

OPS 网络中 SOA 交换矩阵的串扰研究*

季 伟 张 民 叶培大

(北京邮电大学光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876)

摘 要 通过对光开关和节点流量进行建模, 利用新颖的等效串扰系数法, 研究了基于 XGM 效应的 SOA 开关矩阵在 OPS 网络中的串扰问题. 分析了 SOA 的各种参量以及节点流量特性对开关隔离度、节点中由串扰造成的误码率以及节点级联能力的影响. 提出了优化 SOA 交换矩阵的具体措施, 包括提高 SOA 的载流子寿命、控制脉冲能量和节点中流量的单播特性, 以及降低 SOA 的饱和能量和有源区长度等.

关键词 串扰; 半导体光放大器; 光分组交换; 交叉增益调制

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

0 引言

光分组交换(OPS)技术的发展使得在交换节点处不需对光分组拆分和重组, 保持了对数据的速率、格式和协议等透明性, 从而大大提高了对小粒度和高突发性的 IP 业务流的传送效率^[1]. OPS 技术的发展也对光信号的质量提出了更高的要求. 在各种导致光信号损伤的因素中, 光分组通道之间的串扰是重要因素之一. 所以, 很有必要研究串扰产生的机理, 及其对 OPS 系统的影响. 目前人们已经对基于电路交换的光网络中的串扰问题进行了广泛而较深入地研究^[2~4]. 同时为满足 OPS 技术对高速交换单元的要求, 人们不断推出新型的交换结构^[5,6]. 其中半导体光放大器(SOA)被证明可以用来组成交换矩阵^[7]和门阵列^[8]. 这些器件都是组成 OPS 网络交换节点的关键器件.

在各种 SOA 交换开关结构中, 基于 SOA 中 XGM 效应的光开关是最常用的一种. 到目前为止, 尚没有 SOA 参量对其交换矩阵中串扰性能影响方面的研究报告. 而对它的研究将是非常具有实际意义和应用价值的. 本文在基于 XGM 效应的 SOA 光开关进行建模的基础上, 采用新颖的等效串扰系数法, 对其组成的交换矩阵进行串扰分析. 同时建立了一个流量模型, 用来描述 OPS 节点中流量的单播和多播特性. 进而首次对 SOA 参量在不同流量特性下对交换节点串扰性能的影响进行了深入研究.

1 光开关原理

基于 SOA 中 XGM 效应的光开关及其交换矩

阵结构, 如图 1. 在开关处于‘闭合’状态时, 没有控制光输入, SOA 处于高增益状态, 所以可以获得高输出信号功率. 当开关处于‘断开’状态时, 控制光的高能量使 SOA 处于增益饱和状态, 从而使输出信号的功率大大降低, 接近于零输出状态. 使用 EDFA 是为了提高控制脉冲的能量, 从而在开关需要断开时, 使 SOA 更快的达到深度饱和状态. 利用

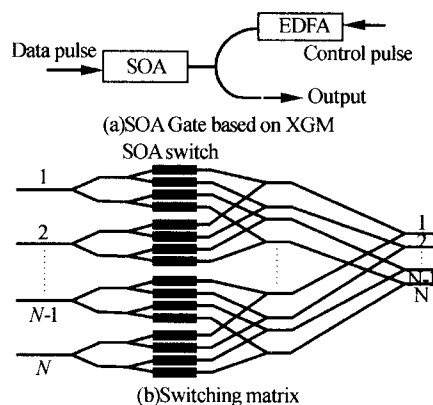


图 1 基于 XGM 效应的光开关及交换矩阵结构
Fig. 1 Schematic diagram of the OPS switch based on SOA gate

