

半导体光放大器引起的串扰及其抑制技术

管爱红¹ 张德贤¹ 孙军强²

(¹ 河南工业大学信息学院, 河南 郑州 450001; ² 华中科技大学武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 由于半导体光放大器(SOA)的增益饱和和效应,在波分复用系统中,每个信道的增益受到复用的其它信道的影响。SOA引起的各信道之间的串扰严重限制了其应用。理论研究了SOA增益饱和和效应引起的信道间串扰,数值模拟了多路信道复用时系统的误码率随复用信道数和光功率的变化情况,发现随着复用信道数的增加SOA增益饱和引起的信道间串扰越来越严重。对SOA中串扰的抑制方法进行了理论和实验研究,数值模拟发现连续光注入可以抑制输出功率的波动,从而减小误码率,当复用10个信道时,连续光注入可以使功率代价减小2 dB;实验验证了两信道的40 Gb/s系统中,注入连续光可以减少SOA引起的信道间串扰。

关键词 光纤通信; 半导体光放大器; 非线性串扰; 连续光注入

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082808.1445

SOA Induced Crosstalk in WDM Network and Its Mitigation Techniques

Guan Aihong¹ Zhang Dexian¹ Sun Junqiang²

(¹ College of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China)
(² National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract In a system, for the reason of gain saturation of semiconductor optical amplifiers (SOAs) the gain of a channel is influenced by other multiplexing channels, and the interchannel crosstalk limits severely the application of SOA. Theoretical study on channel crosstalk due to gain saturation in SOAs is presented. The system bit-error rate (BER) is quantified as a function of the amplifier input power and the number of channels. It is found that more multiplexing channels induce more severe crosstalk because of the gain saturation characteristic of SOAs. Crosstalk mitigation techniques in SOAs are studied theoretically and experimentally. Simulation shows that continuous wave (CW) light injection can restrain output power fluctuation and decrease BER. With ten multiplexing channels, CW light injection can reduce power loss by 2 dB. Experiment shows in a 40 Gb/s two-channel system, interchannel crosstalk caused by SOA can be restrained by CW light injection.

Key words optical communication; semiconductor optical amplifier; nonlinear crosstalk; continuous light injection

1 引言

半导体光放大器(SOA)有许多适用于光纤通信的优点:结构简单、体积小、效率高、可靠,并且可以应用于整个近红外区域。然而,目前SOA的应用较多是利用其非线性效应制作非线性的光电子器件^[1~3],SOA作为线性放大器的应用并没有像人们预料的那么广泛,主要原因是由于SOA增益饱和引起的各信道之间的串扰。关于SOA增益饱和引起的信道间串扰的研究很早就开始了^[4~9]。本文对SOA增益饱和引起的信道间串扰进行了理论分析,对通过连续光注入抑制SOA引起的信道间串扰进

行了理论和实验研究。

2 SOA增益饱和引起的信道间串扰

SOA中存在着增益饱和现象,放大器增益与输入光功率满足下面的关系^[10]:

$$P = \frac{P_{\text{sat}}}{G-1} \ln \frac{G_0}{G}, \quad (1)$$

式中 P 为总输入光功率, P_{sat} 为SOA饱和输出功率, G_0 为SOA的小信号增益, G 为信号增益。

考察一个传输 N 个信道的波分复用系统经过SOA放大的情况,放大器的输入包括功率相等的 N

收稿日期: 2007-12-20; 收到修改稿日期: 2008-03-14

作者简介: 管爱红(1973—),女,博士,副教授,主要从事光纤通信和光电子器件等方面的研究。

E-mail: guanaihonghust@yahoo.com.cn

路调制信号,假设 N 路信号同步,每路信号的平均输入功率为 P_{in} ,消光比 $r = P_0/P_1$, P_0 、 P_1 分别为传输“1”码和“0”码时的功率:

$$P_1 = \frac{2P_{in}}{1+r}, \quad (2)$$

$$P_0 = \frac{2rP_{in}}{1+r}, \quad (3)$$

假定“1”码和“0”码出现的概率相等,因此输入放大器的光功率大小满足二项式分布,共有 $(N+1)$ 个可能值,取各值的几率分别为

$$p_k \{P = kP_1 + (N-k)P_0\} = \frac{N!}{k!(N-k)!} \frac{1}{2^N}, \quad (4)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, N$$

