

# 基于半导体光放大器-马赫曾德尔干涉仪级联结构的全光 3 位比较器的仿真

张丽梅 王 智 陈颖川 吴重庆

(北京交通大学理学院发光与光信息教育部重点实验室光信息科学与技术研究所, 北京 100044)

**摘要** 全光信号处理是高速光通信网络的一个关键技术。光头识别作为实现全光分组交换的关键技术之一, 通过使用全光比较器可以实现。提出基于半导体光放大器-马赫曾德尔干涉仪(SOA-MZI)级联结构的全光 3 bit 比较器, 通过数值模拟对其进行了仿真研究, 仿真速率为 10 Gb/s。模拟结果显示输出信号质量良好, 峰值功率超过 7 mW, 消光比为 48 dB, 脉冲半峰全宽(FWHM)8.5 ps。输出脉冲具有较高的强度和稳定性。

**关键词** 光通信; 信号处理; 半导体光放大器; 马赫曾德尔干涉仪; 比较器

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.s105009

## Simulation of 3-bit All Optical Comparator Based on the Cascade SOA-MZIs

Zhang Limei Wang Zhi Chen Yingchuan Wu Chongqing

(Key Laboratory of Luminescence and Optical Information, Ministry of Education, Institute of Optical Information, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract** All-optical signal processing is a key technology in high speed optical communication network. The label/head processing as a key technology of optic packet switching can be realized by using the all optical comparator. A 3-bit all optical comparator based on cascaded semiconductor optical amplifier-Mach-Zehnder interferometer (SOA-MZI) is demonstrated at 10 Gb/s by simulation. An extinction ratio of 48 dB and peak power values higher than 7 mW are found at the output. A fall width at half maximum (FWHM) of 8.5 ps is obtained for the output pulses from the comparator. The output pulses have a high intensity and a high stability.

**Key words** optical communications; signal processing; semiconductor optical amplifier; Mach-Zehnder interferometer; comparator

**OCIS codes** 060.1155; 060.4510; 230.3750

## 1 引 言

目前光纤通信正向着超高速、大容量方向发展, 因此需要在通信节点处具有极高的信息包交换速度。而全光分组交换因为不需要光-电-光转换, 能够直接在光层上实现交换, 从而成为实现高速交换的有效途径之一。其中, 光标签处理是一项重要技

术, 一个标签含有一个地址, 其他信息包含在信息包中, 标签被全光识别, 利用这种方式可以实现高速开关而不需要将整个信息包进行光-电转换。光头提取与识别是实现高速标签交换的关键技术, 而光头识别可以通过使用全光比较器得以实现。当信息包进入比较器, 如果光头和一个预先设定好的模式相

**收稿日期:** 2012-01-01; **收到修改稿日期:** 2012-03-02

**基金项目:** 国家自然科学基金(61077048)、北京市自然科学基金(4092031)、基本科研业务费(2009JBM103)和中央高校基本科研业务费专项资金(2012JBM103)资助课题。

**作者简介:** 张丽梅(1977—), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事光纤通信、全光信号处理等方面的研究。

E-mail: lmzhang@bjtu.edu.cn

**导师简介:** 王 智(1971—), 男, 博士, 教授, 主要从事光纤通信、集成光电子器件和全光信号处理等方面的研究。

E-mail: zhiwang@bjtu.edu.cn

匹配,在输出功率中适当的时间处产生一个峰,然后将这个信号用于控制一个光开关进行路由。全光比较器现已成为人们的研究热点之一,对于幅度调制的信号,目前已经有几种光比较器的方法被证实。基于半导体光放大器(SOA)的高非线性效应实现的全光比较器,Gopalakrishnapillai等<sup>[1]</sup>提出了基于SOA的XNOR门,其利用SOA的交叉增益调制(XGM)实现同或运算输出。但对于多位比较,此装置不具备真正意义的比较器的功能,而且不适用于仿真速率为10 Gb/s以上系统。基于无源光纤布拉格光栅(FBG)阵列的比较器,McGeehan等<sup>[2,3]</sup>提出的利用FBG实现的比较器,结构简单、成本低,但比较器的数量由需要比较的比特位决定,且信号速率改变或通信网升级时不可重配置。Geraghty等<sup>[4]</sup>提出的空间4-f比较器,实现了4 bit 100 Gb/s帧头信号的识别,但系统存在正交性及信号漂移的问题。此外还有自由空间的全息滤波器<sup>[5]</sup>,以及具有光延迟的金属镜<sup>[6]</sup>等。

