第 20 卷第 12 期　　半 导 体 学 报　　Vol 20, No. 12
1999 年 12 月　　CHINESE JOURNAL OF SEMICONDUCTORS　　Dec, 1999

交叉增益调制型全光波长转换器频响特性的小信号分析*

孙军强　黄德修　易河清[1]

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

摘要　对基于半导体光放大器交叉增益调制型全光波长转换器的频响特性作了理论分析, 并获得了反映注入光参数对波长转换频响特性影响的解析表达式. 数值结果表明, 波长转换的频率响应带宽依赖于光放大器驱动电流、注入光波导的光功率以及转换波长间隔.

PACC: 4265K, 4265G, 4255P;　**EEACC**: 6150C, 6230, 6260

1　引言

波分复用(WDM)技术能使多个载有信息的光波耦合进入同一单模光纤传输, 明显地提高了光纤传输信息的容量. 通信容量的增大, 用户数目的增多, 导致光通信网络节点数目的增加. 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、探测器的探测带宽的限制, 载波的波长数目不可能与光节点数同步增长. 同一载波波长在同一节点处作不同路由选择时将导致波长瓶颈, 形成信息阻塞. 波长转换器是完成将信息从一个载波波长到另一个载波波长的转换. 通信网络中采用波长转换器, 能使参与波分复用的波长数目减少, 使网络组建、子网管理更具灵活性与兼容性[1,2]. 利用半导体光放大器的交叉增益调制[3]、四波混频[4]等非线性效应可实现全光波长转换. 基于半导体光放大器的交叉增益调制(XGM)[3]、交叉相位调制(XPM)[5]和四波混频效应(FWM)[6]的全光波长转换器已成为当前研究的热门. 交叉增益调制的波长转换能在 较宽的波长范围内实现高的转换效率和波长转换的响应速率. 本文通过建立XGM 的波长转换的小信号理论模型, 重点讨论波长转换频率响应特性受驱动电流、波长转换间隔、方向吸注入光波导内的光功率等的影响.

2　小信号分析

图 1 是基于半导体光放大器交叉增益调制的波长转换的原理图. 其波长转换的机理可

* 本项目得到国家"863"高技术计划、湖北省自然科学基金以及华为科研基金的资助
孙军强　男, 教授, 主要从事光纤通信系统中有源器件的研究
1998-08-06 收到, 1998-12-31 定稿

简述如下: 设泵浦光(波长为 λ_1, 图 1 中为 λ_{pump})由两部分叠加而成, 一部分为具有一定强度的连续光, 另一部分为具有一定调制深度的载有信息的调制光, 当泵浦光注入到半导体光放大器后, 将消耗载流子, 使半导体光放大器工作在增益饱和区域. 随着调制光强的增加, 半导体光放大器的增益将减小, 但当调制光强减弱时, 放大器的增益将迅速恢复到原来的数值, 所以, 光放大器的增益同信号调制相比较, 呈反相调制. 当两种波长的光(一种为泵浦光, 另一种为探测光(波长为 λ_2, 图 1 中为 λ_{probe}))同时耦合进入光放大器后, 则呈反相调制的增益将对连续的探测光作调制, 同时使得泵浦光载有的信息通过增益调制而传递给探测光, 换句话说, 将波长 λ_1 上载有的信息转换到了波长 λ_2 上. 因而实现了波长转换. 其特点是转换前后的光信号相位反相.

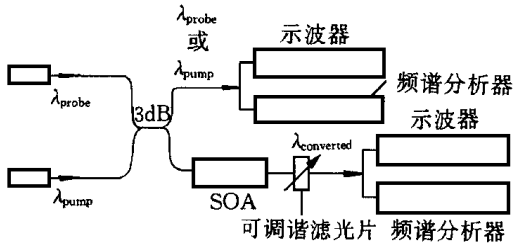

图 1　波长转换原理图

在半导体光放大器中传输的泵浦光、探测光满足如下的微分方程:

$$\frac{\partial P_1}{\partial z} = \Gamma g_1 P_1 \tag{1}$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial z} = \Gamma g_2 P_2 \tag{2}$$

