

半导体光放大器增益特性对四波混频波长转换效率的影响*

孙军强 张新亮 陈娟 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 本文建立了包括增益压缩、增益波动的基于半导体光放大器四波混频波长转换的理论模型。讨论了泵浦光、信号光、转换光的增益差异以及增益压缩对波长转换的影响。结果表明,处在增益峰值的泵浦光和小的增益压缩率,有助波长转换效率的提高。

PACC: 426M, 4255P, 4280S

1 引言

全光型波长转换器能使波分复用(WDM)光纤通信系统中波长获得再利用,减少所用波长的数目,避免网络节点处的波长瓶颈,能防止信息传递的阻塞^[1]。波长转换器大大地提高了波分复用系统的通信容量及其灵活性。能够实现波长转换的机理很多,主要有用半导体激光器或半导体光放大器的交叉增益调制、光纤或半导体光放大器中四波混频效应、光纤非线性环形镜或半导体光放大器的自相位调制效应等。在上述的机制中,四波混频效应受到了众多学者的极大关注。这主要是因为基于四波混频的波长转换对转换信号的速率及其调制格式是透明的,而且通过改变泵浦光的波长,可方便地实现转换波长可调。不论采用何种机制来实现波长转换,都利用了光波导的非线性。但是光纤的非线性系数远小于半导体光放大器的非线性系数,为此,需用很长的光纤来激发非线性效应,从而达到波长转换的目的。除此而外,在光纤中为了实现四波混频效应,泵浦光波长和信号光波长必须选定在光纤的零色散点附近,使波长的转换范围受到限制。半导体光放大器具有较高的非线性系数,而且光波导的色散较小,为实现四波混频效应提供了极为有利的条件。另外,半导体光放大器能在很宽的波长范围内实现较高的增益,并且各种弛豫(载流子与载流子之间的散射、载流子加热、光谱烧孔)时间较短,这些都有利于实现大范围的波长转换。依此,基于半导体光放大器四波混频效应的波长转换成为当前波长转换领域的研究热门。Geraghty 等人^[2]利用半导体光放大器四波混频效应实现了速率为 10Gb/s 的 18nm 的波长转换。Zhou 等人^[3]采用两行波半导体

* 本题目得到国家“863”基金和华中理工大学校青年基金的资助
孙军强 男, 1965 年生, 副教授, 从事全光波长转换器和光纤激光器的研究
1997-11-17 收到, 1998-02-05 定稿

光放大器串联的方法, 实现了 65nm 的波长转换 M ecozzi^[4]、Kothari^[5]和 Zhou 等人^[6]对半导体光放大器的四波混频实现波长转换的机制作了理论研究, 建立的理论模型及其解析解的求得均假设光放大器的增益是平坦的。实际上, 半导体光放大器的增益是随波长而波动的。为此, 在讨论波长转换的效率时, 应考虑泵浦光波长、信号光波长和转换光波长的各自增益的大小。

本文正是在 M ecozzi^[4]、Kothari^[5]和 Zhou^[6]的理论研究的基础上, 在考虑泵浦光波长、信号光波长和转换光波长的各自增益的大小的前提下, 讨论了转换效率跟增益波动大小之间的关系。

2 理论

利用半导体光放大器的四波混频效应来实现波长转换的基本原理可简述如下: 在光放大器的输入端同时注入光频为 ω_0 的连续泵浦光和光频为 $\omega_0 - \Omega$ 的载有信号的信号光, 如图 1 所示是参与四波混频光信号的频谱图。通常情况下, 泵浦光的功率远大于信号光的功率。这两种光在半导体有源光波导内由于受到快速的非线性效应(如载流子密度调制、载流子加热和光谱烧孔等)的影响, 产生频率为 $\omega_0 + \Omega$ 和 $\omega_0 - 2\Omega$ 的混频光。而频率为 $\omega_0 - 2\Omega$ 的光功率要远小于频率为 $\omega_0 + \Omega$ 的光功率。频率为 $\omega_0 + \Omega$ 的光从光放大器的另一端输出时已复制了信号光的信息, 但两者的相位是共轭的, 所以, 信号光所携带的信号被准确地转换到了输出的混频光(即转换光)上。此时它们之间的光波长变换了 $-\Omega\lambda_0^2/\pi c$ (λ_0 为泵浦光的波长), 我们称 $\Omega > 0$ 为向下波长转换; 反之, $\Omega < 0$ 为向上波长转换。我们假设泵浦光场、信号光场以及转换光场在半导体光放大器的光波导内仅激发 TE 基模传输, 且传输方向相同。因此, 在半导体光放大器内传输的总光场可表示为:

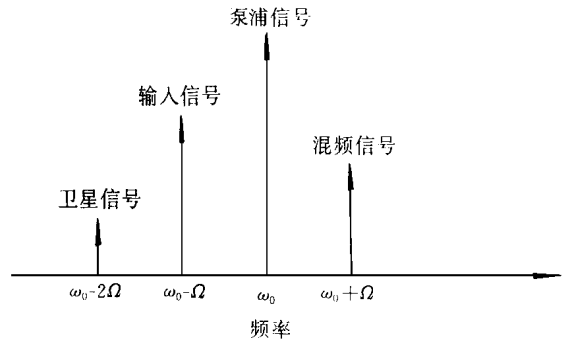


图 1 四波混频光信号的频谱图

$$\begin{aligned}
 E(z, t) = & A_1 \exp [ik_1 z - i(\omega_0 - \Omega)t] \\
 & + A_0 \exp [ik_0 z - i\omega_0 t] \\
 & + A_2 \exp [ik_2 z - i(\omega_0 + \Omega)t]
 \end{aligned} \quad (1)$$

泵浦光场、信号光场以及混频光场的振幅分别为 A_0 、 A_1 和 A_2 ; 对应的光角频率为 $\omega_0 - \Omega$ 、 ω_0 和 $\omega_0 + \Omega$ 。其波矢分别为 k_1 、 k_0 和 k_2 。我们假设 $\Delta k = 2k_0 - k_1 - k_2 = 0$, 由于半导体光波导的直线型结构和低色散的特点^[6], 作这样的假设是合理的。针对 InGaAsP 的半导体光放大器, 其增益的线型可表示为^[7]:

$$g(\lambda, z) = \frac{a(\lambda) [N(z) - N_{tr}(\lambda)]}{\left[1 + \frac{\Gamma P_i(z)}{i} \right]^{1/2}} \quad (2)$$

式中 $a(\lambda)$ 为增益系数; $N(z)$ 为参与受激跃迁的载流子数密度; $N_{tr}(\lambda)$ 为透明时的载流子

数密度; $P_i(z)$ 为波导内传输的不同光波的功率; ϵ 为增益压缩因子, 可认为对各种光波是常数(ϵ); ϵ 的数值较小($\sim 10^{-2}$ 量级). 所以, 式(2)可化为:

$$g(\lambda, z) = a(\lambda) [N(z) - N_{tr}(\lambda)] [1 - \epsilon P_i(z)] \quad (3)$$

针对不同波长的光, 获得的增益为:

$$G_i(\lambda) = \exp \left[\int_0^L g_i(\lambda, z) dz \right] \quad (i = 0, 1, 2) \quad (4)$$

式中 L 为半导体光放大器的增益区长度; $i = 0, 1, 2$ 分别对应于泵浦光、信号光和转换光. 通过求解载流子速率方程以及激光场在半导体光放大器内传输的波动方程, 可得泵浦光场、信号光场以及转换光场的耦合方程为^[6, 8, 9]:

$$\frac{dA_0}{dz} = \frac{1}{2} \left\{ (1 - i\alpha) \frac{\Gamma [1 - \mathcal{E}P(z)] g_0}{1 + P(z)/P_{sat}} - \alpha_{int} \right\} A_0 \quad (5)$$

$$\frac{dA_1}{dz} = \frac{1}{2} \left\{ (1 - i\alpha) \frac{\Gamma [1 - \mathcal{E}P(z)] g_1}{1 + P(z)/P_{sat}} \left[1 - \frac{|A_0|^2/P_{sat}}{1 + P(z)/P_{sat} - i\Omega\tau_s} \right] - \alpha_{int} \right\} A_1 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{dA_2}{dz} = & \frac{1}{2} \left\{ (1 - i\alpha) \frac{\Gamma [1 - \mathcal{E}P(z)] g_2}{1 + P(z)/P_{sat}} \left[1 - \frac{|A_0|^2/P_{sat}}{1 + P(z)/P_{sat} - i\Omega\tau_s} \right] - \alpha_{int} \right\} A_2 \\ & - \frac{1}{2} \frac{\Gamma [1 - \mathcal{E}P(z)] g_2 A_0^2}{1 + P(z)/P_{sat}} \\ & \left[\frac{1 - i\alpha}{P_{sat}} \times \frac{1}{1 + P(z)/P_{sat} - i\Omega\tau_s} + \frac{1 - i\alpha_2}{P_{s2}} \times \frac{1}{1 - i\Omega\tau_2} + \frac{1 - i\alpha_3}{P_{s3}} \times \frac{1}{1 - i\Omega\tau_3} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

