

基于单端耦合 SOA 的波长转换器啁啾特性分析*

董建绩 张新亮 黄德修

(华中科技大学 光电子工程系,湖北 武汉 430074)

摘 要 提出了一种基于单端半导体光放大器(SOA)的交叉增益调制型(XGM)全光波长转换器结构,并针对这种结构建立了动态理论模型,以这个模型为基础分析了泵浦光功率、探测光功率、输出消光比、输入消光比对转换后信号啁啾的影响.结果表明利用这种结构的波长转换器实现波长转换,在提高输出消光比的同时也降低了转换光的啁啾,较传统的波长转换器是一种改进.

关键词 半导体光放大器;交叉增益调制;全光波长转换器;啁啾;消光比

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

0 引言

波长转换器能实现波长的再利用、可以降低网络阻塞率、可以简化网络管理^[1],而交叉增益调制型(XGM)全光波长转换器(AOWC)具有结构简单、转换效率高和可转换速率高等优点,一直是研究的热点^[2],但普通方案使用的是双端耦合输入输出的半导体光放大器,这种结构的波长转换器最大的缺点是输出消光比退化严重,尤其向上转换时消光比退化更严重^[3].文献[4]提出了一种基于单端耦合 SOA 波长转换器结构,实验结构表明:这种结构的波长转换器比普通双端耦合 SOA 的波长转换器相比能够获得更好的输出消光比特性.但是大部分研究都集中在消光比等方面,而对这种结构的波长转换器的啁啾特性研究甚少,即便研究啁啾特性也多是限制在基于双端 SOA 波长转换器上^[5],本文采用分段模型^[6],建立基于单端 SOA 波长转换器的动态模型,重点分析转换后信号啁啾特性,并将这种结构和普通交叉增益型波长转换器在转换光信号啁啾方面进行对比.

1 理论模型

文献[4]提出了一种基于单端 SOA-XGM 的全光波长转换器的实验装置,如图 1.

图 1 中,半导体光放大器的输入输出共用同一个端口,在后端面上镀适当反射率的增透膜,输入光经过半导体光放大器后端面反射回来,又从输入端输出,经过光环形器的端口 3 输出,经可调滤波器滤掉泵浦光频率分量,只输出探测光频率分量,经过衰减器送至光示波器或者光谱仪进行分析.

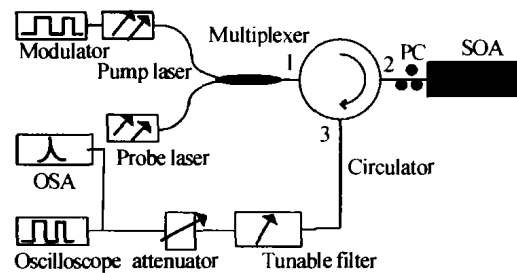


图 1 基于单端 SOA-XGM 全光波长转换器的实验装置
Fig. 1 Experiment system of AOWC based on single-port-coupled SOA

基于上述原理,建立如下基于单端 SOA 的全光波长转换器的理论模型.

首先用速率方程描述 SOA 中载流子浓度的动态变化,载流子速率方程可用下式表达^[7]

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{I}{eV} - R(N) - \sum_{i=p,c} \frac{\Gamma g_i(N)}{Ahc/\lambda_i} P_i \quad (1)$$

式(1)忽略了放大自发辐射效应引起的饱和.当放大器的饱和主要取决于注入光时,这种假设是合理的,本文讨论的动态模型将都不考虑 ASE 噪声的影响.

信号光和探测光在 SOA 中的传播由下述方程描述^[8]

$$\pm \frac{\partial P_i}{\partial z} = [\Gamma g_i(N) - \alpha_{in}] P_i \quad (2)$$

式中 $i=p,c$ 对应于注入的两束光:信号光和探测光.方程中的符号表示为:“+”和“-”分别对应光波沿 $+z$ 和 $-z$ 方向传播; N 是载流子浓度; I 是光强度; V 为 SOA 有源区体积; e 是电量; A 为有效截面积; $R(N)$ 是总的自发辐射和非辐射复合速率; h 是普朗克常量; c 是光速; λ 为波长; Γ 是模场限制因子; α_{in} 是除了受激发射吸收外其它吸收过程所造成的损耗系数; t 是时间; z 指光传播的方向; $g_i(N)$ 是增益系数.