参考文献[9]中的 SOA 模型, 定义脉冲在 SOA 中的传输时间: $T_{\text{TRAN}} = Ln_{\text{SOA}}/c$, 式中 L 、 n_{SOA} 分别为 SOA 的有效长度和有效折射率. 当脉冲宽度为皮秒级即与脉冲在 SOA 中的传输时间 T_{TRAN} 接近时, SOA 的长度以及由谱烧孔和载流子加热效应引起的非线性增益压缩效应($\epsilon = \epsilon_T + \epsilon_{\text{SHB}}$)就必须加以考虑. SOA 的动态增益和输入脉冲能量变化特性可以由下方程描述

$$\frac{\partial g(z,t)}{\partial t} = g_0 - \frac{g(z,t)}{\tau_c} - \frac{g(z,t)}{1 + \epsilon P(z,t)} \frac{P(z,t)}{E_{\text{SAT}}} \quad (1)$$

$$\frac{\partial P(z,t)}{\partial z} = \frac{g(z,t)}{1 + \epsilon P(z,t)} P(z,t) \quad (2)$$

式中 g_0 为小信号增益, τ_c 为 SOA 的载流子寿命, E_{SAT} 为饱和能量. 为计算输出能量, 假设^[10]

* 本项目受国家自然科学基金(编号:60372100), 高校博士
科研基金(编号:20030013004)资助
Tel:010-62281188 Email:jivwww@163.com
收稿日期:2004-11-01

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} dz \int_0^L g(z, \tau) \delta(\tau - t \pm zn_{\text{SOA}}/c) dz \quad (3)$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{1 + \epsilon \exp(h) P(0, t)} \left\{ \frac{h_0 - h}{\tau_c} - \epsilon [\exp(h) - 1] \cdot \frac{dP(0, t)}{dt} - [\exp(h) - 1] P(0, t) \left[\frac{\epsilon}{\tau_c} + \frac{1}{E_{\text{sat}}} \right] \right\} \quad (4)$$

SOA 的增益可表示为

$$G(t) = \exp \left\{ \int_0^L g(z, t) / [1 + \epsilon P(z, t)] dz \right\} \quad (5)$$

光开关的输出功率为

$$P_{\text{out}}(t) = P_{\text{in}}(t) G(t) \quad (6)$$

2 串扰分析

OPS 的结点结构如图 2. 在 $N \times N$ 的 OPS 结点中, 所有的光分组经过解复用器到 SOA 交换矩阵中, 矩阵中的每个 SOA 光开关对应唯一的输入输出波长, 经过交换操作, 相同目的端口的分组通过复用器复用到一起.

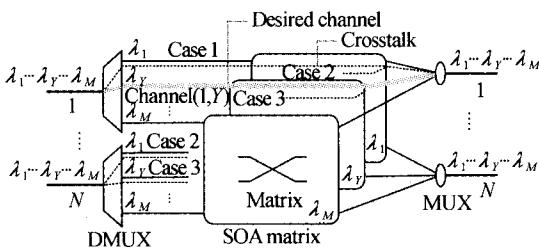


图 2 $N \times N$ OPS 结点
Fig. 2 $N \times N$ OPS Node

交换节点中的串扰分为同波长串扰 (HOC: homo-wavelength crosstalk) 和异波长串扰 (HEC: hetero-wavelength crosstalk) 两大类. 其中后者可被光滤波器滤除, 因而不会给光信号造成严重的损伤. 所以只关注同波长串扰的问题. 节点中的 SOA 交换矩阵、输入端的解复用器和输出端的复用器等器件的隔离特性不理想, 是造成串扰的因素. 假设 Channel(i, λ_Y) 代表 λ_Y 波长通道交换到 i 输出端口, Channel($1, \lambda_Y$) 为所要研究的受扰通道, 如图 2 中暗线. 串扰产生途径主要有三种: 1) Channel($1, \lambda_Y$) 的光功率从波分解复用器泄漏到 $\lambda_{Y \pm 1}$ 波长通道, 经过交换矩阵后再由波分复用器/耦合器从 $\lambda_{Y \pm 1}$ 波长通道回到 Channel($1, \lambda_Y$) 通道, 形成线性同波长串扰. 即光功率的串扰途径是 Channel($1, \lambda_Y$) \rightarrow Channel($1, \lambda_{Y \pm 1}$) \rightarrow Channel($1, \lambda_Y$). 2) 具有波长 λ_Y 的其他光分组通道 Channel(i, λ_Y) ($i = 2, \dots, N$) 经过解复用器、和复用器的泄漏, 给 Channel($1, \lambda_Y$) 带来串扰. 3) 具有波长 λ_Y 的其他光分组通道 Channel(i, λ_Y) ($i = 2, \dots, N$) 经过单波长交换矩阵的泄漏, 给 Channel($1, \lambda_Y$) 引入串扰. 在 1), 2) 中, 只考虑光功率在解复用器中泄漏到相邻两个波长通道的情形,