目前基于SOA的全光信号处理技术与器件得到了广泛的研究和应用。其中主要是基于SOA中的交叉相位调制(XPM)、XGM、四波混频(FWM)等非线性效应实现的。基于SOA和半导体光放大器-马赫曾德干涉仪(SOA-MZI)已经能实现各种全光逻辑,包括与(AND)、或(OR)、非(NOT)、异或(XOR)、或非(NOR)等<sup>[7~11]</sup>。其中,Sun等<sup>[9]</sup>提出的基于SOA-MZI的XOR逻辑,速率达到了80 Gb/s。LASAGNE项目组基于SOA-MZI结构分别利用级联和反馈两种方式实现了2 bit比较器<sup>[12,13]</sup>。级联方式所需的SOA数量由待比较的字节决定, $N$ 位比较器需要 $2N$ 个SOA。而反馈式比较器无论要比较几个字节,只需要2个SOA,克服了级联式成本高、结构复杂的缺点。但是光脉冲在反馈光纤中相位及偏振态的变化,往往造成系统不稳定。LASAGNE项目组实现的级联方式和反馈方式比较器均为2 bit比较器,消光比均为13 dB。目前报道的全光比较器多数是2 bit比较器。本文基于级联结构的SOA-MZI形成了3 bit全光比较器,并通过数值模拟对其进行了仿真研究。结果显示,在信号速率为10 Gb/s的条件下,系统的消光比达到48 dB,输出脉冲的峰值功率超过了7 mW。

## 2 SOA-MZI 级联结构工作原理

基于SOA-MZI级联结构的全光3 bit比较器

的结构如图1所示。每个SOA-MZI由2个SOA和6个 $2 \times 2$ 耦合器构成。基本原理如下:信号A和信号B由左侧输入到SOA-MZI1中,同时还有一个控制脉冲C由右侧输入,反向传输。控制信号C与信号A和信号B在SOA中传输,发生交叉相位调制作用,当信号A和信号B相同时,控制脉冲C在两个SOA中经历相同的相移和增益,因此经耦合器干涉后不能由左侧输出,即输出为0。当信号A和信号B不同时,控制脉冲C在两个SOA中经历不同的相移和增益,可以使脉冲C经耦合器后由左侧输出,调节信号A和B的峰值功率,可使输出最强。因此输出信号是信号A和信号B的逻辑XOR。由SOA-MZI1输出端输出的信号作为SOA-MZI2的控制信号输入到其反向输入端。信号A和信号B的第2 bit经延迟后与控制信号同时输入到SOA-MZI2中。经过交叉相位调制作用后,输出信号仍是执行了逻辑XOR功能。同样将SOA-MZI2的输出信号作为SOA-MZI3的控制信号输入到其反向输入端。信号A和信号B的第3 bit经延迟后与控制信号同时输入到SOA-MZI3中,XOR后结果由SOA-MZI3的输出端输出。

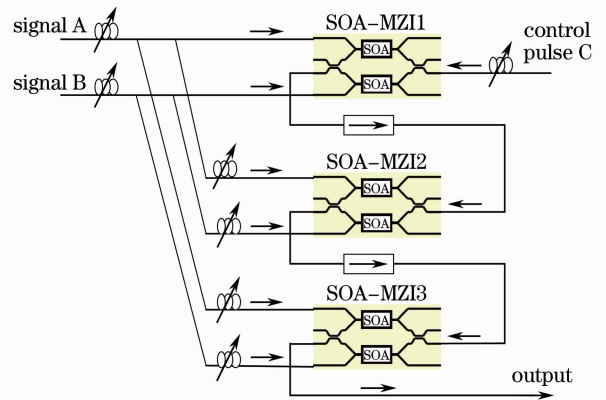


图1 全光3 bit比较器结构图

Fig.1 Structure of 3 bit comparator

通过级联的SOA-MZI结构,可以得到的逻辑关系为

$$\text{Output} = \begin{cases} 0, & \text{if } A \neq \bar{B} \\ 1, & \text{if } A = \bar{B} \end{cases} \quad (1)$$