增益系数与载流子浓度和波长的关系可由下式模拟^[9]

$$g_i(N) = g_N(N - N_t) - r_2(\lambda_i - \lambda_p)^2 + r_3(\lambda_i - \lambda_p)^3$$

*国家 973 计划(G2000036605)、863 计划(2002AA312160)和武汉市技术创新专项(2002100513013)项目资助
Tel:027-87546436 Email:happydam@sohu.com
收稿日期:2003-12-15

$$\lambda_p = \lambda_{ref} - k_0(N - N_{ref}) \quad (3)$$

式中 g_N 为微分增益; N_i 为透明载流子浓度; N 为相应于一定的电注入水平无光入射稳态载流子浓度; λ_p 为对应的增益峰值波长; N_{ref} 为无光入射稳态载流子浓度的参考值, λ_{ref} 为对应的参考增益峰值波长; k_0 为波长漂移系数; r_2 和 r_3 为增益常数, r_2 与 SOA 的增益带宽有关, r_3 与增益谱的非对称性有关.

光在 SOA 有源区传输时,引起载流子浓度的变化,从而导致有源区折射率发生变化,光的相位也随之变化. 而探测光的相位变化是探测光的自相位调制和泵浦光的交叉相位调制共同作用的结果. 转换后信号光的相位随传播方向的变化为^[10]

$$\frac{d\Phi}{dz} = -\frac{1}{2}\Gamma\alpha g$$

所以转换后信号光啁啾为

$$\Delta\nu = -\frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi}{dt} = \frac{1}{4\pi} \Gamma \int_0^L \left| \frac{da}{dt}g + \frac{dg}{dt}a \right| dz \quad (5)$$

其中 α 为线宽增强因子,且满足

$$\alpha = -\frac{4\pi}{\lambda} \left| \frac{dn}{dN} / \frac{dg}{dN} \right| \quad (6)$$

dn/dN 表示折射率系数随载流子浓度的变化, dg/dN 表示增益系数随载流子浓度的变化. 为转换光波长.

本文采用分段模型,把半导体光放大器的有源区沿光的传播方向分成 M 段,在每一小段中认为载流子浓度是均匀的,记第 j 段的载流子浓度为 $N_j(t)$,因为单端 SOA 是利用 SOA 后端面反射后,将反射光再次放大调制而实现波长转换的,所以背向输入光功率依赖于正向输出光功率,即存在

$$P_{i,M+1}^- = P_{i,m+1}^+ r \quad (7)$$

r 为后端面反射率. 符号 $P_{i,j}^\pm$ 中“+”和“-”分别对应光波沿 $+z$ 和 $-z$ 方向传播, $i=p, c$ 分别表示泵浦光和探测光, j 表示有源区长度的第 j 小段.

首先假设背向输入光功率 $P_{i,M+1}^-$ 已知,这样利用(1)可以求解有源区每一小段的载流子浓度^[6],然后利用(2)求解每一小段的探测光、泵浦光功率,利用(7)就可以求出背向输入光功率 $P_{i,M+1}^-$,将计算值 $P_{i,M+1}^-$ 和预设值 $P_{i,M+1}^-$ 比较,如果满足 $P_{i,M+1}^- \approx P_{i,M+1}^-$,则说明假设合理,输出计算结果;如果数值差别在控制精度以外,这时更新预设值,即令 $P_{i,M+1}^- = P_{i,M+1}^-$,重新根据(1)、(2)计算,直至运算的结果符合要求为止.

通过以上方法求解出初始时刻载流子浓度在有源区内的分布后,接着用四阶龙格-库塔法解微分方程(1),求出载流子浓度随时间变化情况,最后利用(5)计算转换后信号光啁啾.

2 数值模拟

将 SOA 有源区分成 10 段,每段长度 50 μm ,每个码元采样 40 个点,用四阶龙格-库塔法对速率方程(1)求解. 信号光脉冲用 3 阶超高斯脉冲模拟,信号速率为 2.5 Gbps,偏置电流为 100 mA,信号光功率最大值为 10.08 mW,波长为 1550 nm,探测光功率为 1 mW,波长为 1530 nm,SOA 后端面反射率为 1%,计算得到的输出泵浦光功率、转换光功率、转换光啁啾随时间的变化如图 2 所示.