由(1)式和(4)式可以得到放大器增益的分布。图1给出输入信道数 $N = 10$, 每个信道的平均输入功率为 -25 dBm,消光比为 20 dB,饱和输出功率为 10 dBm,小信号增益为 26 dB时,SOA的增益分布及其对应的几率,由图可知,放大器的增益有 $N+1$ 个不同的值。

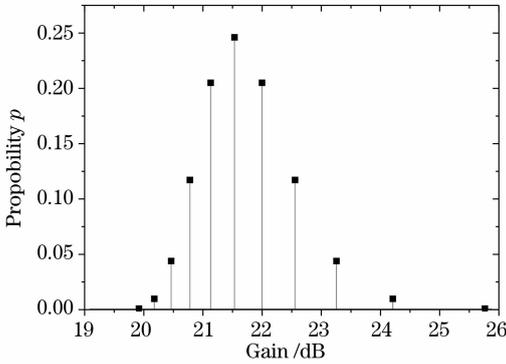


图1 SOA的增益分布及其对应的几率

Fig. 1 Probability as a function of the gain distribution for SOA

SOA在对信号进行放大的过程中产生自发辐射噪声,SOA产生的自发辐射噪声的强度为^[4]

$$P_{sp} = \eta_{out} n_{sp} h\nu (G-1) B_0, \quad (5)$$

式中 η_{out} 为 SOA 的输出耦合效率, n_{sp} 为自发辐射因子, B_0 为信号带宽。SOA 中的噪声主要包括:自发辐射噪声之间的拍频噪声、自发辐射和信号之间的拍频噪声、以及散粒噪声和热噪声等。各种噪声的平均能量可以表示为^[6](计算中所用的参数如表1):

$$N_{th} = I_{th}^2 B_e, \quad (6)$$

$$N_{shot} = 2 \frac{\eta e^2}{h\nu} \alpha [GP_{in} \eta_{in} \eta_{out} + P_{sp} B_0] B_e, \quad (7)$$

$$N_{s-sp} = 4 \frac{\eta^2 e^2}{h\nu} \eta_{in} \eta_{out} \alpha^2 P_{in} G(G-1) n_{sp} B_e, \quad (8)$$

$$N_{sp-sp} = \eta^2 e^2 \eta_{out}^2 \alpha^2 [N_{sp} (G-1)]^2 (2B_0 B_e - B_e^2), \quad (9)$$

式中 I_{th} 为热噪声电流, N_{th} 为热噪声, N_{shot} 为散粒噪声, N_{s-sp} 为信号与自发辐射拍频噪声, N_{sp-sp} 为自发辐射与自发辐射拍频噪声, B_e 为接收机的电带宽, η 为接收机的量子效率, $h\nu$ 为光子能量, α 为 SOA 和光纤之间的耦合损耗, η_{in} 、 η_{out} 为探测器的输入输出耦合效率。低输入功率低增益的情况下,接收机的热噪声占主导地位,在高输入功率高增益的情况下,放大器引起的信号和自发辐射之间的拍频噪声占主导地位,这两种噪声的几率分布都是高斯分布。

表1 计算中采用的参数值

Table 1 Definition of symbols used in calculation

Electrical bandwidth B_e /MHz	100
Optical bandwidth B_0 /GHz	10
Electronic charge e /q	1.6×10^{-19}
Gain with zero input G_0 /dB	26
Photon energy $h\nu$ /eV	0.55
Thermal noise current $I_{th}/(\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}})$	3.8
Spontaneous emission factor N_{sp}	1.4
Amplifier saturation power P_{sat} /dBm	10
Loss between amplifier and receiver α	1
Detector quantum efficiency η	1
Input coupling efficiency η_{in}	0.31
Output coupling efficiency η_{out}	0.26