## 3 仿真模型

对基于SOA-MZI级联结构的全光3 bit比较器模型进行数值模拟。

光信号在SOA中的传输过程可以描述为<sup>[14]</sup>

$$\frac{\partial A(z, T)}{\partial z} = \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A(z, T)}{\partial T^2} + \frac{1}{2} \frac{g - \epsilon_2 P^2}{1 + \epsilon_1 P} \times A(z, T) - \frac{i}{2} \left[ \alpha_N g - \alpha_T \frac{\epsilon_1 g P + \epsilon_2 P^2}{1 + \epsilon_1 P} A(z, T) \right] - \left( \Gamma_2 \gamma + i \Gamma_2' \frac{\omega_0}{c} n_2 \right) \frac{1}{\sigma} P A(z, T) - \frac{1}{2} \alpha_{\text{int}} A(z, T), \quad (2)$$

$$\frac{\partial g}{\partial T} = \frac{g_0 - g}{\tau_s} - \frac{1}{E_{\text{sat}}} \frac{g - \epsilon_2 P^2}{1 + \epsilon_1 P} P - \frac{\Gamma_2 \alpha_N \gamma}{h\nu \sigma^2} P^2, \quad (3)$$

式中  $A(z, T)$  是光信号的慢变振幅,  $P = |A(z, T)|^2$ ,  $\beta_2$  是二阶群速度色散系数,  $\epsilon_1$  是由载流子加热和光谱烧孔引起的非线性增益压缩系数,  $\epsilon_2$  是由双光子吸收引起的非线性增益压缩系数,  $\alpha_N$  和  $\alpha_T$  分别是传统线宽增强因子和温度线宽增强因子,  $\alpha_{\text{int}}$  是内部损耗系数,  $\Gamma_2$  和  $\Gamma_2'$  分别是与双光子吸收和非线性折射率有关的限制因子,  $\gamma$  是双光子吸收系数,  $n_2$  是非线性折射率系数,  $g_0$  和  $E_{\text{sat}}$  是 SOA 的小信号增益和饱和能量,  $\sigma$  是有源区的有效面积,  $a_N$  是微分增益系数,  $h\nu$  是光子能量,  $\tau_s$  是载流子寿命,  $\omega_0$  是信号光的中心角频率,  $c$  是真空光速。

SOA-MZI 结构中所用的耦合器分光比为 50:

50, 其传输矩阵为  $\begin{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & j\frac{\sqrt{2}}{2} \\ j\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{pmatrix}$ , 因此振幅为  $A_1$  和

$A_2$  的信号进入耦合器后, 两个输出端输出信号的振幅  $A_3$  和  $A_4$  满足

$$\begin{pmatrix} A_3 \\ A_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & j\frac{\sqrt{2}}{2} \\ j\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

利用(2)~(4)式对光信号在 SOA-MZI 中的传输进行分析, 其中光信号在 SOA 中的传输利用分步傅里叶法<sup>[15]</sup>进行数值仿真。选取的参数如表 1 所示。模拟时, 信号 A 和信号 B 均为 10 Gb/s 的归零码 (RZ) 信号, 半峰全宽是 10 ps, 峰值功率为 2.5 mW。反向传输的控制脉冲 C 的重复速率为 1 GHz, 半峰全宽为 25 ps, 峰值功率为 1 mW。

## 4 仿真结果与讨论

对于 3 bit 比较器, 信号 A 和信号 B 各有 8 种不同模式, 组合在一起有 64 种情况, 下面只给出几种不同的数据模式组合, 以评估此比较器的性能。图 2 显示的是 6 种不同的输入信号模式: (I) A: [0 0 1], B: [0 1 0], (II) A: [1 1 0], B: [0 1 1], (III) A: [1 1 0], B: [0 0 1], (IV) A: [1 1 1], B: [0 0 1], (V) A: [1 0 1], B: [0 1 1], (VI) A: [1 0 0], B: [0 1