式(5)~(7)中 Γ 为是模场限制因子; g_0, g_1, g_2 为对应于泵浦光、信号光以及转换光的小信号增益系数; $P(z)$ 为半导体光放大器内传输的总光功率; P_{sat} 为半导体光放大器的饱和功率; α 为线宽增强因子; α_{int} 为半导体光放大器的内部损耗系数; τ_s, τ_2, τ_3 为对应于载流子密度调制、光谱烧孔以及载流子加热的弛豫时间; P_{s2}, P_{s3} 为对应于光谱烧孔和载流子加热的饱和功率; α_2, α_3 为光谱烧孔和载流子加热的线宽增强因子. 在方程(5)~(7)的导出过程中, 唯一假设的是转换光功率远小于泵浦光、信号光的光功率. 方程(5)~(7)不仅包括了产生四波混频的载流子密度调制、光谱烧孔以及载流子加热的效应, 而且考虑了光放大器增益的饱和、增益随光波导中光功率的增加而压缩的效应以及对应于泵浦光、信号光和转换光的增益差异. (5)~(7)式的第一项包括了增益压缩、增益饱和对传输场的作用; 第三项是内部损耗对光场的影响. (6)、(7)第二项反映了泵浦光场对信号光场、转换光场的作用; 方程(6)中的最后三项体现了载流子密度调制、光谱烧孔和载流子加热对转换光的影响. 波长转换器的转换效率定义为:

$$\eta = \frac{|A_2(L)|^2}{|A_1(0)|^2} \quad (8)$$

通过求解方程(5)~(7), 才能求得转换效率跟增益波动、增益压缩之间的关系, 要严格地求解方程(5)~(7), 必须对方程(5)~(7)进行数值求解.

3 结果分析与讨论

我们利用变步长的四阶 Runge-Kutta 对方程(5)~(7)进行了数值计算, 主要讨论

了泵浦光、信号光和转换光增益的差异以及光放大器增益的压缩系数对波长转换效率的影响。在以下的计算中,有关放大器的参数选择如下^[4]:半导体光放大器增益区的长度为 $500\mu\text{m}$; 对应于泵浦光的增益系数为 115cm^{-1} ; 光波导的内部损耗系数为 10cm^{-1} ; 相当于小信号增益为 23dB ; 光波导的模场限制因子取 0.4 ; 光放大器的线宽增强因子取 4 ; 对应于光谱烧孔和载流子加热的线宽增强因子分别取 -3.6 和 -24.5 ; 光放大器的饱和功率为 10mW ; 对应于光谱烧孔和载流子加热的饱和功率分别为 0.69W 和 25.5W ; 光放大器的载流子寿命为 200ps ; 对应于光谱烧孔和载流子加热的弛豫时间分别是 650fs 和 50fs 。增益谱的压缩因子为 0.01mW^{-1} 。当注入光放大器的泵浦光功率为 2mW , 信号光功率为 $200\mu\text{W}$ 时, 图 2(a) 所示的是泵浦光处在光放大器增益谱的峰值时, 不同的信号光、转换光与泵浦光增益差情况下, 转换范围与转换效率的关系。图中表明, 当转换的跨度较小时, 两者的波长转换效率相差较小, 而在一定的转换范围 ($6\sim 50\text{GHz}$) 内, 随着转换范围的增大, 波长转换效率相差又逐渐变大, 而且增益差越大, 转换效率越高。由于泵浦光在半导体光波导的传输中的增长速率随着信号光、转换光与泵浦光之间的增益差的增大而增大, 而且转换效率与泵浦光强的平方成正比^[6], 所以, 在上述情况下, 增益差越大, 转换效率越大。图 2(b) 所示的是, 当转换光处在光放大器增益峰值, 且泵浦光、信号光的增益依次比转换光增益小 2 或 5dB 时, 转换范围与转换效率的关系。从图中可以看出, 在一定的转换范围 ($6\sim 50\text{GHz}$) 内, 增益差越大, 波长转换效率越高。在这种情况下, 转换光随着增益差的增大而变大, 因而根据转换效率的定义 (8) 式, 波长转换效率也更大。如图 2(c) 所示, 信号光处在增益峰值, 泵浦光、转换光

