增益调制而传递给探测光, 因而实现了波长转换。其特点是转换前后的信号位相差 π 。众所周知, 半导体光放大器中的载流子密度 $N(z, t)$ 满足如下的速率方程^[9]

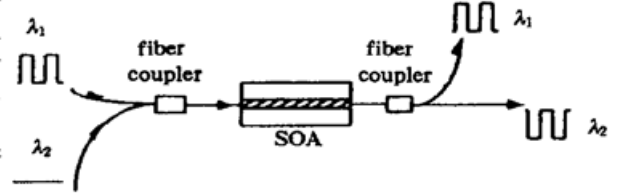


图 1 波长转换的基本原理图

Fig. 1 Schematic diagram of configuration for wavelength conversion

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{I}{eV} - \frac{N}{\tau_s} - \frac{N - N_1}{\tau_s} \frac{P_1}{P_{\text{sat},1}} - \frac{N - N_2}{\tau_s} \frac{P_2}{P_{\text{sat},2}} \quad (1)$$

式中, I 为注入电流; V 为增益区的体积; e 为电子电荷; $(N - N_1)$, $(N - N_2)$ 为与波长 λ_1 , λ_2 的增益有关的反转粒子数。 $P_{\text{sat},1}$, $P_{\text{sat},2}$ 为对应于波长 λ_1 , λ_2 的饱和功率, 即

$$P_{\text{sat},1} = \frac{A\hbar\omega_1}{\alpha_1\Gamma\tau_s} \quad P_{\text{sat},2} = \frac{A\hbar\omega_2}{\alpha_2\Gamma\tau_s} \quad (2)$$

式中, α_1 , α_2 为对应于波长 λ_1 , λ_2 的增益系数, Γ 为模场限制因子, τ_s 为载流子寿命; 在本文中假设 Γ 对波长 λ_1 , λ_2 的模场都是相同的。 A 为光波导增益区的有效截面积, $\hbar\omega_1$, $\hbar\omega_2$ 分别为泵浦光与探测光的光子能量。泵浦光功率(P_1) 和探测光功率(P_2) 在半导体光放大器的变化满足如下关系

$$\frac{\partial P_1}{\partial z} = [\Gamma\alpha_1(N - N_1)]P_1 \quad (3)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial z} = [\Gamma\alpha_2(N - N_2)]P_2 \quad (4)$$

方程(1)~(4)是本文讨论波长转换的基本方程。

3 波长转换的小信号分析

考虑泵浦光是由较强的连续光信号上叠加有微弱的调制光信号, 较强的连续光信号使半导体光放大器饱和或接近于饱和状态, 微弱的调制光信号加深了半导体光放大器饱和, 从而实现波长转换。因而, 可用小信号的方法作处理。设初始注入半导体光放大器的泵浦光功率为

$$P_1(t, 0) = P_{10} + p_1 \exp(i\Omega t) + p_1^* \exp(-i\Omega t) \quad (5)$$

与之相对应, 令半导体光放大器的载流子密度变化关系为

$$N(t, z) = N_0(z) + n(z) \exp(i\Omega t) + n^*(z) \exp(-i\Omega t) \quad (6)$$

式(5), (6)中, “*”表示复数的共轭。设初始注入半导体光放大器的探测光为连续光

$$P_2(t, 0) = P_{20} \quad (7)$$

对(1)式两边积分, 并利用(3), (4)式, 忽略二阶小量, 根据 $\exp(i\Omega t)$, $\exp(-i\Omega t)$ 项的系数, 有

$$\int_0^z n dz = \frac{-\frac{1}{\Gamma\alpha_1} \cdot \frac{(G_1-1)p_1}{P_{\text{sat},1}}}{1 + \frac{G_1 P_{10}}{P_{\text{sat},1}} + \frac{G_2 P_{20}}{P_{\text{sat},2}} + i\Omega\tau_s} \quad (8)$$

$$\int_0^z n^* dz = \frac{-\frac{1}{\Gamma\alpha_1} \cdot \frac{(G_1-1)p_1^*}{P_{\text{sat},1}}}{1 + \frac{G_1 P_{10}}{P_{\text{sat},1}} + \frac{G_2 P_{20}}{P_{\text{sat},2}} - i\Omega\tau_s} \quad (9)$$

