

文章编号: 0258-7025(2001)06-0545-04

基于 SOA 的 XGM 全光波长变换光信号 啁啾效应分析*

冯建和 纪越峰 陈树强 管克俭

(北京邮电大学 125 信箱, BUPT-ZTE 联合实验室 北京 100876)

提要 对于基于半导体光放大器(SOA)交叉增益调制效应(XGM)的全光波长变换(AOWC)由于相位调制引起的变换光啁啾特性进行了系统分析,模拟了信号光功率、信号光脉宽、抽运电流和探测光功率对于变换光啁啾的影响,且变换光啁啾存在着码字序列依赖性。

关键词 密集波分复用,全光波长变换,交叉增益调制,半导体光放大器,啁啾

中图分类号 TN 929.11 文献标识码 A

Converted Signal Chirp of All-optical-wavelength-converters Based on Cross-gain Modulation in SOA Caused by Phase Modulated

FENG Jian-he JI Yue-feng CHEN Shu-qiang GUAN Ke-jian

(Beijing University of Posts and Telecommunications, P. O. Box 125, BUPT-ZTE LAB, Beijing 100876)

Abstract According to the simplified system model, the converted signal chirp of all optical wavelength converter based on cross-gain modulation in semiconductor optical amplifier is explored in detail. The influence of the signal power, probe power, signal pulse width and pump current on the chirp is simulated. The chirp dependence on the signal pattern is analyzed.

Key words DWDM, all optical wavelength converters, XGM, SOA, chirp

1 引言

基于密集波分复用(DWDM)系统的全光网络将成为现代光通信系统的发展方向,由于通信波长资源有限,全光波长变换(AOWC)在全光网络中将成为不可缺少的关键功能之一^[1~3],其中基于半导体光放大器(SOA)的波长变换最具有应用前景。我们在文献[4]中报道了采用量子阱材料 SOA 交叉增益调制效应(XGM)进行了归零码脉宽 $t_p = 46$ ps 的 AOWC 的实验,变换光脉冲将会展宽。XGM 结构简单,易于实现,而且在 20 nm 范围内,任意信号光和探测光的波长变换其信噪比(SNR)劣化不大于 3 dB^[5],但是,基于 XGM 的 AOWC 在未来的应用中还存在着诸如变换光啁啾等问题,这种啁啾主要是由

于信号光对变换光存在较大的相位调制造成的,变换光信号啁啾将会引起传输中码形畸变,使误码率提高。对基于 SOA 非线性效应 XGM 的 AOWC 人们已经作过较多的理论研究,文献[6]考虑了线宽增强因子变化对变换光啁啾的影响。在实验中发现,即使是信号光被 SOA 放大,信号光也存在着较大的啁啾,与文献[7]分析一致。文献[7]分析了注入单一光信号较窄光脉冲($t_p < 50$ ps)情况下,相位调制引起的 SOA 输出信号光啁啾特性。本文采用文献[7]的分析方法,较为详细地分析了 XGM 变换光由于相位调制引起的啁啾效应,分析表明变换光存在着较大的啁啾效应。

2 XGM 波长变换系统理论分析

对基于 SOA 非线性效应 XGM 的 AOWC 分析,普遍采用 SOA 为简单的两能级系统^[6~9],假定脉冲持续时间即脉冲宽度 t_p 远大于 SOA 带内弛豫时间 τ_{in} (intra-band relaxation time 典型值为小于 0.1

* 国家 863 高科技项目(编号:863-300-01-02-99,863-317-01-05-99)国家自然科学基金(编号:69772034)和原邮电部重点科研基金资助课题。

收稿日期 2000-04-07;收到修改稿日期 2000-05-22

ps}^{71}。AOWC 系统原理见文献 [6] 功率为 P_s 波长为 λ_s 的信号光和功率为 P_{cw} 波长为 λ_{cw} 的探测光同时注入 SOA 较强的信号光调制 SOA 使其增益饱和或增益恢复 较弱的探测光由于 SOA 增益变化而受到信号光的调制。SOA 载流子变化与注入 SOA 光信号功率变化的关系满足速率方程 [6,7,9]

$$\frac{\partial N(z,t)}{\partial t} = \frac{I}{eV} - \frac{N(z,t)}{\tau_e} - \sum_{i=1,2} \frac{P_i(z,t)\Gamma a [N(z,t) - N_t]}{h_0 \nu_i A} \quad (1)$$