表 1 SOA 的仿真参数列表

Table 1 List of parameters of the SOA emulation

Parameters	Value
Length of the amplifier $L$ / m	$5 \times 10^{-4}$
Coefficient of loss $\alpha_{\text{int}} / \text{m}^{-1}$	$2 \times 10^3$
Traditional linewidth enhancement factor $\alpha_N$	5.0
Nonlinear gain compression factor corresponding to CH and SHB $\epsilon_1 / \text{W}^{-1}$	0.2
Confinement factor for TPA $\Gamma_2$	0.5
Small signal gain $g_0 / \text{dB}$	20
Group velocity dispersion $\beta_2 / (\text{s}^2 / \text{m})$	$5 \times 10^{-24}$
Area of the active region $\sigma / \text{m}^2$	$1.5 \times 10^{-12}$
General gain coefficient $a_N / \text{m}^2$	$3 \times 10^{-20}$
Coefficient of TPA $\gamma / (\text{m} / \text{W})$	$3.7 \times 10^{-10}$
Temperature linewidth enhancement factor $\alpha_T$	1.1
Nonlinear gain compression factor corresponding to TPA $\epsilon_2 / \text{W}^{-2}$	200
Confinement factor for nonlinear refraction $\Gamma_2'$	0.4
Nonlinear gain refractive index $n_2 / (\text{m}^2 / \text{W})$	$-3.5 \times 10^{-16}$
Saturated energy $E_{\text{sat}} / \text{J}$	$6.91 \times 10^{-12}$
Carrier lifetime $\tau_s / \text{s}$	$5 \times 10^{-11}$

1]。图 2(a)和(b)分别是信号 A 和信号 B, 图 2(c)是第 1 个 SOA-MZI 的输出, 也是信号 A 和信号 B 的第 1 位的逻辑 XOR。图 2(d)是第 2 个 SOA-MZI 的输出, 图 2(e)是第 3 个 SOA-MZI 的输出, 也就是由(1)式所给出的逻辑结果。只有图 2(III)和图 2(VI)因 A 和 B 满足  $A = \bar{B}$ , 因此有脉冲输出。由图可见, 基于 SOA-MZI 级联结构形成的全光 3 bit 比较器, 输出信号的脉冲形状同输入的高斯脉冲很接近, 但略有变形, 左右不再严格对称, 但信号质量仍然很好。图 2(III)输出脉冲的峰值功率超过了 7 mW, 输出脉冲的半峰全宽为 8.5 ps, 消光比为 48 dB。图 2(VI)输出脉冲的峰值功率达到了 8 mW, 输出脉冲的半峰全宽为 8.7 ps, 消光比 50 dB。输出端的信号也很适用于控制光网络节点中的光触发器。