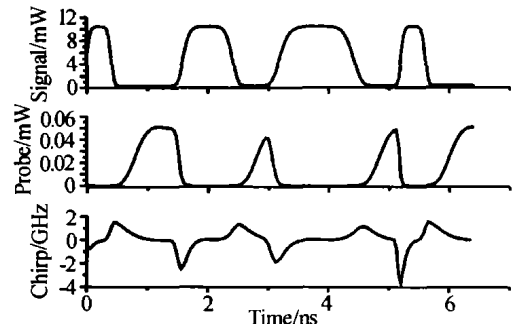


图 2 泵浦光功率(上)、转换光功率(中)、转换光啁啾(下)随时间变化曲线

Fig. 2 The signal pulse pattern (upper), the output pulse pattern (middle), the chirping of converted signals (lower)

从图 2 可以看出,转换光和泵浦光是反相的,这是由交叉增益调制机制决定的,而转换光的上升沿对应啁啾为正,下降沿对应啁啾为负. 从啁啾曲线看,上升沿的峰值正啁啾基本相同,约为 1.4 GHz,而下降沿的峰值负啁啾则变化较大,最低的峰值为 -3.6 GHz,这是因为转换光脉冲的下降沿比上升沿陡峭的缘故. 为了便于分析啁啾,本文均取正啁啾和负啁啾的峰值进行研究.

下面应用动态分段模型,数值模拟了单端 SOA 波长转换器中转换光啁啾和输入光功率、输出消光比、输入消光比的关系.

2.1 转换光啁啾和输入光功率之间的关系

图 3 是信号速率为 10 Gbps 时转换光啁啾和泵浦光功率的关系,从图中可以看出,泵浦光功率越大,转换光的啁啾也越大,而且负啁啾的变化比正啁啾的变化大. 这是因为增大泵浦光功率,则引起载

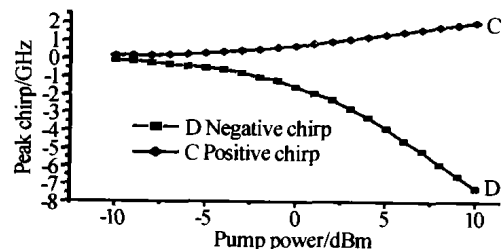


图 3 峰值啁啾随泵浦光功率的变化

Fig. 3 Peak chirping of converted signals as a function of signal power

流子浓度的变化也越大,因此转换光的啁啾就大.图4是信号速率为10 Gbps时转换光啁啾和探测光功率的关系,可以看出,随着探测光功率的增大,转换光的啁啾越来越小,这是因为探测光功率越大,使得泵浦光在竞争消耗载流子时消耗的载流子减少,从而使得转换光啁啾降低.

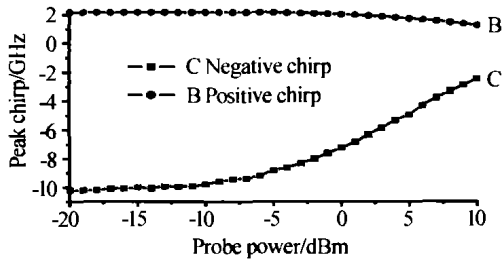


图4 峰值啁啾随探测光功率的变化
Fig.4 Peak chirping of converted signals as a function of probe power

所以减小泵浦光功率和增大探测光功率可以减小转换光的啁啾,但是为了获得好的消光比特性,需要增大泵浦光功率和减小探测光功率,因此在设计实际的系统时需要调整探测光和泵浦光功率以实现消光比和啁啾的平衡.

2.2 转换光啁啾和输出消光比的关系

图5给出的四条曲线,代表基于普通的双端SOA波长转换器和基于单端SOA的波长转换器两种方案下,正啁啾、负啁啾随输出消光比的变化情况.可以看出,随着转换光的消光比的增大,转换光的啁啾也逐渐增大,而在获得相同的输出消光比的情况下,采用单端方案得到的转换光的啁啾要小得多,这是因为在普通方案中为了获得较大的输出消光比,需要大泵浦功率和小探测功率,这样会恶化啁啾特性,但单端方案中由于只需较小的泵浦功率和允许大的探测光功率,因而可以得到较好的啁啾特性.

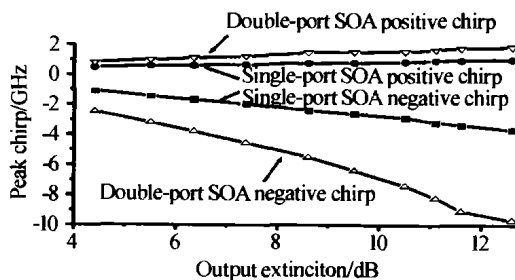


图5 在两种波长转换方案下,峰值啁啾随输出消光比的变化
Fig.5 Peak chirping of converted signals versus output extinction ratio at two different schemes

2.3 转换光啁啾和输入消光比的关系

图6给出的四条曲线,代表基于普通的双端SOA波长转换器和基于单端SOA的波长转换器两种方案下,正啁啾、负啁啾随输入消光比的变化情况.可以看出,正啁啾和负啁啾都随输入消光比的增加而增大.基于单端SOA的波长转换器主要是在输

出消光比特性方面得到了很大的改善,而在啁啾方面,将这两种方案对比可以看出,正啁啾基本相同,而基于单端SOA的波长转换器的转换光的负啁啾更小,这就使得这种结构的波长转换器离实用化更近了一步.