式(1)、(2)中　g_1、g_2 为在泵浦光、探测光波长 λ_1、λ_2 处且载流子密度为 N 的增益系数; Γ 为模场限制因子(本文中, 令对应于泵浦光、探测光具有相同的数值); P_1、P_2 为泵浦光、探测光的功率. 半导体光放大器中载流子密度 N 满足如下的速率方程[7]:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{I}{eV} - (AN + BN^2 + CN^3) - \frac{\Gamma g_1 P_1}{A_{eff}\hbar\omega_1} - \frac{\Gamma g_2 P_2}{A_{eff}\hbar\omega_2} \tag{3}$$

式中　$AN + BN^2 + CN^3$ 是自发复合速率, 三项分别对应于非辐射复合、双分子复合、俄歇复合系数(A、B、C 为常数, 如表 1 所列); I 为驱动电流; e 为电子电荷; V 为光放大器增益区的体积; A_{eff} 为增益区的有效截面积; $\hbar\omega_i$ ($i = 1, 2$) 是泵浦光、探测光的光子能量. 增益系数 g_1、g_2 不仅同载流子密度 N 有关, 而且同注入光的波长有关. 半导体光放大器的增益谱一般是非对称的抛物线型, 根据实验的经验值, 增益系数可表达为[8]:

$$g_i(N) = a(N - N_T) - \gamma_1(\lambda_i - \lambda_p)^2 + \gamma_2(\lambda_i - \lambda_p)^3 \quad (i = 1, 2) \tag{4}$$

式中　a 为材料的增益系数; γ_1、γ_2 为经验值(如表 1 所列); N_T 为半导体光放大器透明载流子密度; λ_p 为增益峰值波长. 半导体光放大器偏置电流的变化, 形成载流子密度的变化, 造成半导体光放大器增益谱的峰值波长的变化. 一般情况下, 随着注入电流的增加, 光放大器的增益峰值波长将发生蓝移; 注入泵浦光和探测光的光强的增强都会更多地消耗半导体光放大器的载流子, 从而使增益谱的峰值波长发生红移. 峰值波长与载流子密度 N 的关系可表示为[8]:

$$\lambda_p = \lambda_0 - k_0(N - N_T) \tag{5}$$

式中　λ_0 是半导体光放大器透明时的峰值波长; k_0 为实验所得的经验值.

假设泵浦光是在强的连续光上叠加有微弱的调制光信号, 在以下的处理中, 将微弱的调制光信号作为小信号来处理. 为此, 半导体光放大器中载流子密度, 注入及输出光功率表示

为:

$$N(t,z) = N_0 + n(z)e^{i\Omega t} + n^*(z)e^{-i\Omega t} \tag{6}$$

$$P_i(t,0) = P_{i0} + p_i(t,0) = P_{i0} + p_{i0}e^{i\Omega t} + p_{i0}^* e^{-i\Omega t} \tag{7}$$

$$P_i(t,L) = P_{iL} + p_i(t,L) = P_{iL} + p_{iL}e^{i\Omega t} + p_{iL}^* e^{-i\Omega t} \tag{8}$$

式中 L 为有源区长度, Ω 为调制频率. 我们对方程(1)、(2)两边作积分变换, 得到:

$$\int \Gamma g_i P_i \mathrm{d}z' = P_i(t,0)\left[\frac{P_i(t,z)}{P_i(t,0)} - 1\right] \tag{9}$$

而

$$\frac{P_i(t,z)}{P_i(t,0)} = \exp\left[\int \Gamma g_i(N)\mathrm{d}z'\right] = \overline{G}_i\left[1 + \Gamma A_i \int (n e^{i\Omega t} + n^* e^{-i\Omega t})\mathrm{d}z'\right] \tag{10}$$

其中:

$$\overline{G}_i = \exp\left[\int \Gamma g_i(N_0)\mathrm{d}z'\right] \tag{11}$$

$$A_i = a - 2k_0\gamma_1[\lambda_i - \lambda_0 + k_0(N_0 - N_T)] + 3k_0\gamma_2[\lambda_i - \lambda_0 + k_0(N_0 - N_T)]^2 \tag{12}$$

