

基于 XGM 的 SOA 波长变换器噪声特性分析及实验研究

迟 楠,陈树强,管克俭
(北京邮电大学光通信中心,北京 100876)

摘 要: 本文将半导体光放大器的 ASE 噪声功率引入到 SOA 分段动态模型,得到随 SOA 长度变化的 ASE 噪声功率,并讨论了偏置电流、泵浦光功率、SOA 长度对变换性能影响.理论计算结果表明,大的偏置电流有利于提高消光比(ER)和信噪比(SNR);对于长度一定的 SOA 和一定的偏置电流,泵浦光功率存在最佳值;SOA 长度存在信噪比最佳值.我们对 2.5Gbit/s SDH 信号进行了 XGM 方式波长变换,实验结果与理论分析一致.

关键词: 交叉增益调制;全光波长变换;半导体光放大器;放大器自发辐射噪声

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 02-0282-03

Theoretical Performance Analysis with Noise Consideration and Experiment of Wavelength Converters Based on XGM in SOAs

CHI Nan, CHEN Shu-qi, GUAN Ke-jian

(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: We give an optimal dynamic model with ASE amplified spontaneous emission noise power consideration for wavelength converters using semiconductor optical amplifiers (SOA) via cross-gain modulation (XGM). The theoretical results indicate that bigger bias current can perform better ER and SNR. Pump power should be in a certain range to get good performance. There is an optimal length of SOA for certain pump and probe wave. The experimental results of wavelength conversion of 2.5Gbit/s SDH signal can be explained by this model.

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

1 引言

全光波长变换技术是实现波分复用(WDM)光网络的关键技术之一,其主要作用是防止 WDM 光网络中光交叉连接(OXC)时可能遇到的波长阻塞现象,或作为全光 WDM 网络的波长适配器,便于 WDM 网络之间的互连,使 WDM 光网络具有灵活性、可扩性和自愈性.实现波长变换的方法有很多,利用半导体光放大器(SOA)中的交叉增益调制(XGM),交叉相位调制(XPM)和四波混频(FWM)都可以实现全光波长变换^[1,2].基于 XGM 的波长变换器具有结构简单,变换频域宽,对极化不敏感的特点,但也存在向长波长方向变换消光比恶化问题和频率啁啾对传输的负面影响.人们对 SOA 已经做了多方面研究^[3~9],其中分段动态模型的方法可以较精确模拟 SOA 的增益特性和频率啁啾^[7~9].在 XGM 方式中变换信号的噪声来源主要是放大器中的自发辐射噪声(ASE)^[6],如何在动态模型中引入 ASE 噪声是人们感兴趣的问题.目前的研究工作主要采用噪声功率叠加到输出频谱的方法^[6,7,10],但是这种方法未能说明 SOA 内部 ASE 沿长度方向的功率变化情况,因此不能给出 SOA 长度的设计依据.同时,动态的增益必然导致动态的 ASE,动态 ASE 噪声的引入能够更精确地模拟

波长变换器的变换性能.

本文综合考虑动态载流子恢复时间和 ASE 噪声,得到沿长度分布的平均 ASE 噪声功率表示式,分析了 XGM 波长变换器中偏置电流,泵浦光功率及 SOA 长度对变换性能的影响,说明大的偏置电流有较好的变换效果;在 SOA 长度和偏置电流一定的条件下,泵浦功率存在最佳值;SOA 长度有信噪比最佳值.文中对 2.5Gbit/s SDH(同步数字系列)信号进行了 XGM 方式的波长变换实验,实验结果与理论分析一致,可以作为优化设计的理论依据.

2 分段动态模型

将 SOA 分段处理可以准确研究其动态特性,如图 1 所示.由文献[11],SOA 中第 i 段中载流子速率方程可以表示为:

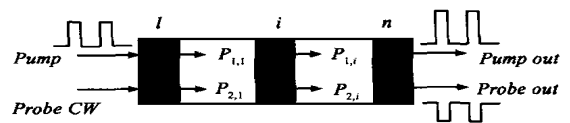


图 1 SOA 分段模型

$$\frac{dN_i}{dt} = \frac{J}{qV} - \frac{N_i}{\tau_{e,i}} - \sum_{m=1,2} \frac{g_{P_m} \cdot I_{P_m,i}}{E_p} - \frac{g_{ASE,i} P_{ASE,i}}{E_{ASE}} \quad (1)$$