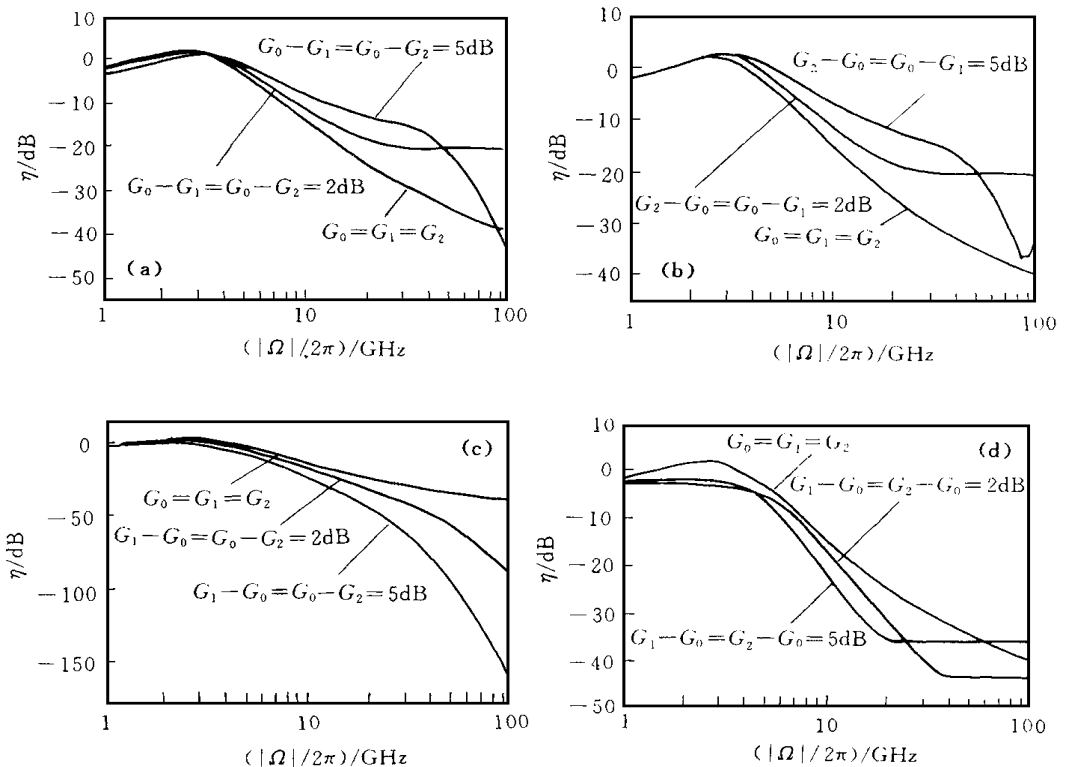


图 2 不同泵浦光、信号光和转换光的增益差时, 转换范围与转换效率的关系

的增益依次比信号光的增益小 2 或 5dB 时, 转换范围与转换效率的关系 图示表明, 增益差越大, 波长转换效率越小 此时, 信号光随着增益差的增大而变大, 相对而言, 泵浦光、转换光的生长将减小, 因而根据转换效率的定义(8)式, 波长转换效率也更小 极有可能转换光被抑制, 得到转换的光信号的光频却是 $\omega - 2\Omega$ 的光 图 2(d) 所示是泵浦光处在增益谱的低谷, 而信号光、转换光都比泵浦光高 2 或 5dB 时的情况 图示表明, 随着增益差的增加, 转换效率减少 这主要是由于低的泵浦光增益、大的信号光的生长速率的共同作用, 导致转换效率的降低 在给定的信号光功率($20\mu\text{W}$)下, 不同的泵浦光功率下, 波长转换效率与光放大器增益压缩系数的关系, 如图 3 所示 此时忽略增益差的影响 从图中可以看出, 转换效率存在着最大值, 而且最大值对应于 ϵ 的位置随着注入泵浦光功率大小的而变化, 并且随着增益压缩系数的增大, 波长转换效率逐渐减少 在确定的泵浦功率($200\mu\text{W}$)下, 不同的信号光功率下, 波长转换效率与增益压缩系数的关系, 如图 4 所示 波长转换效率也存在着一个最大值, 且随着注入信号光功率大小的变化, 最大值的位置也几乎不变, 而且随着增益压缩系数的增大, 波长转换效率逐渐减小 注入的信号光功率越大, 波长转换效率越小 综上分析, 要获得大的转换效率, 放大器的增益谱应较平坦, 且泵浦波长应选定在增益峰值处, 还应尽可能使在半导体光波导内的总功率较小, 避免由于增益压缩导致的转换效率的降低