对方程(3)两边进行积分, 并应用式(9)得到:

$$\frac{\partial\left(\int N\,\mathrm{d}z'\right)}{\partial t} = \int\left[\frac{I}{eV} - (AN + BN^2 + CN^3)\right]\mathrm{d}z' - \frac{P_1(t,0)}{A_{\mathrm{eff}}\hbar\omega_1}\left(\frac{P_1(t,z)}{P_1(t,0)} - 1\right) - \frac{P_2(t,0)}{A_{\mathrm{eff}}\hbar\omega_2}\left(\frac{P_2(t,z)}{P_2(t,0)} - 1\right) \tag{13}$$

一般情况下, 注入的探测光不含交流成份, 即 $p_2(t,0) = p_2^*(t,0) = 0$. 利用(10)式, 对方程(13)进行线性化, 得到:

$$\frac{Iz}{eV} - (AN_0 + BN_0^2 + CN_0^3)z - \frac{P_{10}}{A_{\mathrm{eff}}\hbar\omega_1}[\overline{G}_1 - 1] - \frac{P_{20}}{A_{\mathrm{eff}}\hbar\omega_2}[\overline{G}_2 - 1] = 0 \tag{14}$$

$$\int n\mathrm{d}z' = \frac{-\dfrac{p_{10}(\overline{G}_1 - 1)}{A_{\mathrm{eff}}\hbar\omega_1}}{(A + 2BN_0 + 3CN_0^2) + i\Omega + \dfrac{\Gamma A_1\overline{G}_1P_{10}}{A_{\mathrm{eff}}\hbar\omega_1} + \dfrac{\Gamma A_2\overline{G}_2P_{20}}{A_{\mathrm{eff}}\hbar\omega_2}} \tag{15}$$

$$\int n^*\mathrm{d}z' = \frac{-\dfrac{p_{10}^*(\overline{G}_1 - 1)}{A_{\mathrm{eff}}\hbar\omega_1}}{(A + 2BN_0 + 3CN_0^2) - i\Omega + \dfrac{\Gamma A_1\overline{G}_1P_{10}}{A_{\mathrm{eff}}\hbar\omega_1} + \dfrac{\Gamma A_2\overline{G}_2P_{20}}{A_{\mathrm{eff}}\hbar\omega_2}} \tag{16}$$

利用式(14)～(16)可求得经光放大器传输后, 输出的探测光为:

$$P_2(t,L) = \overline{G}_2P_{20} + \left[\Gamma A_2\overline{G}_2P_{20}\int n\mathrm{d}z\right]e^{i\Omega t} + \left[\Gamma A_2\overline{G}_2P_{20}\int n^*\mathrm{d}z\right]e^{-i\Omega t} \tag{17}$$

我们定义波长转换效率为:

$$\eta = \left|\frac{\dfrac{p_2(t,L)}{P_{2L}}}{\dfrac{p_1(t,0)}{P_{10}}}\right| = \left|\frac{-\dfrac{\Gamma A_2P_{10}(\overline{G}_1 - 1)}{A_{\mathrm{eff}}\hbar\omega_1}}{A + 2BN_0 + 3CN_0^2 + i\Omega + \dfrac{\Gamma A_1\overline{G}_1P_{10}}{A_{\mathrm{eff}}\hbar\omega_1} + \dfrac{\Gamma A_2\overline{G}_2P_{20}}{A_{\mathrm{eff}}\hbar\omega_2}}\right| \tag{18}$$

由式(17)、(18), 不难求出波长转换效率与频率响应带宽的关系, 稳态时载流子密度 N_0 可

通过数值求解(14)而获得.

