

基于 SOA 的交叉增益调制中探测光能量的数值分析

刘 超 金潮渊 黄永箴 祝宁华

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要: 将 Connelly 提出的 SOA 稳态模型和 Durhuus 提出的动态数值方法结合起来,分析了交叉增益调制过程中连续探测光的输入能量对转换信号的影响. 模拟结果表明,当连续探测光的输入能量较小时,转换信号的消光比较大,而且半高全宽不变.

关键词: 半导体光放大器; 波长转换; 交叉增益调制

EEACC: 2550X; 4340G; 6260M

中图分类号: TN722 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2005)04-0812-04

1 引言

波长转换器是 WDM 光网络中的关键元件,通过它不仅可以减少发生在光交叉连接节点处的阻塞,还能实现波长的再利用,充分发挥 WDM 光网络的带宽资源优势. 在所有的波长转换器中,基于 SOA 的饱和非线性效应的全光波长转换器,具有响应速度快、频率转换范围大、结构紧凑和易于集成等优点,在 WDM 系统中具有较好的应用前景. 目前基于 SOA 的波长转换技术主要有:四波混频(FWM)、交叉增益调制(XGM)和交叉相位调制(XPM)三种. 其中四波混频技术的转换效率低而且输入光束需要偏振匹配^[1];交叉相位调制需将 SOA 放在干涉结构中,由于干涉仪对功率敏感,导致输入光功率的动态范围小^[2];相比较而言交叉增益调制实现波长转换的技术具有结构简单、易于操作和转换效率高的特点,成为当前人们研究的热点^[3,4].

目前已有关于 SOA 交叉增益调制的噪声^[5]和增益恢复特性^[6]的研究,而关于脉冲信号光和连续探测光的输入能量对转换信号质量影响的研究却很少见. 一些关于超短脉冲注入 SOA 产生的自相位调制(SPM)的研究^[7]指出,在能量达到饱和的前提下,注入脉冲信号光的能量增加,虽然可以增大转换

信号的消光比,但随着器件的饱和程度加深,脉冲会明显展宽,产生码型失真. 交叉增益调制中连续探测光的输入能量通常选择在增益为常数的非饱和小信号区,关于其能量值的改变对转换信号的性能,如消光比和半高全宽(FWHM)的影响至今却未见详细报道. 本文将 Connelly 提出的 SOA 稳态工作模型^[8]和 Durhuus 提出的动态工作模型^[10]结合起来,通过研究交叉增益调制中载流子的密度分布,分析了在交叉增益调制中连续探测光的输入能量对转换信号质量的影响.

2 理论模型

2.1 工作原理

将波长为 λ_1 的强度调制脉冲信号光和波长为 λ_2 的连续探测光同时入射到 SOA 中,其中脉冲信号光的光强大于器件的饱和输入能量. SOA 饱和工作时会产生非线性效应,因此其增益将受到脉冲信号光强度的调制,即当信号光强度增加时,SOA 的增益减小;反之,SOA 的增益变大. 由于连续探测光的强度也会受到同样增益的调制,所以输出 SOA 探测光即转换信号就会携带强度调制输入脉冲信号的信息,只是它的相位与脉冲信号光相反.

图 1 为通过 SOA 实现交叉增益调制的示意图.

脉冲信号光和连续探测信号光通过偏振控制器分别注入到耦合器的两个输入臂,耦合后一同输入到 SOA 中,SOA 输出的光信号再通过带通滤波器 (BPF),滤去波长为 λ_1 的脉冲信号输出光和带通波长以外的放大自发发射 (ASE) 噪声光,处理后的转换信号光输入到光谱分析仪进行分析。

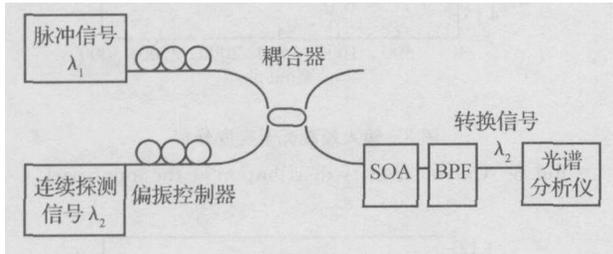


图 1 交叉增益调制示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cross-gain modulation

2. 2 理论模型

由于 SOA 的增益系数与载流子的密度分布密切相关,而载流子的密度分布又受到光场分布的调制,因此,SOA 的增益分布同载流子和光场分布一样具有空间相关性.为了精确地分析波长转换过程中增益的变化,我们将 SOA 进行分段处理.首先分析各小段间载流子密度和光子密度的相互作用。