其中 I 为注入 SOA 的抽运电流, e 为电子电荷, V 为 SOA 有源区体积, τ_e 为 SOA 载流子自发辐射复合寿命, Γ 为 SOA 模场限制因子, a 为增益因子, N_t 为 SOA 透明传输载流子数, h_0 为 Plank 常数, $i = 1, 2$ 分别代表信号光和探测光, 在 SOA 中沿长度 z 方向的信号光和探测光信号功率为 $P_i(z,t)$, $i = 1, 2$, ν_i 为注入信号光和探测光光子频率, A 为 SOA 有源区端面面积。注入 SOA 光信号功率沿 SOA 的 z 轴方向传播变化满足

$$\frac{\partial P_i(z,t)}{\partial z} = P_i(z,t)\Gamma a [N(z,t) - N_t] - \alpha_D P_i(z,t) \quad (2)$$

其中 α_D 为 SOA 的损耗系数, 为简化分析, 假定 α_D 可以忽略。

方程 (1) (2) 沿 SOA 长度轴积分之后, 把 SOA 看为一点, 可得到变换光输出

$$P_{out}(t) = P_{cw}(t)G_{cw}(t) \quad (3)$$

$$\varphi_{out}(t) = \varphi_{in}(t) - \frac{1}{2}ah(t) \quad (4)$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{g_0 L - h}{\tau_e} - \left[\frac{P_{cw}}{E_{sat,1}} + \frac{P_s(t)}{E_{sat,2}} \right] [\exp(h) - 1] \quad (5)$$

其中, SOA 增益 $G_{cw}(t) = \exp[h(t)]$, $h(t)$ 为功率增益函数因子, $P_s(t)$ 为输入信号光瞬时功率, $\varphi_{out}(t)$, $\varphi_{in}(t)$ 分别为变换光相位和信号光初始相位, a 为线宽增强因子。信号光和探测光的饱和能量对应为 $E_{sat,i} = h\nu_i\sigma/a$, $\sigma = A/\Gamma$, $i = 1, 2$ 。

3 相位调制引起变换光脉冲啁啾

XGM 变换光啁啾是指变换光脉冲相位随时间变化, 引起其中心频率与两侧有随时间变化的频率变化, 其值为 $\delta\alpha(t) = -\frac{d\varphi}{dt}$, 假定信号光为零啁啾, 图 1 为信号光脉冲 $P_s(t) = P_s \exp\left(-\frac{t^2}{t_p^2}\right)$ 为高斯形

(实线)和 $P_s(t) = P_s \exp\left(-\frac{t^{2m}}{t_p^{2m}}\right)$ (虚线 $m = 3$) 超高斯形对应的变换光啁啾效应, 对应脉冲期间变换光啁啾为负值, 信号光脉冲过后变换光后沿对应啁啾为正值, 这是由于脉冲期间 SOA 增益急剧变化和脉冲过后增益逐渐恢复的结果, SOA 载流子恢复时间 [9] 取 $t_e = 280$ ps。对于超高斯脉冲, 由于脉冲前后沿较陡峭, 使变换光出现较大的啁啾, 其脉冲后沿的影响也引起较大的正啁啾, 脉冲过后的啁啾变化和高斯脉冲过后的影响一致。事实上, 当高斯脉冲较窄时, 变换光啁啾效应与超高斯脉冲的影响效果是一样的。本文分析的信号光主要采用高斯脉冲, 图 2 为高斯信号光脉冲 ($t_p = 46$ ps) 变换光脉冲和变换光啁啾的波长变换过程, 从图 2(a) 看出, 变换光脉冲与信号光脉冲反相, 且变换光脉冲最小值处于信号光脉冲下降沿。显然, 信号光脉冲前沿对应 SOA 增益被压缩, 信号光脉冲后沿对应其增益压缩到最小值后逐渐恢复, 增益压缩到最小值时, 对应信号光后沿 [4,10]。图 2(b) 为信号光和变换光啁啾在变换过程中的关系, 变换光脉冲前沿对应啁啾为负值, 变换光后沿对应啁啾为正值。