考察一个传输 N 个信道的波分复用(WDM)系统中信道1受到其他 $N-1$ 个信道串扰的情况。由于 SOA 增益的波动,信道1的输出将有 N 个可能的大小,取每个值的几率大小与增益的几率分布对应。对应“1”码和“0”码都有 N 个可能的幅度,“1”码的输出在 $L_{0,1}$ 和 $L_{N-1,1}$ 之间变化, $L_{0,1}$ 对应其他信道都是“0”码,此时信道1获得最大的增益; $L_{N-1,1}$ 对应其他信道都是“1”码的情况,此时信道“1”码获得最小的增益,同样,“0”码的输出在 $L_{0,0}$ 在 $L_{N-1,0}$ 之间变化。

图2给出了每个信道的平均输入功率为

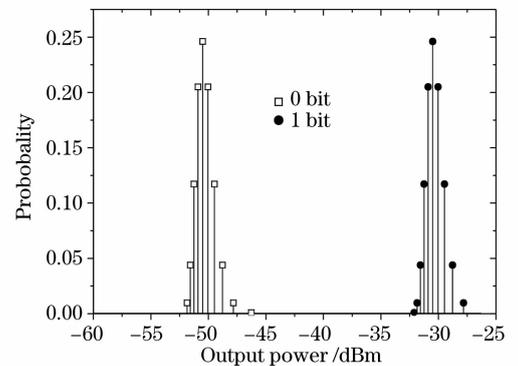


图2 复用10个信道时输出信号的分布

Fig. 2 Output signal distribution with ten channels multiplexing

-25 dBm, 消光比为 20 dB, 饱和输出功率为 10 dBm, 小信号增益为 26 dB, WDM 系统复用 10 个信道时, 输出功率的分布以及对应的几率。由图 2 可见, 当复用信道数 $N=10$ 时, 由于 SOA 的增益饱和效应, 引起输出信号“1”码和“0”码的功率在 4 dBm 范围内波动。

仅仅估计串扰引起的输出信号的波动范围还不够, 还必须计算串扰对信号误码率的影响。误码率的大小与噪声的几率分布有关, 由前面的分析可知 SOA 噪声的几率分布为高斯分布, 因此信号的误码率 R_e 由下式计算:

$$R_e = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}} \int_{(x_1-D)/\delta_M}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx + \frac{1}{2\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{(D-x_0)/\delta_s} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx = \frac{1}{2} Q\left(\frac{x_1-D}{\sqrt{\delta_{th}^2 + \delta_M^2}}\right) + \frac{1}{2} Q\left(\frac{D-x_0}{\sqrt{\delta_{th}^2 + \delta_s^2}}\right), \quad (10)$$

x_1 和 x_0 对应“1”码和“0”码的幅度, δ_1^2 和 δ_0^2 为对应的噪声方差, D 为判决门限, 式中的第一项和第二项分别对应“1”码和“0”码的误码率。具体到所讨论的情况, 系统的误码率由 N 种情况的加权平均得到

$$R_e = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N-1} p_i \left[Q\left(\frac{x_{i,1}-D}{\sqrt{\delta_{th}^2 + \delta_{i,1}^2}}\right) + Q\left(\frac{D-x_{i,0}}{\sqrt{\delta_{th}^2 + \delta_{i,0}^2}}\right) \right], \quad (11)$$

式中, $x_{i,1}$ 、 $x_{i,0}$ 表示 SOA 中共有 i 个信道传输 1 码时考察信道的“1”码“0”码的输出, p_i 为对应的几率, $\delta_{i,1}^2$ 、 $\delta_{i,0}^2$ 为对应的噪声方差。计算中取判决门限 D 为

$$D = \frac{x_{N,1}\delta_{0,1} + x_{0,1}\delta_{N,1}}{\delta_{N,1} + \delta_{0,1}}. \quad (12)$$