当考虑只有连续探测光输入时,SOA 的速率方程可表达为^[6]：

$$\frac{dn(z)}{dt} = \frac{1}{edWL} - R(n(z)) - \frac{1}{dW} \{ g_m(, n(z)) (N_s^+(z) + N_s^-(z)) \} - \frac{2}{dW} \{ g_m(j, n(z)) (N_j^+(z) + N_j^-(z)) \} \quad (1)$$

式中 $n(z)$ 为载流子沿光传播方向的分布; g_m 为材料增益系数; N_s^+ 和 N_s^- 表示连续探测光场; N_j^+ 和 N_j^- 表示自发发射光子数,其他变量描述见表 1. (1) 式右侧第 1 项是由电流注入增加的载流子密度,第 2,3,4 项分别代表复合(包括辐射复合和非辐射复合)、连续探测光产生的受激辐射和放大自发发射光产生的受激辐射消耗的载流子密度.在稳态情况下, $\frac{dn(z)}{dt} = 0$,而且探测光场和自发发射光场的变化符合耦合差分方程^[8]：

$$\frac{d\sqrt{N_s^\pm(z)}}{dz} = (\mp j \pm \frac{1}{2} (g_m(, n) - (n))) \quad (2)$$

$$\frac{d\sqrt{N_j^\pm(z)}}{dz} = \pm (g_m(j, n) - (n)) + R_{sp}(j, n) \quad (3)$$

式中 β 为传播常数; α 为材料损耗系数; R_{sp} 为放大自发辐射 (ASE) 耦合到信号受激辐射中所占的比例系数.将方程 (2), (3) 的信号光和自发发射光场的表达式代入速率方程 (1),就可以数值求解出 SOA 各小段内的光场(包括连续探测光和 ASE 噪声)分布、载流子密度分布和增益分布。

表 1 SOA 参数值表

Table 1 Parameters of SOA

参数	符号	数值
偏置电流	I / mA	200
有源区长度	L / μm	600
有源区宽度	W / μm	0.4
有源区厚度	d / μm	0.4
端面折射率	R_1, R_2	1×10^{-4}
限制因子		0.45
有源区折射率	n	3.22

本文选择高斯光束作为产生交叉增益调制的脉冲信号光.将稳态条件下的载流子分布和增益分布作为交叉增益调制的初始条件.在此基础上分析与脉冲信号光一起传播的电磁场包络的幅度和相位变化^[10].SOA 增益的动态变化可由下式表示^[11]：

$$\frac{\partial g}{\partial t} = \frac{g_0 - g}{\tau_c} - \frac{g |A|^2}{E_{sat}} \quad (4)$$

式中 A 为电磁场包络; g_0 为 SOA 的小信号增益; τ_c 为自发辐射寿命; E_{sat} 为输入信号的饱和能量,其定义为：

$$E_{sat} = \frac{\hbar \omega_0 dW}{a} \quad (5)$$

式中 ω_0 为角频率.可以看出 E_{sat} 由 SOA 的结构参数决定。

2. 3 器件及模拟参数

本文描述的 SOA 器件结构参数可参见文献 [8],具体参数值列于表 1 中. SOA 的有源区为增益峰值波长为 $1.55\mu\text{m}$ 的 ($\text{In}_{0.58}\text{Ga}_{0.42}$) ($\text{As}_{0.89}\text{P}_{0.11}$) 体材料的掩埋条形结构. SOA 的偏置注入电流为 200mA,高斯脉冲信号光和连续探测光的波长分别为: $\lambda_1 = 1.55\mu\text{m}$ 和 $\lambda_2 = 1.6\mu\text{m}$,高斯脉冲信号光的 FWHM 为 160ps,由于其大小与器件的载流子自发辐射寿命相似,可以认为载流子密度服从 Fermi-Dirac 分布,忽略了载流子加热和光谱烧孔效应的影

响^[9].

将表 1 所示的参数值代入 (5) 式, 可得 E_{sat} 2pJ. 为了避免由于探测光的注入对 SOA 的增益产生影响, 选择连续探测光的能量位于小信号区. 本文数值模拟选用的探测光的输入能量与饱和输入能量的比值分别为: 0.05, 0.1 和 0.2. 为了实现波长转换, 脉冲信号的输入功率必须使 SOA 处于饱和状态, 选择其输入功率为 1mW. 在进行数值模拟时, 为保证计算精度, 将 SOA 等比例分成 100 小段.