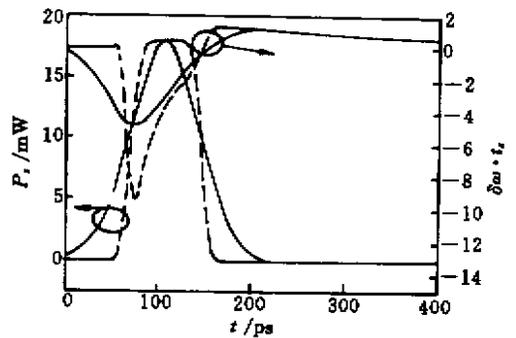


图 1 高斯脉冲(实线)和超高斯脉冲(虚线)及其对应的变换光啁啾特性曲线, $t_p = 46$ ps

Fig. 1 Gauss pulse (solid line) and super-Gauss pulse (dashed line) and their converted signal chips at $t_p = 46$ ps

数值解方程 (4) (5), 可以得出变换光啁啾与信号光功率、信号光脉冲宽度及抽运电流的关系, 图 3 示出信号光脉冲宽度为 $t_p = 46$ ps, 信号光功率等于饱和功率 ($P_s = P_{sat}$) 时, 变换光啁啾的变化。从图

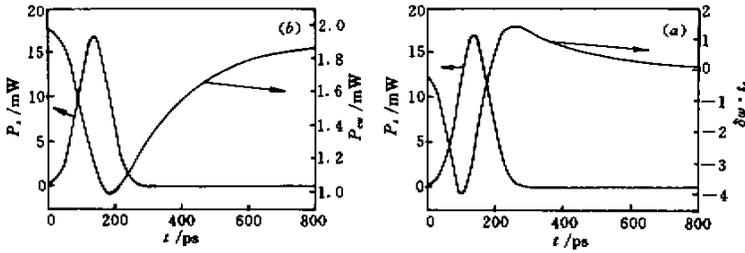


图 2 高斯脉冲在波长变换过程中的动态变化 ($t_p = 46 \text{ ps}$)

(a) 信号光脉冲对应变换光脉冲 (b) 变换光脉冲对应变换光啁啾

Fig.2 Gauss pulse dynamic converting process during AOWC at $t_p = 46 \text{ ps}$

(a) The converted signal pulse and its Gauss signal pulse ; (b) the converted signal chip and its signal pulse

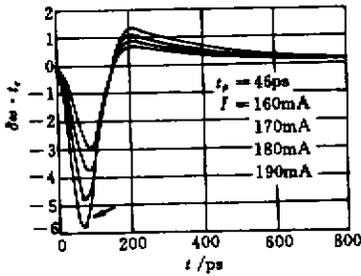


图 3 变换光啁啾与 SOA 增益的变化关系 , 箭头所指为 $I = 190 \text{ mA}$

Fig.3 Converted chirp for different pump current

$I = 160, 170, 180, 190 \text{ mA}$. Arrow to $I = 190 \text{ mA}$

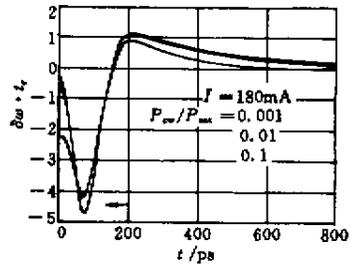


图 4 变换光啁啾特性曲线与探测光功率变化关系 , 箭头所指为 $P_{cw}/P_{sat} = 0.1$

Fig.4 Converted chirp for different CW power $P_{cw}/P_{sat} = 0.001, 0.01, 0.1$ at $I = 180 \text{ mA}$. Arrow to $P_{cw}/P_{sat} = 0.1$