收稿日期:1999-10-28;修回日期:2000-04-10

基金项目:国家自然科学基金(No. 69772034)、原邮电部重点科研基金和霍英东青年教师基金资助项目

其中: $x = t - z/v_g$ 是随信号运动的参考坐标系横轴; N_i 为第 i 段载流子浓度; τ_c 为载流子恢复时间, A_i 为 SOA 横截面积. I_i 为第 i 段平均光强:

$$I_i = I_{i-1}(e^{g_i L_i} - 1) / g_i L_i \quad (2)$$

第 i 段的净增益为 $g_i = g_{mi} - \alpha_{int}$, α_{int} 为模场限制因子, α_{sp} 为材料损耗, g_{mi} 是材料增益, 可以表示如下:

$$g_{mi} = a_1(N_i - N_0) - a_2 \left(\frac{\lambda - \lambda_{pi}}{\lambda_0} \right)^2 \quad (3)$$

其中 a_1, a_2 为增益常数, $\lambda_{pi} = \lambda_0 - K_0(N_i - N_{th})$ 为增益峰值波长, $\lambda_0 = 1605\text{nm}$ 是材料透明时的峰值波长, K_0 是与增益峰值移动有关的常数.

载流子密度变化响应的加快最终表现出来的是其恢复时间的加快. 为计算 SOA 中高频动态特性, 可以把饱和和滤波效应等效为载流子恢复时间的变化, 称为动态载流子恢复时间 $\tau_{c,d}$, 表示为:

$$\tau_{c,d} = (c_1 + c_2 n + c_3 n^2)^{-1} \quad (4)$$

其中 c_1, c_2, c_3 是复合系数.

在每段中平均 ASE 光子浓度可用下式表示^[5]:

$$n_{ASE}(\nu) = 2 \nu \frac{R_{spi}}{g_{pi}} \left[\frac{e^{g_{pi} L_i} - 1}{g_{pi} L_i} - 1 \right] \quad (5)$$

其中: $R_{spi} = c_2 N^2$ 是辐射复合率; ν 称为自发辐射因子, 是

耦合到 SOA 中的自发辐射噪声中频率为 ν 的部分^[9]. g_{pi} 是第 i 段的增益峰值, L_i 为段长度. 由式(5)可得第 i 段中平均自发辐射功率为:

$$P_{ASE_i} = A_{SE} h \nu d + P_{ASE_{i-1}} (e^{g_{pi} L_i} - 1) / g_{pi} L_i \quad (6)$$

式中: h 是普朗克常量; w, d 分别为 SOA 有源区的宽度和厚度; ν 为探测光频率; $\Delta\nu$ 为探测光频谱带宽. 计算中使用的 SOA 物理参数见文献[11].

3 数值计算结果

SOA 中长度方向的增益和 ASE 噪声功率的变化如图 2 所示. 图中方块表示泵浦光功率等于 0dBm, 探测光功率等于 -10dBm 的情况, 实线表示泵浦光功率为 4dBm, 探测光功率为 1dBm. 从图中可以看出, SOA 的增益与泵浦功率大小有关, 泵浦功率相对较大时(4dBm), SOA 出现增益饱和, 增益随 SOA 长度增加逐渐减小. 相反的, 当泵浦功率较小时(0dBm), SOA 增益随长度增加逐渐增加. 图中每组输入对应有两条 ASE 噪声功率曲线, 这是由于 ASE 噪声功率分为“0”码、“1”码两种情况, 入射信号为“0”码时增益较大, 对应的噪声功率比“1”码时大. 在两组输入功率条件下, ASE 噪声功率都随 SOA 长度增加而增大, 相对较小的泵浦功率对应的噪声功率较大, 这是由于增益较大引起的.

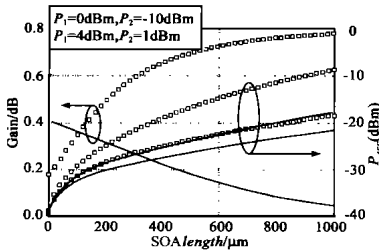


图 2 SOA 沿长度方向变化的增益和 ASE 噪声曲线

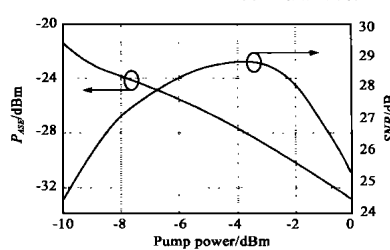


图 3 ASE 噪声功率和变换信号的信噪比与泵浦功率的变化关系

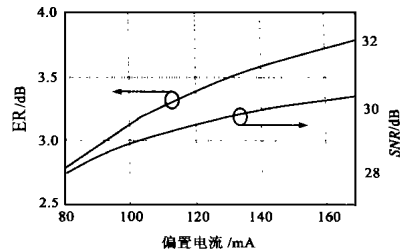


图 4 变换信号的信光比和信噪比与偏置电流的关系曲线

泵浦功率取值对 ASE 噪声功率和信噪比的影响如图 3 所示. 随着泵浦功率的增加, ASE 噪声功率呈递减趋势, 而信噪比则先增大然后减小, 有一个最大值. 说明泵浦功率大于一定值后, 增加泵浦功率不仅不能提高变换性能, 还会使变换性能变差. 满足一定的信噪比条件, 泵浦功率取值有一个动态范围.