3 数值模拟结果

3.1 载流子密度的变化

只有一束连续探测光输入时, 沿 SOA 光束传播方向的载流子密度分布如图 2 所示. 从图中可以看出, 当探测光的输入能量与器件的饱和能量之比逐渐增加时, 载流子密度分布向器件的入射端移动. 当脉冲信号光注入后, SOA 中的稳态载流子密度分

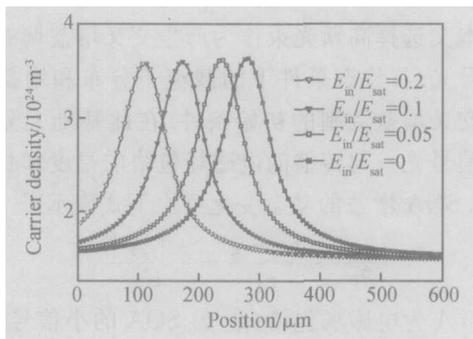


图 2 载流子密度分布随连续探测信号光输入能量的变化
Fig. 2 Carrier density distributions at various input energy of continuous probe light

布将受到信号脉冲包络的调制, 随时间和空间变化. 图 3 和图 4 分别表示 SOA 的输入端和输出端的载流子密度分布随时间的变化. 从图 3 可以看出在 SOA 的输入端, 载流子密度先减小后增大, 最后恢复到稳态值. 载流子密度的减小是由输入的饱和脉冲信号大量消耗载流子引起的, 而载流子密度的恢复过程中出现小的过冲则是由反向 ASE 谱强度小于其稳态值造成的^[6]. 随着脉冲包络向输出端移动, 器件的饱和程度逐渐加深, 载流子消耗越来越严重. 从图 4 可看出输出端的载流子消耗比输入端严重得多, 而且载流子密度恢复到稳态的时间也明显变长. 由于 SOA 的材料增益与载流子密度分布近似成正比^[12], 所以 SOA 增益也受到了类似的调制.

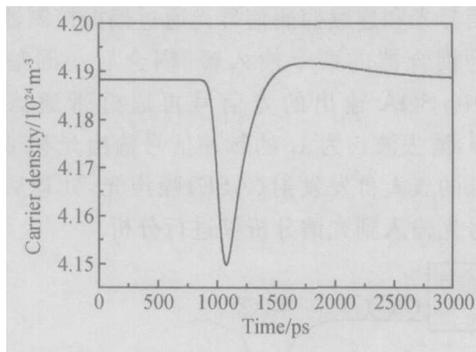


图 3 输入端载流子密度分布

Fig. 3 Carrier density distribution at the input port

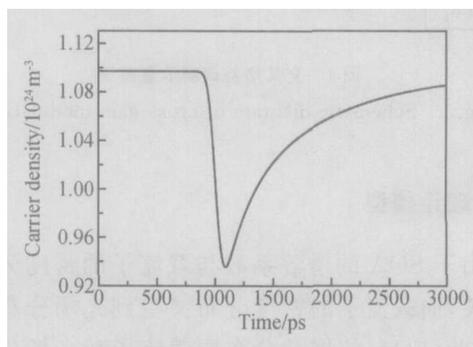


图 4 输出端载流子密度分布

Fig. 4 Carrier density distribution at the output port

3.2 转换信号的变化

为了方便分析连续探测光的输入能量对输出的转换信号的影响, 本文将每种情况的转换信号进行归一化处理, 即分别与各自稳态时的光强相除, 这种处理不会改变转换信号的消光比和 FWHM. 图 5 为当连续探测光的输入能量与器件的饱和能量之比分别为 0.05, 0.1 和 0.2 时, 转换信号的变化. 在这三种情况下随着探测光输入能量的增加, 转换信号的消光比逐渐变小, 分别为 8.64, 7.62 和 6.38dB; 而

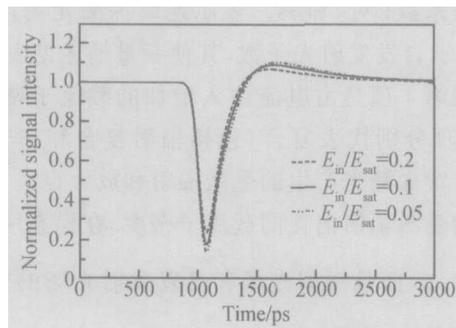


图 5 转换信号随不同的连续探测信号光输入能量的变化
Fig. 5 Conversion signals at various input energy of continuous probe light