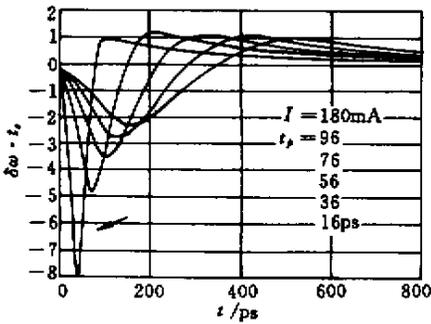


图 5 变换光啁啾与信号光脉冲宽度的变化关系 , 箭头所指为 $t_p = 16 \text{ ps}$

Fig.5 Converted signal chirp for different signal pulse width $t_p = 16, 36, \dots, 96 \text{ ps}$. Arrow to $t_p = 16 \text{ ps}$

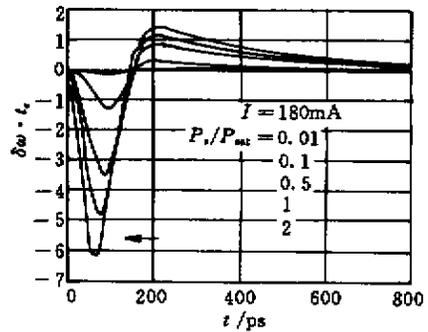


图 6 变换光啁啾与信号光功率的变化关系 , 箭头所指为 $P_s/P_{sat} = 2$

Fig.6 Converted signal chirp for different signal power $P_s/P_{sat} = 0.01, 0.1, 0.5, 1, 2$. Arrow to $P_s/P_{sat} = 2$

中可见变换光存在随时间而变化的啁啾, 对应变换光脉冲前沿为负啁啾, 脉冲后沿为正啁啾。变换光脉冲前沿负啁啾对应信号光脉冲期间的 SOA 增益压缩, 变换光后沿正啁啾对应信号光脉冲之后的 SOA 增益恢复。XGM 的这种变换光啁啾效应会引起传输中脉冲蓝移和红移的走离效应, 即引起码形

展宽(对应光纤正常色散区)或压缩(对应光纤反常色散区)。其中, 抽运电流较小时, 相应的啁啾特性曲线变化最小。图 4 为抽运电流 $I = 180 \text{ mA}$ 时, 探测光功率变化对变换光啁啾效应的影响, 由于 P_{cw} 较小, 其变化对变换光啁啾影响非常小, 当 P_{cw} 较大时, 能够减小变换光啁啾效应, 但是, 这种影响也是

很小的。模拟显示当探测光功率增加其啁啾效应变化较小这一结论与文献 [6] 一致。图 5 为变换光啁啾与信号光脉冲宽度的变化关系,模拟显示变换光啁啾随信号光脉冲宽度的增加而减小,抽运电流 $I = 180 \text{ mA}$,图中分别对应信号光脉冲宽度 $t_p = 16, 36, 56, 76, 96 \text{ ps}$ 情况下啁啾特性曲线变化从大到小,当信号光码速较低、脉冲宽度较宽时,变换光啁啾可以很小,而在码速较高的情况下,采用 XGM 的 AOWC 变换光将有较大的啁啾。图 6 为变换光啁啾随信号光注入功率大小而变化的关系,其中, $t_p = 46 \text{ ps}, I = 180 \text{ mA}$ 。当信号光功率增加,变换光啁啾增大,其中, $P_s/P_{\text{sat}} = 0.01$ 时,啁啾在脉冲期间的变化最小。

4 变换光脉冲啁啾的码字序列依赖性

考虑信号光为高斯脉冲,码字序列为“11010100011”,宽度 $t_p = 46 \text{ ps}$,码速 2.5 Gbit/s ,图 7 为信号光功率等于饱和功率 ($P_s = P_{\text{sat}}$) 时 AOWC 的动态图示, (a) 为信号光与变换光的对应关系, (b) 为信号光与变换光啁啾的对应关系。模拟结果表明信号光脉冲连零时,由于 SOA 增益有限恢复,变换光脉冲序列和变换光啁啾显示出与信号光码字序列的相关性。变换光啁啾表现为:对应信号光脉冲前沿,当连“1”码时,第二个“1”码负啁啾减小,连“0”码之后,“1”码脉冲前沿会有较大的啁啾,对应变换光脉冲后沿啁啾基本一致。从图 7 中可见变换光存在着很大的啁啾变化,脉冲前沿同样为负啁啾,脉