图 3 给出了复用信道数分别为 1、10、40 时的误码率(BER)与单信道输入光功率的关系, 由图 3 可

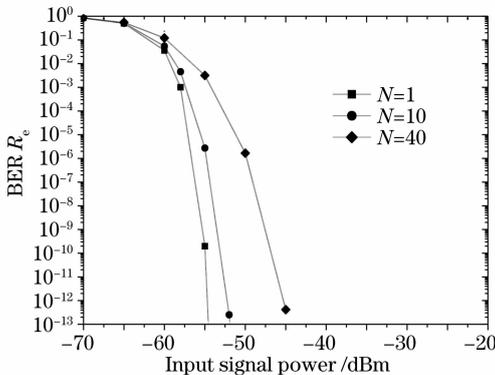


图 3 误码率与平均输入光功率的关系
Fig. 3 Bit-error-rate versus input signal power

见, 当复用信道数为 10 时, SOA 串扰引入的功率代价为 2.5 dBm, 当复用信道数为 40 时, 引入的功率代价为 9.8 dBm。

3 SOA 中串扰的抑制技术及其实验研究

SOA 引起的信道间串扰严重限制了其应用, 因此必须采取措施抑制 SOA 中串扰的发生。1996 年 Manabu Yoshino^[11] 实验证明了注入连续光可以提高 SOA 的饱和输出功率。饱和输出功率增加 SOA 的饱和程度降低, SOA 中交叉增益调制效应减弱, SOA 引起的信道间串扰减小。以下比较了有连续光注入和无连续光注入情况下误码率与输入光功率的关系。模拟中参数的选取根据实际测量的结果, 具体如下: 无连续光注入时, SOA 的小信号增益为 23.27 dB, 饱和输出功率为 3 mW; 有连续光注入时, SOA 的小信号增益为 22 dB, 饱和输出功率为 5.03 mW, 注入连续光波长为 1509.76 nm 功率为 -2.82 dBm, 为减少增益竞争, 选择注入连续光的波长位于 SOA 增益带的边缘, 这样既可以增加饱和输出功率又使小信号增益不会下降太多。图 4 给出复用 10 个信道时输入功率和误码率的关系, 由图可见, 连续光注入可以使串扰的功率代价减小 2 dBm。

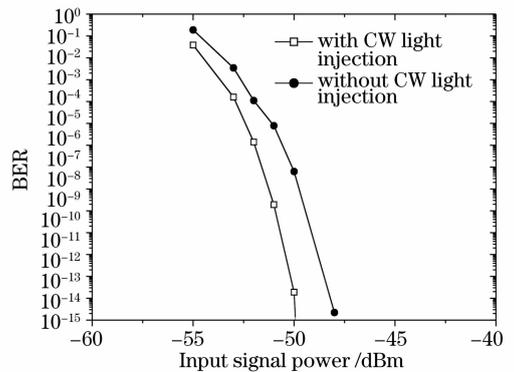


图 4 误码率与输入光功率的关系

Fig. 4 Bit-error-rate versus input signal power

以下实验考察了 40 Gb/s 系统中连续光注入对 SOA 引起串扰的抑制。图 5 给出了实验考察连续光注入抑制串扰的实验装置图, 两路分布式反馈 (DFB) 激光器产生的连续光经过 50:50 耦合器耦合, 由掺铒光纤放大器 (EDFA) 放大之后进入调制器进行调制, 调制信号光经过 25 km 的单模光纤 (SMF) 去相关, 信号光和连续光 (CW) 通过 90:10 耦合器进入 SOA, 偏振控制器 (PC) 用来控制进入 SOA 的偏振状态, 使信号获得最大的增益, 可调谐