(9), (10) 式中

$$G_1 = \exp\left[\int_0^z \Gamma\alpha_1(N_0 - N_1) dz'\right] \quad (10)$$

$$G_2 = \exp\left[\int_0^z \Gamma\alpha_2(N_0 - N_2) dz'\right] \quad (11)$$

N_0 为稳态时的载流子密度。由(10), (11) 式, 我们可以求得半导体光放大器波导内任意点的泵浦光、探测光的功率大小, 继而可获得小信号下波长转换的效率

$$\eta = \frac{\left| \int_t^{t+T} \left[\Gamma\alpha_1 G_1 P_{10} \int_0^L n dz + G_1 p_1 \right] \exp(i\Omega t') + \left[\Gamma\alpha_1 G_1 P_{10} \int_0^L n^* dz + G_1 p_1^* \right] \exp(-i\Omega t') dt' \right|}{\left| \int_t^{t+T} \left[\Gamma\alpha_2 G_2 P_{20} \exp(i\Omega t') \int_0^L n dz + \Gamma\alpha_2 G_2 P_{20} \exp(-i\Omega t') \int_0^L n^* dz \right] dt' \right|} \quad (12)$$

式(12) 中, T 为调制光信号周期; L 为半导体光放大器波导的增益区长度。通过对(12) 式的求解发现, 小信号下波长转换的效率与注入泵浦光的小信号调制幅度无关。应用(12) 式, 我们计算了不同增益、泵浦光和探测光的直流偏置下, 波长转换效率对调制频率的响应情况。在计算中假设 $\alpha_1 = \alpha_2$, 泵浦光、探测光的波长分别为 $1.30 \mu\text{m}$ 和 $1.33 \mu\text{m}$; 泵浦光的饱和功率为 10

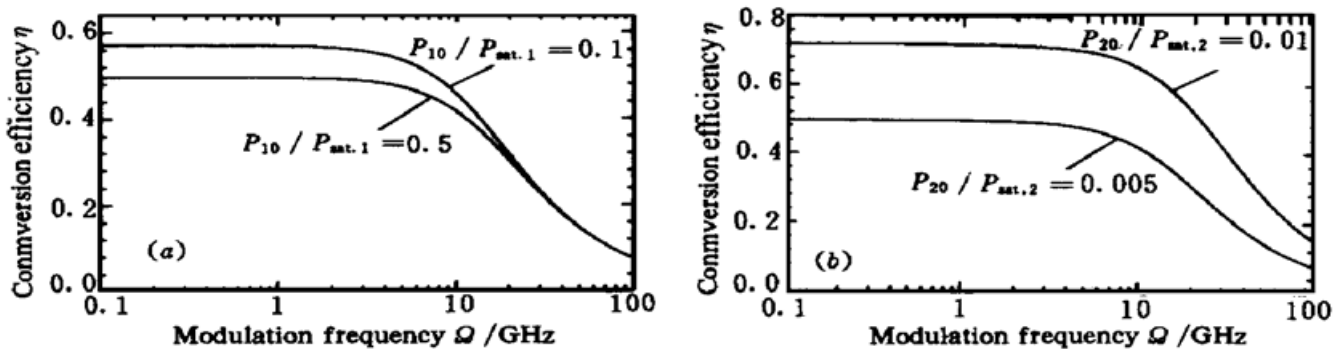


图2 在不同的 P_{10} (a) 和 P_{20} (b) 值下, 波长转换效率对调制频率的响应

Fig. 2 The curves of conversion efficiency versus modulation frequency with different values of P_{10} (a) and P_{20} (b)

(a) $G_1 = 20 \text{ dB}$, $G_2 = 25 \text{ dB}$, $P_{20}/P_{\text{sat},2} = 0.05$; (b) $G_1 = 20 \text{ dB}$, $G_2 = 25 \text{ dB}$, $P_{10}/P_{\text{sat},1} = 0.1$

mW, 探测光的饱和功率可由 $P_{\text{sat},2} = \lambda_1 P_{\text{sat},1} / \lambda_2$ 来求得; 光放大器的载流子寿命为 100 ps ^[9]; 图2(a) 是在不同的泵浦光引起光放大器饱和的条件下, 波长转换效率对调制频率的响应情况。随着泵浦光引起的光放大器饱和程度的加深, 波长转换效率也随之而减少。图2(b) 是在维持注入的泵浦功率不变的条件下, 改变注入探测光的功率, 波长转换效率对调制频率的响应情况。注入的探测光功率越大, 就能获得更大的转换效率。