3　结果分析与讨论

我们的全光波长转换器是采用 1300nm 波段的掩埋异质结半导体光放大器, 其参数如表 1 所列. 图 2 所示为在不同的光放大器驱动电流下, 归一化的波长转换效率与调制频率的关系. 耦合进入光放大器的泵浦光、探测光的连续光功率分别与 5mW 与 0.5mW. 选择泵浦

表 1　半导体光放大器的物理常数[8]

参数符号	数值	描述
A	$2.5\times10^{8}s^{-1}$	非辐射复合常数
B	$1.0\times10^{-10}cm^{3}\cdot s^{-1}$	双分子复合常数
C	$9.4\times10^{-29}cm^{6}\cdot s^{-1}$	俄歇复合常数
d	$0.15\mu m$	有源区厚度
w	$2.0\mu m$	有源区宽度
L	$500\mu m$	有源区长度
Γ	0.3	模场限制因子
N_T	$1.1\times10^{18}cm^{-3}$	透明载流子密度
a	$2.5\times10^{-16}cm^{2}$	材料增益系数
γ_1	$0.074cm^{-1}\cdot nm^{-2}$	与材料增益带宽有关的参数
γ_2	$3.155\times10^{-4}cm^{-1}\cdot nm^{-3}$	与材料增益线型对称性有关的参数
k_0	$3\times10^{-17}nm\cdot cm^{3}$	增益峰值波长漂移参数
λ_0	1380nm	透明时的峰值波长

光波长为 1.35μm、探测光波长为 1.31μm. 从图中可以看出, 3dB 的小信号响应带宽随着光放大器的驱动电流的增加而增加. 从式(18)可得, 波长转换的响应带宽是由有效载流子寿命 τ_{eff} 而决定, 即:

$$\tau_{eff}=\left(A+2BN_0+3CN_0^2+\frac{\Gamma A_1\bar{G}_1P_{10}}{A_{eff}\hbar\omega_1}+\frac{\Gamma A_2\bar{G}_2P_{20}}{A_{eff}\hbar\omega_2}\right)^{-1} \tag{19}$$

随着驱动电流的增加, 半导体光放大器中的载流子密度增大, 有效寿命减小, 因而, 频率响应宽度也增加, 然而, 由于解理面的剩余反射率的存在, 半导体光放大器的激射限制了实际的放大器驱动电流的增加. 由式(19)可知, 频率响应带宽还和连续的泵浦光及探测光功率有关. 图 3 给出不同的驱动电流下, 3dB 的带宽与注入的连续泵浦光功率的关系.

随着注入泵浦光功率的增加, 频率响应带宽逐渐增大. 当注入的泵浦光功率增大时, 抑制了半导体光放大器的激射, 使半导体光波导内光子与载流子的相互作用加剧, 加快了光波

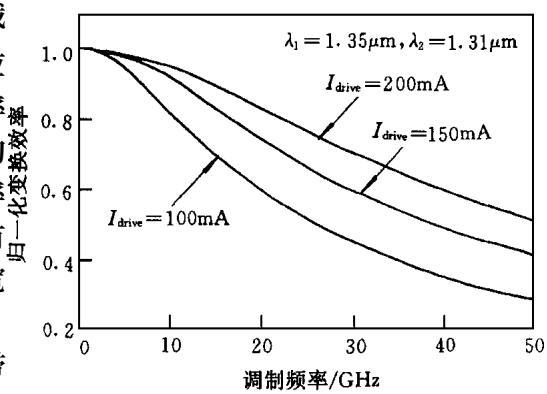

图 2　不同光放大器驱动电流下归一化波长转换效率与调制频率的关系

导内载流子恢复速率,从而提高了波长转换的频率响应速率. 从图 3 中我们发现,向上作波长转换($\Delta\lambda > 0$)的频率响应带宽比向下作波长转换($\Delta\lambda < 0$)的频率响应带宽要小. 从式(19)可以看出,频率响应带宽通过 τ_{eff}还和A_1及A_2有关,而A_1、A_2都与 λ_1、λ_2 以及 λ_0 有关. 而半导体光放大器透明时的波长 λ_0 一般比进行波长转换的两波长大,固定 λ_1 时,随着 λ_2 的增加,A_2 将减小,所以频率响应带宽也减小. 如图 4 所示,是在不同的放大器驱动电流下,3dB 频率响应带宽与注入探测光功率的关系. 随着注入半导体光放大器的探测光功率的增加,频率响应带宽增加. 交叉增益调制的波长转换是由泵浦光引起光波导内载流子消耗的同时使半导体光放大器的增益饱和而实现的,探测光在波长转换过程中必须获得光放大器的增益作用而放大. 一般情况下,注入的探测光的连续光功率远小于注入的泵浦光的连续功率,因而不致于对光放大器中的载流子的消耗及增益的降低起决定性的作用,所以,随着 P_{20}的增加,3dB 的频率响应带宽也增加. 从图中 4 中,也可以看到,上转换的频率响应带宽要比下转