冲后沿为正啁啾。从前面分析可以得出,在变换光前沿,啁啾为负值,后沿为正值,啁啾在脉冲前后沿为不对称分布。如果考虑变换光消光比、信噪比和变换光效率^[5],优化设计 AOWC,则必然存在着较大的啁啾(参见文献 [10])。

变换光啁啾效应将成为 XGM 应用的主要障碍之一,为了能在未来的全光网络中应用 XGM 的 AOWC,对于这一方案的变换光必须考虑消啁啾影响^[11]。

参 考 文 献

- 1 S. J. B. Yoo. Wavelength conversion technologies for WDM network applications. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6): 955 ~ 966
- 2 Terji Durhuus, Benny Mikkelsen, Carsten Joergensen *et al.*. All-Optical wavelength conversion by semiconductor optical amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6): 942 ~ 954
- 3 Mehdi Asghari, Ian H. White, Richard V. Pentyl. Wavelength conversion using semiconductor optical amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(7): 1181 ~ 1190
- 4 Qiao Yaojun, Yu Jianjun, Chi Nan *et al.*. All optical wavelength conversion for 2.5 Gb/s return-to-zero optical pulse based on cross-gain modulation in SOA. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 1999, **28**(6): 517 ~ 521 (in Chinese)
- 5 Alan E. Willner, William Shieh. Optical spectral and power parameters for all-optical wavelength shifting: single, stage fanout and cascability. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(5): 771 ~ 781
- 6 Zheng Xueyan, Guan Kejian, Ye Peida. Chirp characteristics of a wavelength converter based on XGM in semiconductor optical amplifier. *Acta Electronica Sinica* (电子学报), 1998, **26**(11): 69 ~ 72 (in Chinese)
- 7 Govind P. Agrawal, N. Anders Olsson. Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifiers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25**(11): 2297 ~ 2306
- 8 Kristof Obermann, Stephan Kindt, Dirk Breuer *et al.*. Performance analysis of wavelength converters based on cross-gain modulation in semiconductor-optical amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(1): 78 ~ 85
- 9 Dominique Marcenac, Antonio Mecozzi. Switches and frequency converters based on cross-gain modulation in semiconductor optical amplifiers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(6): 749 ~ 751
- 10 Feng Jianhe, Chen Shuqiang, Guan Kejian. Performance analysis and optimum of all optical wavelength converters based on cross-gain modulation in semiconductor optical amplifier. *Study on Opt. Comm.* (光通信研究), 2000, **100**(4): 1621 (in Chinese)
- 11 Hsiao-Yun Yu, Daniel Mahgerefteh, Pak S. Cho *et al.*. Improved transmission of chirped signals from semiconductor optical devices by pulse reshaping using a fiber Bragg grating filter. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(5): 898 ~ 903

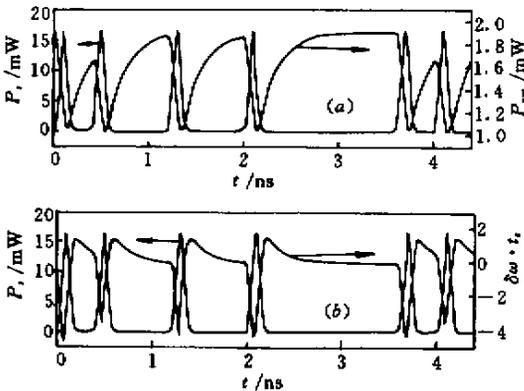


图 7 变换光啁啾与信号光码字序列的变化关系,码字序列为 11010100011

Fig.7 Converted signal chirp to signal sequences 11010100011

- (a) Gauss pulses sequences and the converted pulses;
- (b) Converted pulse sequences and its converted signal chirp