4 波长转换的大信号分析

基于交叉增益饱和的波长转换主要是由泵浦光造成光放大器的增益饱和, 使得增益随泵浦光呈反相调制, 作用于探测光而实现波长转换。所以, 在绝大多数情况下, 泵浦光的调制光信号很强而连续光信号相对较弱, 因而此时须采用大信号的方法作分析。由方程(3), (4), 令

$$h_1(t) = \ln \left[\frac{P_1(t, z)}{P_1(t, 0)} \right] = \int_0^z \Gamma \alpha_1 (N - N_1) dz' \quad (13)$$

$$h_2(t) = \ln \left[\frac{P_2(t, z)}{P_2(t, 0)} \right] = \int_0^z \Gamma \alpha_2 (N - N_2) dz' \quad (14)$$

通过(13), (14) 两式变换, 发现 $h_1(t)$ 与 $h_2(t)$ 满足如下关系

$$\alpha_2 h_1(t) - \alpha_2 g_1 = \alpha_1 h_2(t) - \alpha_1 g_2 \quad (15)$$

其中 g_1, g_2 分别为

$$g_1 = \int_0^z \Gamma \alpha_1 \left[\frac{I \tau_s}{eV} - N_1 \right] dz' \quad (16)$$

$$g_2 = \int_0^z \Gamma \alpha_2 \left[\frac{I \tau_s}{eV} - N_2 \right] dz' \quad (17)$$

对(1) 式两边进行 $\int_0^z dz'$ 积分, 得到

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{g_2 - h_2}{\tau_s} - \frac{\alpha_2 P_1(t, 0)}{\alpha_1 \tau_s P_{\text{sat}, 1}} \left[\exp \left(g_1 - \frac{\alpha_1}{\alpha_2} g_2 \right) \exp \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} h_2 \right) - 1 \right] - \frac{P_2(t, 0)}{\tau_s P_{\text{sat}, 2}} [\exp(h_2) - 1] \quad (18)$$

这是关于 h_2 的微分方程, 只能通过数值方法对其进行求解。求得 h_2 后, 再利用方程(13) 和(14), 获得经光放大器波长转换后的波形。应用四阶 Runge-Kutta 对方程(18) 进行了数值计算。有关光放大器的计算参数选择如下: 对应于泵浦光、探测光的增益系数分别为 115 cm^{-1} , 110 cm^{-1} , 光放大器增益区的长度取 $400 \text{ }\mu\text{m}$; 其余的参数与小信号讨论相同, 设初始注入光放