是因为与相邻波长通道相比, 其它通道所得到的泄漏功率很小所以可以忽略不计.

设 ϵ_{DMUX} 、 ϵ_{MUX} 和 ϵ_{SW} 分别是波分解复用器、复用器和单波长交换矩阵的串扰系数, 与光器件的隔离度成反比, 即等于串扰功率与受扰信号功率的比值, 单位是 dB. ϵ_i 是通道 Channel(i, λ_Y) 上的等效串扰系数

$$\epsilon_i = 2\epsilon_{\text{DMUX}}\epsilon_{\text{MUX}} + \epsilon_{\text{SW}}, i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

Channel(X, λ_Y) 的输出功率为^[11]

$$P_{X,Y}(t) = E_0^2 d_{X,Y}^2(t) + 2E_0^2 d_{X,Y}(t) \sum_{i=1}^k \sqrt{\epsilon_i} \cdot d_{i,Y}(t) \cos[\varphi_{X,Y}(t) - \varphi_{i,Y}(t)] \quad (8)$$

式中 $\varphi_{i,Y}(t)$ 为 Channel(i, λ_Y) 的相位, $d_{i,Y}(t)$ 是通道 Channel(i, λ_Y) 上的比特指示符, 定义为: $d_{i,Y}(t) = \begin{cases} 1, & \text{for data '1'} \\ 1/r, & \text{for data '0'} \end{cases}$, 式中, r 是光信号的消光比. 当

$\varphi_{X,Y}(t) - \varphi_{i,Y}(t) = k\pi, k \in Z$ 时, 串扰源 Channel(i, λ_Y) 的极化方向与受扰通道 Channel(i, λ_Y) 相同或相反, 串扰达到极大值. 因此, Channel(X, λ_Y) 上数据“1”的光功率在区间 $[E_0^2(1 + 2\sqrt{\epsilon_i}), E_0^2(1 - 2\sqrt{\epsilon_i})]$ 内抖动, 数据“0”的光功率在区间 $[E_0^2(r^2 + 2\sqrt{\epsilon_i}), E_0^2(r^2 - 2\sqrt{\epsilon_i})]$ 内抖动. 如果这两个区间重合, 就会造成严重的误码. 式(8)中的第 2 项为 k 个有相同极化方向的串扰源所产生的总噪声功率, 即

$$N_k(t) = 2E_0^2 d_{X,Y}(t) \sum_{i=1}^k \sqrt{\epsilon_i} d_{i,Y}(t) \cdot \cos[\varphi_{X,Y}(t) - \varphi_{i,Y}(t)] \quad (9)$$

假设这 k 个串扰项是独立同分布的随机变量, 则串扰噪声功率的方差为

$$\sigma_k^2 = E\{N_k^2(t)\} - E^2\{N_k(t)\} = kE_0^2 d_{X,Y}^2(t) (1 + r^2) \quad (10)$$

根据中心极限定理, 可以用高斯分布来近似地表示这 k 个串扰源所产生的误码率^[9]

$$P_{e,k} = \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[\int_{I_D - I_0}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx + \int_{I_D - I_0}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \right] \quad (11)$$