图 4 为变换信号的信光比和信噪比随偏置电流的变化曲线. 信光比和信噪比与偏置电流都成正比, 偏置电流越大, 信光比和信噪比越大, 因此为得到较好的波长变换性能, 应选择较大的偏置电流.

SOA 长度对消光比和信噪比的影响如图 5 所示. 在与图 2 相同的两组输入功率条件下, SOA 长度增加, 消光比都随之增加; 信噪比则先增加后缓慢减小. 信噪比最大值对应

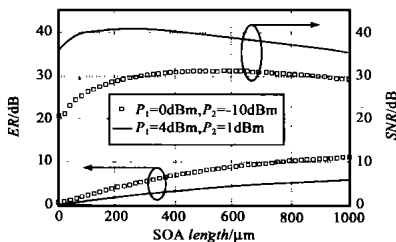


图 5 变换信号的信光比和信噪比沿 SOA 长度方向变化图

的 SOA 长度与泵浦功率有关, 泵浦功率为 4dBm 时, SOA 在 200m 左右得到最大信噪比, 泵浦功率为 0dBm 时, 信噪比最大值出现在 600μm 左右. 因此, SOA 最佳长度与泵浦功率互相制约, 较长的 SOA 应选取较低的泵浦功率才能获得较好的变换效果, 反之, 较短的 SOA 应选取较高的泵浦功率.

4 实验结果

实验装置如图 6 所示 (MOD 为外调制器; IL 为可调谐激光器), 2.5Gbit/s SDH 电信号由 SDH/SONET 分析仪 (Anritsu 公司出品, 型号为 ME3620A) 产生, 经 LiNbO3 外调制器调制 DFB 激光器产生信号光 (泵浦光) 波长为 1550.9nm. 探测光由 Photonics TUNICS-1550 型可调谐锁模激光器产生. 泵浦光和探测光经过 3dB 耦合器和隔离器入射到 SOA 中, 隔离器与偏振无关, 为 E-TEK 公司产品. 实验中使用的 1.5 m SOA 为 Alcatel 1901 型, 其典型的光纤到光纤增益为 25dB, 饱和输出为 9dBm, TE 模和 TM 模之间的增益差小于 0.5dB. SOA 输出接 Santec OTF-610 滤波器滤出变换信号, 该滤波器的 3dB 带宽为 0.4nm, 工作范围在 1530 ~ 1560nm. 光谱仪为 ANDO AQ-6315 型, 最小分辨率 0.05nm, 观测眼图的示波器采用 HP 83480A 数

字通信分析仪.

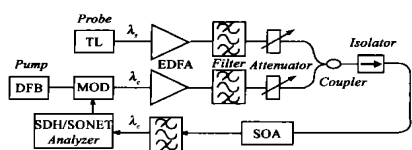
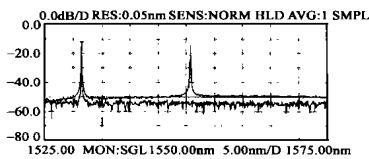
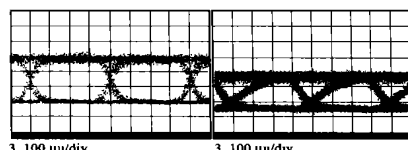