FWHM 虽然都比入射脉冲信号的光大,但它们之间的差别却很小(小于 10ps)。由此可见,连续探测光的输入能量越小,交叉增益调制的效果就越理想。

从图 5 还可以看出,当探测光较小时,转换信号在恢复到稳态的过程中出现了较小的过冲,这是由图 3 所示的载流子密度的过冲造成的。另外值得一提的是,当有光注入时 SOA 的峰值增益波长向短波长移动,如果选择转换信号的波长小于脉冲信号的波长,转换信号质量会有所改善。

4 结论

本文将 Connelly 提出的 SOA 稳态模型和 Durhuus 提出的动态方法结合起来分析光场和载流子密度分布的变化,研究了利用 SOA 实现交叉增益调制时不同探测光的输入能量对输出转换信号的影响。数值分析结果表明,在输出转换信号的能量满足探测器或光谱仪的探测灵敏度的前提下,交叉增益调制中探测光的输入能量越小,转换信号的消光比越大,而 FWHM 宽几乎不变。该结果对于利用交叉增益调制实现的波长转换实验的连续探测光能量的选择具有参考价值。

参考文献

[1] Nasset D, Kelly T, Marcenac D. All-optical wavelength conversion using SOA nonlinearities. *IEEE Commun Magazine*, 1998, 36(12):56

[2] Chung K I, Kim T Y, Han S K. Analysis of all optical cascaded XGM wavelength converter using CW-holding beam. *Opt Quantum Electron*, 2002, 34:937

[3] Zhang Xinliang, Sun Junqiang, Liu Deming, et al. In-phase

wavelength conversion in semiconductor optical amplifier in critical lasing state. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2001, 22(5):652(in Chinese) [张新亮,孙军强,刘德明,等.基于半导体光放大器临界激射状态的同相波长转换. *半导体学报*, 2001, 22(5):652]

[4] Huang Lirong, Huang Dexiu, Miao Qingyuan. Wavelength conversion based on cross-polarization modulation in semiconductor optical amplifiers. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2003, 24(8):882(in Chinese) [黄黎蓉,黄德修,缪庆元.基于半导体光放大器交叉偏振调制的波长转换分析. *半导体学报*, 2003, 24(8):882]

[5] Pegg S I. Noise in wavelength conversion by cross-gain modulation in a semiconductor optical amplifier. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1999, 11(6):724

[6] Gnovart F, Simon J C, Valiente I. Gain recovery dynamics in semiconductor optical amplifier. *Optics Commun*, 2001, 199:111

[7] Agrawal G P, Olsson N A. Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifier. *IEEE J Quantum Electron*, 1989, 25(11):2297

[8] Connelly M J. Wideband semiconductor optical amplifier steady-state numerical model. *IEEE J Quantum Electron*, 2001, 37(3):439

[9] Mecozzi A, Mork J. Saturation effects in nondegenerate four-wave mixing between short optical pulses in semiconductor laser amplifiers. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 1997, 3(5):1190

[10] Durhuus T, Mikkelsen B, Stubkjaer K E. Detailed dynamic model for semiconductor optical amplifiers and their crosstalk intermodulation distortion. *J Lightwave Technol*, 1992, 10(8):1056

[11] Agrawal G P, Olsson N A. Amplification and compression of weak picosecond optical pulses by using semiconductor-laser amplifiers. *Opt Lett*, 1989, 14(10):500

[12] Connelly N J. *Semiconductor optical amplifiers*. Boston: Kluwer Academic, 2002:34

Numerical Analysis of Probe Light Energy in Cross-Gain Modulation of SOA

Liu Chao, Jin Chaoyuan, Huang Yongzhen, and Zhu Ninghua

(Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the simulation on carrier density distribution via the steady-state model established by Connelly and the dynamic numerical method presented by Durhuus, the effect of the input energy of continuous probe light on the conversion signal in cross-gain modulation of SOA is analyzed. Numerical simulation shows that the smaller the energy of continuous probe light is, the larger the extinction ratio of conversion signal is, moreover, the full width at half maximum is almost same.

Key words: semiconductor optical amplifier; wavelength conversion; cross-gain modulation

EEACC: 2550X; 4340G; 6260M

Article ID: 0253-4177(2005)04-0812-04