式中, $\sigma_{1,k}^2$ 和 $\sigma_{0,k}^2$ 分别是串扰数据“1”和“0”的噪声方差. 由串扰导致的误码率可以表示为

$$\text{BER} = \sum_{k=1}^N P(k) P_{e,k} \quad (12)$$

式中, $P(k)$ 是有 k 个串扰源处于开启状态的概率; $P_{e,k}$ 是这 k 个串扰源导致误码的概率, 由式(11)确定. $P(k)$ 可以表示为

$$P(k) = \binom{k}{N} (P_{\text{ON}})^k (1 - P_{\text{ON}})^{N-k} \quad (13)$$

式中 P_{ON} 是串扰源处于开启状态的平均概率. 建立一个非平衡流量模型来描述节点中的流量特性^[13], i 端口的流量强度 T_i 即为该通道的开启概率 $(P_{ON})_i$.

$$T_i = \frac{1-f}{1-f^N} f^{i-1} \quad (i=1,2,\dots,N, f \geq 0) \quad (14)$$

式中 f 为流量非平衡因子, 用来区分单播和多播等不同流量特性, 可以得到以下情况

1) 单播流量:

A: $f=0$, 此时 $T_1=1, T_k=0 (k=2,3 \dots N)$, 所有分组均从 1 端口输出, 所以此时节点为单播流量特性;

B: $f=\infty$, 此时 $T_k=0 (k=1,2 \dots N-1), T_N=1$, 节点所有分组流量均由 N 端口输出.

2) 多播流量:

A: $f=1$, 此时所有到达节点的分组以相同的概率 $1/N$, 去往 $k (k=1,2 \dots N)$ 输出端口, 节点流量为平衡的多播流量;

B: $f>1$, 随着 f 的增大, 分组去往大端口号输出端的概率增大, 节点中多播流量的不平衡性提高, 其特性也随之向单播流量特性接近;

C: $f<1$, 随着 f 的减小, 分组从小端口号输出端输出的概率增大, 流量的不平衡性也随之提高.

3 数值模拟与讨论

设定 SOA 的小信号增益系数 $g_0=25$ dB, 输入信号能量: $E_{in}=0.002$ pJ, 信号消光比 $r=30$ dB, SOA 的折射率 $n_{SOA}=3.62$, 信号光和控制光均为高斯脉冲, 脉宽为 10 ps, 交换节点中复用器/解复用器的隔离度为 -25 dB, 节点规模为 8×8 , Channel(8, λ_V) 为要研究的受扰信道.

图 3 给出了在不同的控制脉冲能量和流量特性下, 开关的隔离度和交换节点误码率与 SOA 饱和能量间的关系. $f=1.2$ 和 $f=1.4$ 代表节点中分组流量的不同特性, 其中后者表示的流量更为不平衡, 更接近于单播流量特性. 可以得到结论: 在相同的 SOA 饱和能量和流量条件下, 提高控制脉冲的能量可以提高开关的隔离度和降低交换节点中由于串扰引起的误码率. 在相同的控制脉冲能量下, 高的 SOA 饱和能量会降低开关和交换节点的性能.

SOA 的饱和能量可表示为: $E_{sat} = \frac{hc}{\lambda_0 a} \frac{wd}{\Gamma}$, 式中 w 和 d 分别为 SOA 有源区的宽度和高度. Γ 和 a 分别为载流子的束缚因子和常规增益因子, λ_0 为控制脉冲波长. 所以在相同的控制脉冲能量下, 减小 SOA 有源区的高度和宽度以及增大控制脉冲波长

都可以有效抑制交换矩阵的串扰.