图 6 实验装置图



(a) 155.9 nm 信号光向下变换 19.4 nm 光谱图



(b) 原始信号(左)和变换信号(右)眼图

图 7

波长变换的眼图和频谱图如图 7 所示. 图 7(a) 为入射泵浦光、探测光和变换信号的频谱, 探测光波长为 1531.5 nm, 波长向下变换 19.4 nm. 图 7(b) 为泵浦光和变换信号的眼图. 改变光衰减器调整泵浦光功率, 测得不同泵浦功率与误码率的对应关系, 如图 8 所示. 当泵浦功率在 -11.5 ~ -6 dBm 范围内变化时, 误码率小于 10^{-9} , 泵浦功率为 -8 dBm 左右时, 误码率最小. 这个结果与前面的理论分析相一致, 说明泵浦功率不是越大越好, 而是有一个动态范围. 如果泵浦功率在此范围内, 可以满足一定的误码率要求, 高于或低于此范围, 都会引起误码率增大. 这个结论可以定性理解为: 过大的泵浦功率造成 SOA 深度饱和, 从而使探测光的有效增益降低, 使 SOA 输出端变换信号光的功率减小, 引起误码率增大. 图 9 为不同偏置电流对应的误码率. 偏置电流大于 90 mA 时, 误码率小于 10^{-9} , 偏置电流大于 130 mA 时, 误码率基本不变, 为 10^{-12} 量级. 这个结果与我们前面分析相符, 说明在 SOA 能够承受的条件下(不被击穿), 应尽量加大偏置电流. 由于实验所用的 SOA 长度一定(约 500 m), 因此无法测出 SOA 长度的改变对变换性能的影响, 对于 SOA 长度影响的分析还有待进一步实验证实.

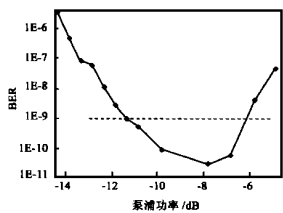


图 8 实验测得不同泵浦功率对应的误码率

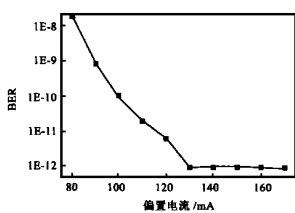


图 9 实验测得不同偏置电流对应的误码率

5 结论

本文模拟了利用 SOA 中的 XGM 效应进行波长变换的噪声功率和性能指标. 数值结果表明, 为得到较好的变换性能, 应采用较大的偏置电流; 满足一定误码率的条件下, 泵浦光功率有一个动态范围; 对于一定的泵浦光和探测光, SOA 长度存在最佳值. 本文做的 2.5 Gbit/s 信号波长变换实验与理论分析一致.

参考文献:

[1] S. J. B. Yoo, Wavelength conversion technologies for WDM network applications [J]. IEEE J. Lightwave Technol. , 1996, 14(6) : 955 - 966.

[2] T. Durhuus, B. Mikkelsen, C. Joergensen, et al. All-optical wavelength conversion by semiconductor optical amplifiers [J]. IEEE J. Lightwave Technol. , 1996, 14(6) : 942 - 954.

[3] B. Gance, J. M. Wiesenfeld, U. Koren, et al. Broadband optical wavelength shifter [A]. in Proc. CLEO 92 [C], Anaheim, CA, 1992, paper CPD27.

[4] G. P. Agrawal, N. A. Olsson. Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifiers [J]. IEEE J. Quantum Electron. , 1989, 25(11) : 2297 - 2306.

[5] C. H. Henry. Theory of spontaneous emission noise in open resonators and its application to lasers and optical amplifiers [J]. IEEE J. Lightwave Technol. , 1986, LT-4(3) : 288 - 297.

[6] K. Obermann, S. Kindt, D. Breuer, et al. Noise characteristics of semiconductor-optical amplifiers used for wavelength conversion via cross-gain and cross-phase modulation [J]. IEEE photon. Technol. Lett. , 1997, 9(3) : 312 - 314.

[7] K. Obermann, S. Kindt, D. Breuer, et al. Performance Analysis of wavelength converters based on cross-gain modulation in semiconductor-optical amplifiers [J]. IEEE J. Lightwave Technol. , 1998, 16(1) : 78 - 85.

[8] X. Zheng, N. Chi, K. Guan, et al. Dynamic characteristics of a Mach-Zehnder wavelength converter [J]. SPIE PHOTONICS 98, Beijing, China, 9, 1998.

[9] T. Durhuus, B. Mikkelsen, K. E. Stubkjaer. Detailed dynamic model for semiconductor optical amplifiers and their crosstalk and intermodulation distortion [J]. IEEE J. Lightwave Technol. , 1992, 10(8) : 1056 - 1065.

[10] F. Matera, M. Settembre. Comparison of the performance of optically amplified transmission systems [J]. IEEE J. Lightwave Technol. , 1996, 14(1) : 1 - 11.

[11] M. Asghari, I. H. White, R. V. Penty. Wavelength conversion using semiconductor optical amplifiers [J]. IEEE J. Lightwave Technol. , 1997, 15(7) : 1181 - 1190.

作者简介:



迟楠 1996 年在北京邮电大学电信工程学院获电磁场与微波技术专业学士学位, 现为北京邮电大学电磁场与微波技术专业博士研究生, 主要研究方向为 WDM 技术及全光波长变换.