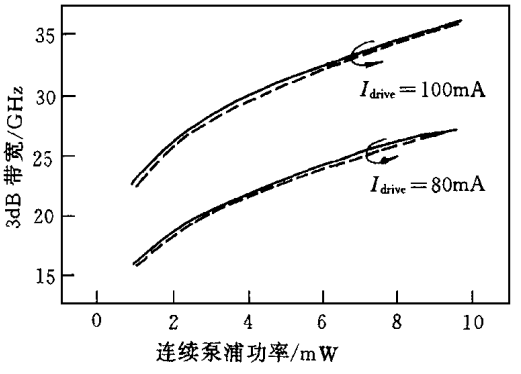

图 3 不同驱动电流下 3dB 带宽与注入连续泵浦功率的关系

P_{20}= 0.05mW, λ_1= 1.31μm, $\Delta\lambda$= ±30nm,
实线: 向下波长转换; 虚线: 向上波长转换

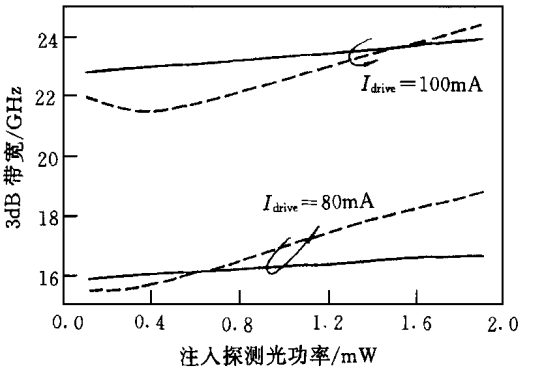

图 4 不同驱动电流下 3dB 带宽与注入探测光功率的关系

P_{10}= 1.0mW, λ_1= 1.31μm, $\Delta\lambda$= ±30nm,
实线: 向下波长转换; 虚线: 向上波长转换

换的频率响应带宽小. 但当注入的探测光功率增加到足够大时,上转换的频率响应带宽要比下转换的大. 这是由于此时探测光功率也引起了载流子明显的消耗,使得半导体光放大器增益峰值波长发生了红移,因而造成了上转换的频率响应带宽的增加. 如图 5 所示,固定探测光波长 λ_2,在不同的驱动电流下,3dB 的频率响应带宽与转换波长间隔的关系. 从图中可以发现,下转换($\Delta\lambda < 0$)的频率响应带宽比上转换($\Delta\lambda > 0$)的频率响应带宽大. 且泵浦光与探测光波长越接近时,频率响应带宽也越大. 随着电流的增大,最大值往 $\Delta\lambda$ 增加方向上漂移,这主要是由于随着注入电流的增加,半导体光放大器的增益的峰值波长将往短波方向漂移,只有当 λ_1 接近峰值波长时,才能获得大的增益及大的频率响应带宽. 如图 6 所示,固定探测光波长 λ_2,在不同的泵浦光注入功率下,3dB 的频率响应带宽与转换波长间隔的关系. 随着注入泵浦光功率增加时,3dB 频率响应带宽的最大值往 $\Delta\lambda$ 减小方向漂移. 这是由于随着注入光功率的增加,消耗了半导体光放大器内的载流子,导致半导体光放大器的增益峰值波长向长波方向移动,而当 λ_1 接近峰值波长时,才能获得大的增益及大的频率响应带宽. 在实际的光放大器的工作场合,放大器的增益峰值波长还将随环境温度变化而发生漂移,而且光场在光放大器中传输时会造成载流子的梯度变化,也会形成放大器的增益峰值波长沿光放大