滤波器(TF)滤出其中一路考察,CSA 是 Tektronic 公司生产的 CSA803C 型通信分析仪,用来观察输出信号的眼图。

实验中调制器输出 40 Gb/s 的非归零(NRZ)码 (2^7-1),输入 SOA 的两路信号光的波长和功率分别为: $\lambda_1 = 1554.64$ nm,功率为 -19.44 dBm; $\lambda_2 = 1563.52$ nm,功率为 -18.26 dBm;两路信号光获得的增益分别为 16.13 dB 和 16.95 dB。注入连续光波长为 1509.76 nm,功率为 -1.78 dBm,连续光获

得的增益为 2.06 dB,选择注入连续光波长远离信号光,以减小连续光和信号光之间的增益竞争。图 6 给出没有连续光注入和有连续光注入时输出信号的眼图,通过眼图比较可以看出,连续光注入可以有效地抑制 SOA 引起的信道间串扰。同时连续光注入使信号光的幅度有所降低,这是由于连续光注入提高了 SOA 的饱和输出功率但降低了 SOA 的小信号增益。

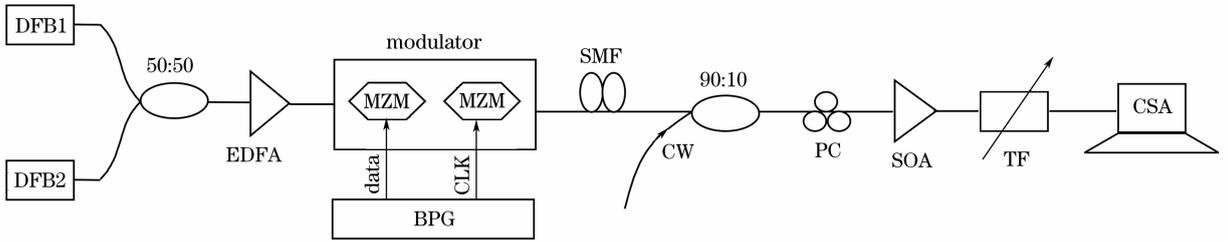


图 5 实验装置图

Fig. 5 Experimental setup

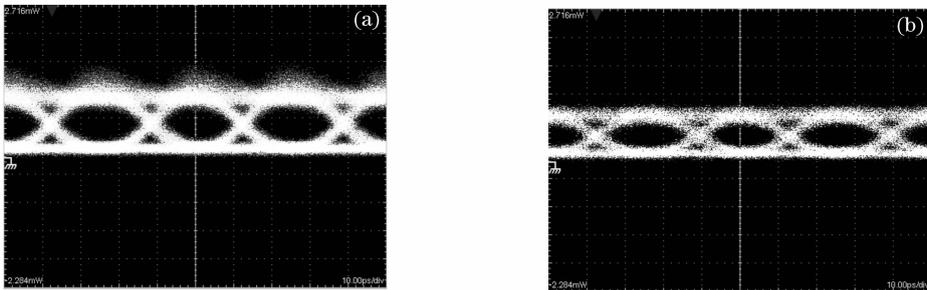


图 6 SOA 放大之后信号眼图。(a)没有连续光注入,(b)有连续光注入

Fig. 6 Signal eye diagrams after SOA amplification. (a) Without CW light injection, (b) with CW light injection

当输入 SOA 的两路信号光波长和功率分别为 $\lambda_1 = 1563.52$ nm,功率为 -14.61 dBm; $\lambda_2 = 1559.68$ nm,功率为 -15.8 dBm 时,信号光获得的增益分别为 16.36 dB 和 16.89 dB。注入连续光波长为 1509.76 nm,功率为 -2.82 dBm,连续光获得的增益为 2.21 dB。图 7 给出没有连续光注入和有

连续光注入时输出信号的眼图,通过眼图比较可以看出,注入连续光可以有效的抑制 SOA 中的信道间串扰。比较图 6 和 7 可见,下图的眼皮要厚,所以随着信号光功率的增加,信号之间的相互影响增加。这是因为随着信号功率的增加,另外一路信号对 SOA 增益的调制更加明显,因此增益饱和引起的信