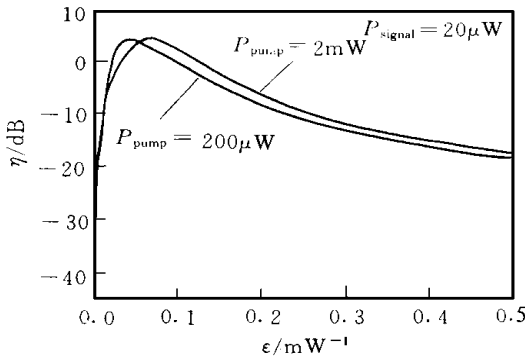


图 3 信号光功率锁定不同泵浦光功率时波长转换效率与光放大器增益压缩系数的关系

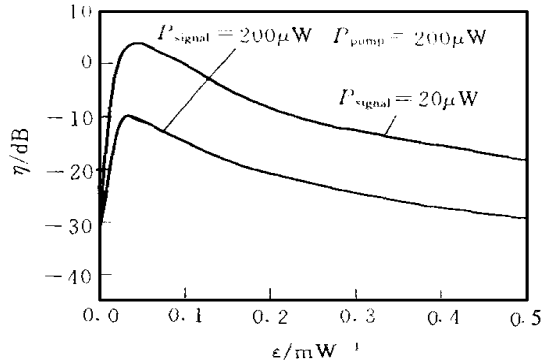


图 4 泵浦光功率恒定不同信号光功率时波长转换效率与光放大器增益压缩系数的关系

4 结论

本文根据半导体光放大器增益随光波长波动的特点, 建立了包括增益压缩以及增益大小随泵浦光、信号光和转换光波动的基于四波混频波长转换的理论模型 讨论了波长转换效率跟增益压缩、增益波动的关系 结果表明, 处在增益峰值的泵浦光和小增益压缩率, 有助于波长转换效率的提高 因此, 在选择半导体作波长转换器时, 不仅要优化半导体光放大器的参数, 在保证放大器增益平坦的前提下, 泵浦光的波长应选在增益峰值处

参 考 文 献

[1] S. J. B. Yoo, J. Lightwave Technol., 1996, 14(6): 955~ 966
 [2] D. F. Geraghty, R. B. Lee, K. J. Vahala *et al.*, IEEE Photo. Technol. Lett., 1997, 9(4): 452~ 454

- [3] Jianhui Zhou, N. Park, K. J. Vahala *et al* , IEEE Photon Technol Lett , 1994, **6**(8): 984~ 987.
- [4] A. Mecozzi, Opt Lett , 1994, **19**(12): 892~ 894
- [5] N. C. Kothari, D. J. Blumenthal, IEEE J. Quantum Electron , 1996, **32**(10): 1810~ 1816
- [6] Jianhui Zhou, N. Park, J. W. Dawson *et al* , IEEE Photon Technol Lett , 1994, **6**(1): 50~ 52
- [7] J. H. Chen, F. S. Choa, P. S. Cho *et al* , IEEE Photon Technol Lett , 1997, **9**(6): 755~ 757.
- [8] G. P. Agrawal, J. Opt Soc Am. B, 1988, **5**(1): 147~ 159.
- [9] A. U skov, J. Mork, J. M ark, IEEE J. Quantum Electron , 1994, **30**(8): 1769~ 1781.

Effects of Gain Characteristics on Wavelength Conversion Efficiency Based on Four-Wave Mixing in Semiconductor Optical Amplifier

Sun Junqiang, Zhang Xinliang, Chen Juan, Huang Dexiu, Yi Heqing¹

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

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

Received 17 November 1997, revised manuscript received 5 February 1998

Abstract A theoretical model including gain compression and gain ripples to calculate the wavelength conversion efficiency is established based on four-wave mixing (FWM) in a semiconductor optical amplifier (SOA) in this paper. The influence of gain differences among the pump, signal and converted light wavelengths, and gain compression on the conversion efficiency are discussed. The results show that the pump light positioned at the gain peak and the lower gain compression ratio have the advantage for increasing the wavelength conversion efficiency.

PACC: 4265M, 4255P, 4280S