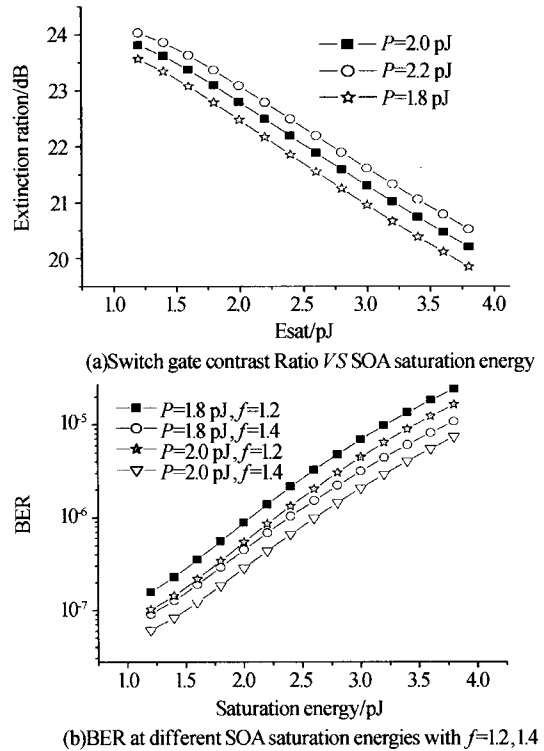


图 3 饱和和能量对系统性能的影响

Fig. 3 System performance in cases of various saturation energies

图 4 描述了开关比和节点中的误码率与 SOA 中载流子寿命之间的关系. 由图中可以得到, 增加

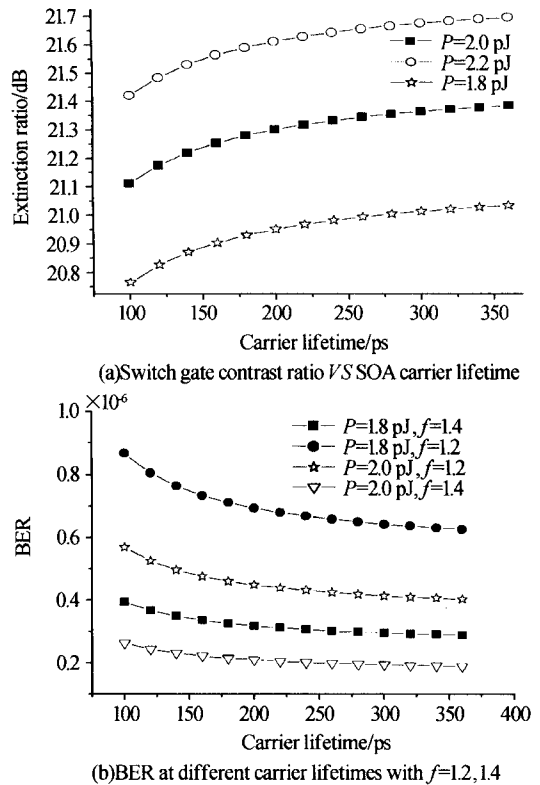


图 4 载流子寿命对系统性能的影响

Fig. 4 System performance in cases of various carrier lifetimes

载流子的寿命可以提高开关的隔离度,降低交换节点的串扰. 其原因是提高载流子寿命可以抑制 SOA 中的差分增益对开关比的影响. 载流子寿命主要受 SOA 中三种不同效应的影响,自发辐射以及两种非辐射效应 SRH(Shockley Reed Hall)和 AM(Auger Mechanisms)效应. 如何控制这三种效应是提高 SOA 载流子寿命的关键.

图 5 给出了 SOA 有源区的长度对开关比和误

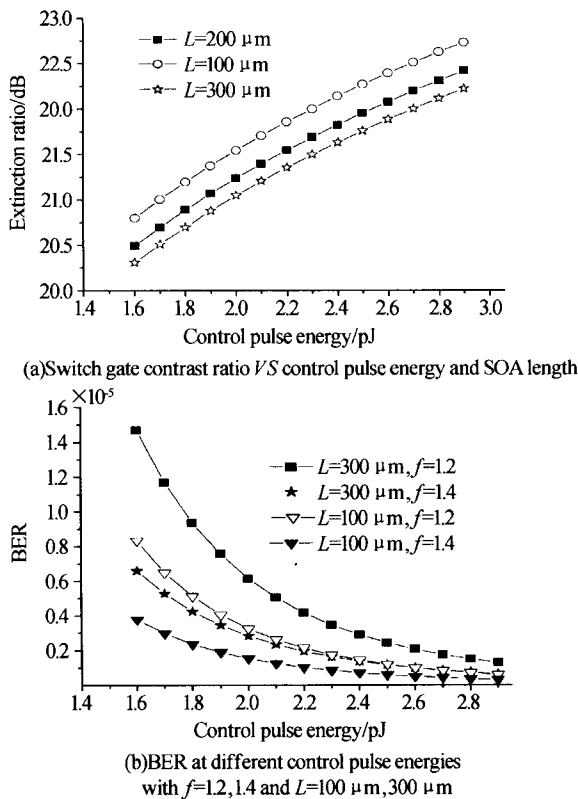


图 5 不同 SOA 长度下系统的性能

Fig. 5 System performance in cases of various control pulse energies and SOA length