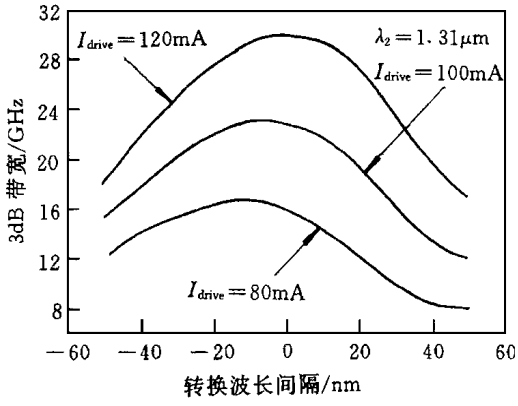

图 5　不同驱动电流下 3dB 带宽与转换波长间隔的关系

P_{10}= 1.60mW, P_{20}= 0.05mW.

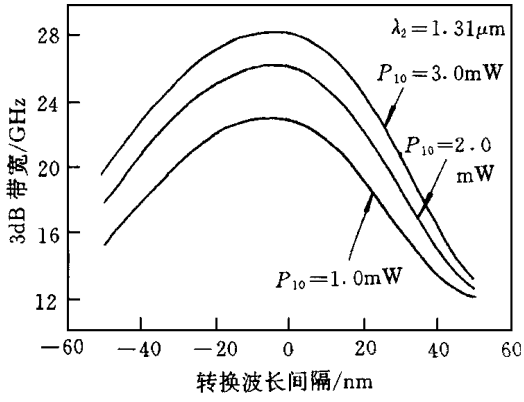

图 6　不同泵浦功率下 3dB 带宽与转换波长间隔的关系

P_{20}= 0.05mW, I_{drive}= 100mA.

器长度而波动. 这种情况较为复杂, 需将光放大器近似地分段处理, 对此, 我们将另文讨论.

4　结论

针对基于交叉增益调制的波长转换建立了小信号分析的理论模型, 并兼顾了半导体光放大器的增益线型及随着注入条件的变化引起波长的漂移. 我们发现, 半导体光放大器的载流子寿命受到光放大器内光子与载流子相互作用的强烈影响, 因而波长转换的频率响应带宽与光波导内的载流子密度、注入的光功率、增益大小以及转换波长的间隔密切相关. 波长转换的频率响应带宽随光放大器的驱动电流的增加而增大, 选择大的泵浦光功率、合适的泵浦光的波长, 有利于获得大的频率响应带宽.

参　考　文　献

[1] T. Durhuus, B. Mikkelsen, C. Joergensen *et al*, J. Lightwave Technol, 1996, **14**(6): 942～954.

[2] S. J. B. Yoo, J. Lightwave Technol, 1996, **14**(6): 955～966.

[3] E. Iannone, R. Sabella, L. de Stefano *et al*, IEEE Trans Commun., 1996, **44**(6): 716～724.

[4] J. M. Wiesenfeld, J. S. Perino, A. H. Gnauck *et al*, Electron. Lett., 1994, **30**(9): 720～721.

[5] T. Durhuus, C. Joergensen, B. Mikkelsen *et al*, IEEE Photon. Technol Lett., 1994, **6**(1): 53～55.

[6] J. Zhou, N. Park, J. W. Dawson *et al*, IEEE Photon. Technol Lett., 1994, **6**(1): 50～52.

[7] G. P. Agrawal and N. A. Olsson, J. Quantum Electron., 1989, **25**(11): 2297～2306.

[8] A. E. Willner, W. Shieh, J. Lightwave Technol, 1995, **13**(5): 771～779.

Small-Signal Analysis of Frequency Response Characteristics in All-Optical Wavelength Converter Based on Cross-Gain Modulation

Sun Junqiang, Huang Dexiu, Yi Heqing[1]

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

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

Received 6 August 1998, revised manuscript received 31 December 1998

Abstract Frequency response characteristics of all-optical wavelength conversion due to cross-gain modulation (XGM) in a semiconductor optical amplifier (SOA) are theoretically analyzed in this paper. An analytic expression is developed describing the influence of input optical parameters on frequency response characteristics of wavelength conversion. The numerical results show that the frequency response bandwidth depends on the SOA drive current, input optical power and wavelength conversion spans

PACC: 4265K, 4265G, 4255P; **EEACC**: 6150C, 6230, 6260