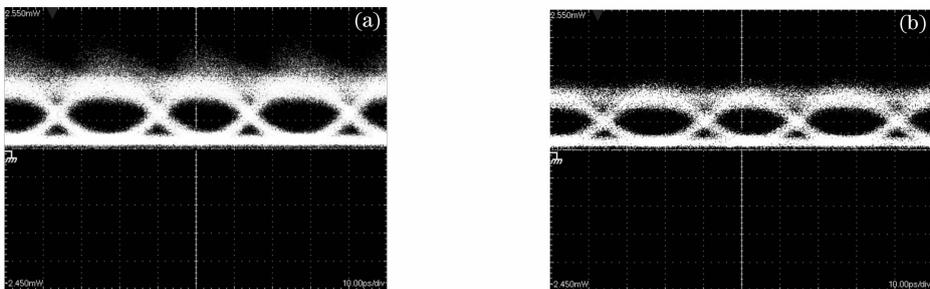


图 7 信号光功率增加,SOA 放大之后信号眼图。(a)没有连续光注入,(b)有连续光注入

Fig. 7 Signal eye diagrams after SOA amplification with larger signal power. (a) Without CW light injection,

(b) with CW light injection

道间串扰更严重。

4 结 论

对 SOA 增益饱和和引起的信道间串扰进行了研究,数值模拟了多路信道复用系统的误码率随复用信道数、光功率的变化情况。对 SOA 中串扰的抑制方法进行了理论和实验研究,数值模拟发现连续光注入可以有效抑制输出功率的波动,当复用 10 个信道时,连续光注入可以使功率代价减小 2 dBm,实验验证了两信道的 40 Gb/s 系统中,注入连续光可以减少 SOA 引起的信道间串扰。

参 考 文 献

- 1 Dong Jianji, Zhang Xinliang, Ding Yuan *et al.*. High speed wavelength conversion and format conversion based on semiconductor optical amplifier and optical filter[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(7): 940~944
董建绩,张新亮,丁园等.利用半导体光放大器和滤波器组合实现高速波长转换和码型转换[J].*中国激光*, 2007, **34**(7): 940~944
- 2 Zhang Feng, Chen Yong, Jian Shuisheng. All optical clock recovery from non return to zero data stream based on semiconductor optical amplifier and stimulated brillouin scattering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 987~992
张峰,陈勇,简水生.基于半导体光放大器和受激布里渊散射的全光非归零码时钟提取[J].*光学学报*, 2007, **27**(6): 987~992
- 3 Wei Zhang, Kun Qiu, Yun Ling *et al.*. A novel scheme of label abstraction and erasion based on Fabry-Perot semiconductor optical amplifier[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(1): 14~17
- 4 T. Mukai, K. Inoue, T. Saitoh. Signal gain saturation in two-channel common amplification wave laser amplifier[J]. *Electron. Lett.*, 1987, **23**(8): 396~397
- 5 T. Mukai, K. Inoue, T. Saitoh. Homogeneous gain saturation in 1.5 μm InGaAsP traveling-wave semiconductor laser amplifiers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**(6): 381~383
- 6 R. Ramaswami, P. A. Humblet. Amplifier induced crosstalk in multichannel optical networks [J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1990, **8**(12): 1882~1896
- 7 L. H. Tiemeijer, P. J. A. Thijs, T. V. Dongen *et al.*. Reduced intermodulation distortion in 1300 nm gain clamped MQW laser amplifier[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(5): 284~286
- 8 J. B. Khurgin, V. Igor, J. R. Meyer *et al.*. Reduced crosstalk semiconductor optical amplifier based on type-II quantum wells [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(3): 278~280
- 9 Xu Shuangmei, J. B. Khurgin. A dispersion management scheme for reducing SOA-induced crosstalk in WDM links[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(2): 417~422
- 10 K. Inoue. Crosstalk and its power penalty in multichannel transmission due to gain saturation in a semiconductor laser amplifier[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(7): 1118~1124
- 11 M. Yoshino, K. Inoue. Improvement of saturation output power in a semiconductor laser amplifier through pumping light injection [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(1): 58~59