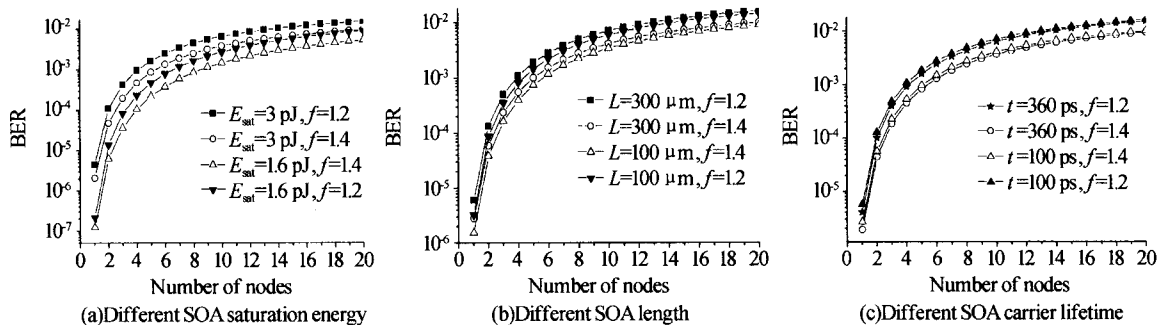


图 6 SOA 参量对节点级联能力的影响

Fig. 6 SOA parameter impact on the switch cascaded capability

从图 6 中可以得到:降低 SOA 的饱和能量、有源区长度以及提高载流子寿命和节点中流量的不平衡程度都可以在相同的级联数目下,更好的抑制串扰、降低误码率.

率的影响. 由图中可以得到在相同的条件下,缩短 SOA 有源区的长度可以获得高的开关隔离度,降低交换节点中由串扰引起的误码率. 这是因为 SOA 的增益是相当于在对其长度进行积分后得到的,缩短 SOA 的长度,可以减小积分时间,从而使 SOA 更快的达到深度饱和状态.

由图 3、4、5 还可以得到节点中流量的不平衡对串扰的影响. 如图 3(b),在相同的控制脉冲能量和 SOA 饱和能量下,不同的 f 值对应明显不同的误码率水平,同样的结论也可从图 4(b)中得出. 例如载流子寿命为 200 ps,控制脉冲能量为 1.8 pJ, f 为 1.2, 1.4 时,误码率分别对应为 7.1×10^{-6} 和 3.2×10^{-6} ,即相同条件下,更接近于单播特性的流量对应小的节点串扰. 图 5(b)中,在低控制脉冲能量下, $L=300 \mu\text{m}$, $f=1.4$ 对应的误码率水平低于 $L=100 \mu\text{m}$, $f=1.2$ 所对应的,这是因为虽然前者交换矩阵的开关比小于后者,但其流量更接近于单播流量特性. 而在控制脉冲能量提高即串扰降低时,会得到一个相反的结果. 由此可以得到在高串扰情况下,流量的不平衡对降低串扰有着更显著的作用.

交换节点在网络中的级联能力是衡量其性能的重要指标,图 6(a), (b), (c) 分别给出了在控制脉冲能量为 2pJ 时,不同的 SOA 饱和能量,有源区长度和载流子寿命在不同的流量特性下所对应的不同的节点级联能力. 随着级联的节点数增加,虽然路径上的通带宽度越来越窄,即节点级联使等效的滤波效应更强,但同波长串扰由于占用相同的波长而不会被滤除,反而被逐渐积累起来. 所以同波长串扰引起的误码率随节点级联数增加而急剧上升,使得光分组通道的最大跳数受到严重限制.