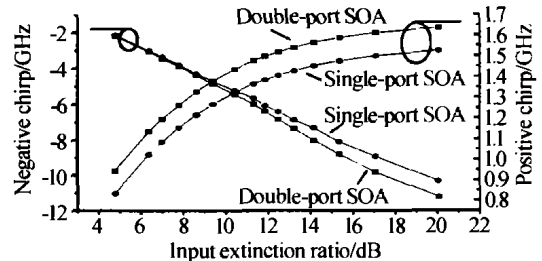


图6 在两种波长转换方案下,峰值啁啾随输入消光比的变化
Fig.6 Peak chirping of converted signals versus input extinction ratio at two different schemes

3 结论

与普通交叉增益调制型波长转换器一样,利用单端SOA波长转换器进行波长转换时,转换光的上升沿有正啁啾,而下降沿有负啁啾,不过分析表明,但在相同的输出消光比情况下,单端SOA波长转换器的转换光啁啾远小于普通方案的转换光啁啾.本文利用分段模型分析了影响输出光的啁啾的各种因素.如减小信号光功率或者增大探测光功率可以降低啁啾;提高输出消光比会导致转换光啁啾增加;输入消光比的增加会增大转换光的啁啾,但消光比达到一定值后,啁啾变化就不明显了.由于基于单端SOA的波长转换器最大的优点是能改善输出消光比,而降低啁啾的参数通常也降低了输出消光比,因此要适当选择这些参数以实现啁啾和输出消光比的平衡.

参考文献

- 1 Yoo S J B. Wavelength conversion technologies for WDM network applications. *J Lightwave Technology*, 1996, 14 (6):955 ~ 966
- 2 张宏斌,邱昆,李中桂. 基于半导体光放大器交叉增益调制(SOA-XGM)波长转换器仿真研究. *光子学报*, 2002, 31(3):337 ~ 344
Zhang H B, Qiu K, Li Z G. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31 (3):337 ~ 344
- 3 Zhang X L, Sun J Q, Huang D X, et al. Theoretical study on extinction ratio degradation in XGM wavelength converter. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Edition)*, 1999, 27(10):15 ~ 17
- 4 Zhang X L, Huang D X, Sun J Q. Extinction ratio improvement in XGM wavelength conversion based on novel scheme. *IEEE, International Conference on Communication Technology Proceedings*, 2000, 1571 ~ 1574
- 5 Ye Y B, Zheng X P, Zhang H Y, et al. Chirp performance

- of converted signal in wavelength conversion based on cross-gain modulation in SOA. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(4): 436 ~ 440
- 6 Michael J, Connelly. Wideband semiconductor optical amplifier steady-state numerical model. *IEEE J Quantum Electronics*, 2001, **37**(3): 440 ~ 443
- 7 Ginovart F, Simon J C, Valiente I. Gain recovery dynamics in semiconductor optical amplifier. *Optics Communication*, 2001, **199**: 111 ~ 115
- 8 Benny Mikkelsen. *Optical Amplifiers and Their System Application*. Denmark Technology University, 1994
- 9 Zhang X L. All-optical wavelength converter based on semiconductor optical amplifiers. *Huazhong University of Science and Technology*, 2000. 52 ~ 54
- 10 Agrawal G P, Olsson N A. Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulse in semiconductor laser amplifiers. *IEEE J Quantum Electronics*, 1989, **25**(11): 2297 ~ 2306

Chirp Characteristics in Wavelength Converter Based on Single-Port-Coupled SOA

Dong Jianji, Zhang Xinliang, Huang Dexiu

Department of Optoelectronic Engineering, HUST, Wuhan 430074

Received date: 2003-12-15

Abstract A new all-optical wavelength converter (AOWC) using single-port-coupled semiconductor optical amplifier (SOA) based on cross gain modulation (XGM) was brought forward, and a dynamic model was presented. Based on the dynamic model, factors which affect converted signal chirp, such as signal power, probe power, output extinction ratio, input extinction ratio, were analyzed respectively. The numerical result shows that converted signal chirp decreases in some extent when using this kind of wavelength converter.

Keywords Semiconductor optical amplifier; Cross gain modulation; All-optical wavelength converter; Chirp; Extinction ratio



Dong Jianji was born in Wuhan in 1979. Now he is a Master Degree candidate in the Optoelectronics Department of Huazhong University of Science and Technology. He is engaged in the studies of optical communication device and applications.