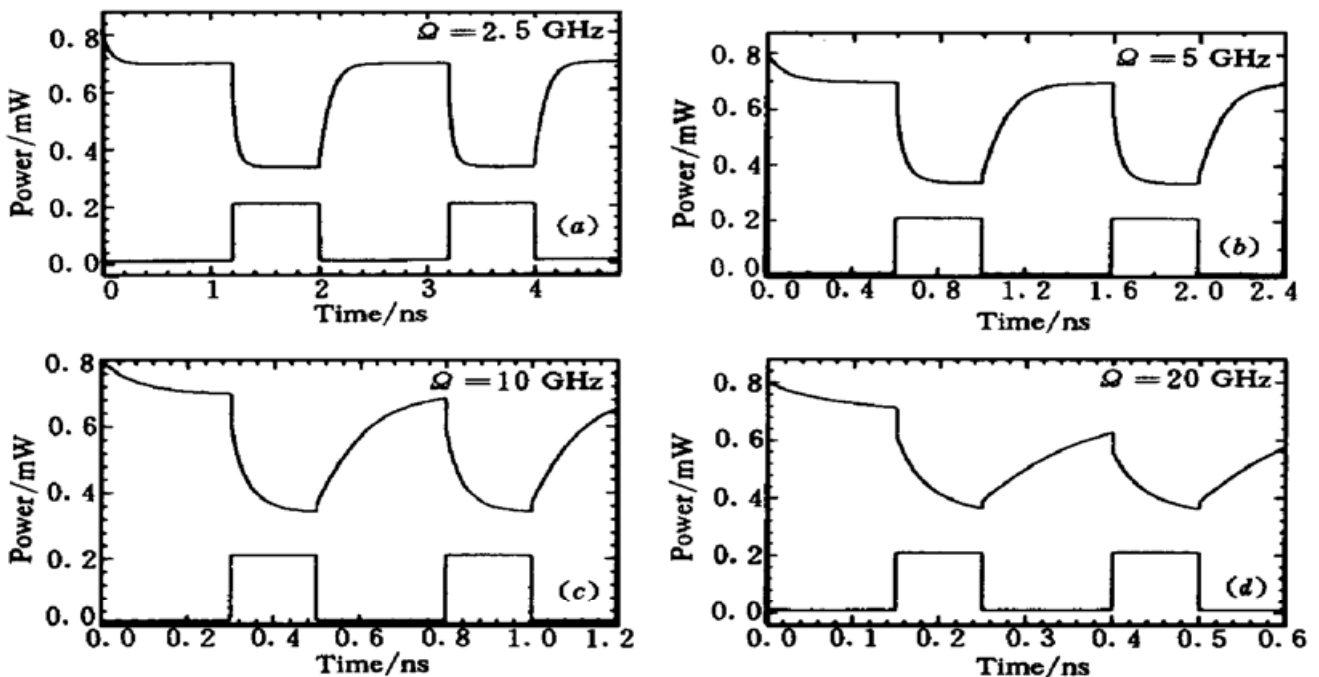


图3 在不同的调制速率下, 注入信号波形(下)与波长转换后的波形(上)

Fig. 3 Input waveform (down) and converted waveform (upper) under different modulation frequencies

大器的连续(CW)探测光的功率为 0.01 mW。选取泵浦的调制信号为“00011001100”码;泵浦光的“0”码功率为 0.01 mW,“1”码功率为 0.2 mW。图 3 是对应于不同的调制速率下,注入信号与输出转换信号的波形。从图中可以看出,随着调制速率的增加,波长转换后的光信号的畸变更强烈。这主要是由增益饱和、增益恢复的速率所决定的,而速率同光放大器的载流子寿命是密切相关的。仔细考察(13),(14)和(18)式,波形的畸变程度同 $\Omega\tau_s$ 值的大小密切相关,增益饱和、增益恢复的速率低于信号的调制速率时,由于光放大器的增益同泵浦光信号的上升沿以及下降沿同步饱和和恢复,势必导致波长转换后波形的畸变。从(18)式还发现,波长转换后波形的畸变也同泵浦光、探测光的饱和功率有一定的关系。

参 考 文 献

- 1 T. Durhuus, B. Mikkelsen, C. Joergensen *et al.*. All-optical wavelength conversion by semiconductor optical amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6): 942~ 954
- 2 S. J. B. Yoo. Wavelength conversion technologies for WDM network applications. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6): 955~ 966
- 3 J. M. Wiesenfeld, J. S. Perino, A. H. Gnauck *et al.*. Bit error rate performance for wavelength conversion at 20 Gbit/s. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(9): 720~ 721
- 4 D. F. Geraghty, R. B. Lee, K. J. Vahala *et al.*. Wavelength conversion up to 18 nm at 10 Gb/s by four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(4): 452~ 454
- 5 D. D. Marcenac, A. E. Kelly, D. Nasset *et al.*. Bandwidth enhancement of wavelength conversion via cross-gain modulation by semiconductor optical amplifier cascade. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(17): 1442~ 1443
- 6 D. A. O. Davies. Small-signal analysis of wavelength conversion in semiconductor laser amplifiers via gain saturation. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(6): 617~ 619
- 7 A. Mecozzi. Small-signal theory of wavelength converters based on cross-gain modulation in semiconductor optical amplifiers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(11): 1471~ 1473
- 8 Sun Junqiang, Huang Dexiu, Yi Heqing. Small-signal analysis of wavelength conversion in semiconductor laser amplifiers based on gain saturation. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 1997, **46**(12): 2369~ 2375 (in Chinese)
- 9 G. P. Agrawal, N. A. Olsson. Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifiers. *J. IEEE Quantum Electron.*, 1989, **25**(11): 2297~ 2306

Theoretical Analysis of Wavelength Conversion in Semiconductor Optical Amplifiers Based on Cross-gain Saturation

Sun Junqiang Zhang Xinliang Chen Juan Huang Dexiu Yi Heqing¹

Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology,

¹*Wuhan Research Institute of Post & Telecommunication, Wuhan 430074*

Abstract A theoretical model of wavelength conversion based on cross-gain saturation in a semiconductor optical amplifier (SOA) has been established. The wavelength conversion characteristics under the small-signal modulation and the converted waveform distortion under the large-signal modulation are discussed respectively. The results show that the SOA carrier lifetime is the main factor that produces converted waveform distortion.

Key words wavelength conversion, cross-gain saturation, semiconductor optical amplifier