4 结论

以上研究表明,分组交换节点中的串扰与组成交换矩阵的 SOA 的饱和能量、载流子寿命、有源区长度以及节点中的流量特性有着密切的关系. 提高

载流子寿命和控制脉冲能量,降低 SOA 的饱和能量和有源区长度,以及使节点的中流量向单播特性接近,都可以减小节点中的串扰,降低误码率并提高节点的级联能力.

通过对交换节点串扰特性的分析建模,并考虑 SOA 参量和流量特性对其的影响,提出了一种新颖的方法,可扩展用于分析各种 OPS 节点中的串扰问题. 其分析结果对交换节点的实际构建有着重要的指导意义.

参考文献

- Guillemot C, Renaud M, Gambini P, *et al.* Transparent optical packet switching: The european ACTS KEOPS project approach. *IEEE J Lightwave Technol*, 1998, **16**(12): 2117~2134
- Lars G. Scalability of optical multiwavelength switching networks: Crosstalk analysis. *IEEE J Lightwave Technol*, 1999, **17**(1): 58~67
- Tim G. Crosstalk analysis of multiwavelength optical cross connects. *IEEE J Lightwave Technol*, 1999, **17**: 1273~1283
- Dai Wuju, Zhang Hanyi, He Yongqi. The effect of extinction ratio in the analysis of crosstalk. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5): 529~533
- Bao Junfeng, Zou Yongzhuo, Wu Xingkun. A micro machining-based miniature 1×2 MEMS optical switch. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 949~951
- Wang Zhangtao. Yu jinzhong modeling of $N \times N$ integrated optical switch array. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(7): 773~776
- Berlo W van, Janson M, Lundgren L, *et al.* Polarization-insensitive, monolithic 4×4 InGaAsP-InP laser amplifier gate switch matrix. *IEEE Photon Technol Lett*, 1995, **7**(11): 1291~1293
- Dorgeuille F, Grieshaber W, Pommereau F, *et al.* First array of 8 CG-SOA gates for large-scale WDM space switches. *European Conf Optical Communications'98*, 1998, **9**(9): 255~256
- Tang J M, Spencer P S, Shore K A. Influence of fast gain depletion on the dynamic response of TOAD's. *J Lightwave Technology*, 1998, **16**(1): 86~91
- Xie Chongjin, Ye Peida. Analysis of all-optical demultiplexer based on semiconductor optical amplifier. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(6): 526~533
- Zhang Min, Peida Ye, Fan Zhang, *et al.* Performance analysis of homowavelength crosstalk in optical packet networks. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2003, **36**(6): 474~479
- Xu S, Khurgin Jacob B, Vurgaftman I. Reducing crosstalk and signal distortion in wavelength division multiplexing by increasing carrier lifetimes in semiconductor optical amplifiers. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, **21**(6): 1474~1484
- Eramo V, Listanti M. Input wavelength conversion in optical packet switches. *IEEE Communications Letters*, 2003, **7**(6): 281~284

The Crosstalk Peculiarity of SOA Switch Gates In Optical Packet Switching

Ji Wei, Zhang Min, Ye Peida

Key Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876

Received date: 2004-11-01

Abstract The crosstalk modeling of switching matrix based on the XGM in SOA for optical packet-switched networks is presented. Crosstalk-induced bit error rate (BER) and switch cascaded capability under unbalanced traffic are examined, which proves to be relevant to the SOA parameters, the traffic model unbalanced degree, the control pulse energy and so on. Several rules are drawn to facilitate the design of SOA-based switching matrix under unbalanced traffic.

Keywords Crosstalk; Semiconductor Optical Amplifier (SOA); Optical Packet Switching (OPS); Cross Gain Modulation (XGM)



Ji Wei was born in Shandong, China and in 1977. He got his B. S. degree from Shandong University in 2000 and M. S. degree from Beijing Institute of Technology in 2003. He is currently working as a Ph. D. candidate at Beijing University of Posts and Telecommunications. His interests include high-speed optical communication systems and networks and optical switching.