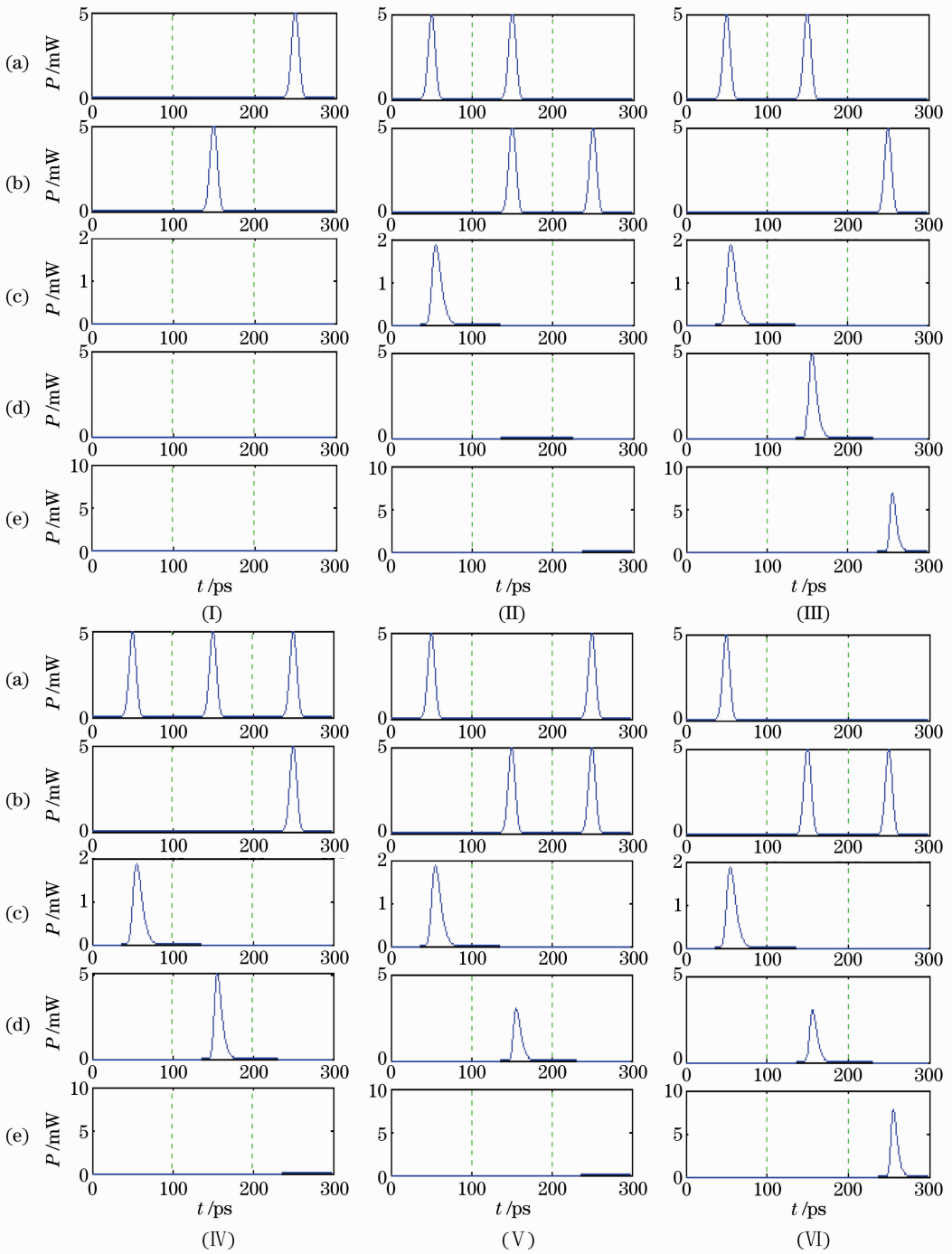


图 2 逻辑结果

Fig. 2 Logic results

## 5 结 论

以 SOA-MZI 为基本结构, 利用 SOA 的交叉相位调制作用实现了一种 3 bit 全光比较器, 对其进行了仿真研究, 从理论上证实了该方案的可行性。对几种不同的输入信号进行了数值模拟, 仿真结果显示, 对于 10 Gb/s 的信号速率, 输出脉冲消光比可以达到 48 dB, 脉冲峰值功率超过 7 mW。基于 SOA-

MZI 的 3 bit 全光比较器, 不仅结构上比较简单, 而且输出信号的质量较好。这一方案的其他优点是具有较高的输出脉冲强度, 高稳定性以及与其他器件的易集成性。

## 参 考 文 献

- 1 B. S. Gopalakrishnapillai, K. L. Lee, A. Nirmalathas *et al.*. Polarization and bit-length independent all-optical logic gatebased

- active correlator for bit serial label processing[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2006, OThS5
- 2 J. E. McGeehan, M. C. Hauer, A. B. Sahin *et al.*. Multiwavelength-channel header recognition for reconfigurable WDM networks using optical correlators based on sampled fiber Bragg gratings [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(10): 1464~1466
  - 3 M. C. Hauer, J. E. McGeehan, S. Kumar *et al.*. Optically assisted internet routing using arrays of novel dynamically reconfigurable FBG-based correlators [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(11): 2765~2778
  - 4 D. F. Geraghty, R. Salem, M. A. Foster *et al.*. Asimplified optical correlator and its application to packet-header recognition [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(7): 487~489
  - 5 J. Widjaja, N. Wada, Y. Ishii *et al.*. Photonic packet address processor using holographic correlator[J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(11): 703~704
  - 6 J. D. Shin, M. Y. Jean, C. S. Kang. Fiber-optic matched filter with metal films deposited on fiber delay-line ends for optical packet address detection [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(7): 941~943
  - 7 N. Elfaramawy, A. Awad. All-optical logic circuits based on the non-linear properties of the semiconductor optical amplifier[C]. IEEE, Computers and Communications, ISCC 2004, 2004, **1**: 270~275
  - 8 G. Berrettini, A. Malacarne, P. Ghelfi *et al.*. Reconfigurable all-optical logic gate based on a single SOA with improved dynamics[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2006, OFJ5
  - 9 Hongzhi Sun, Qiang Wang, Hao Dong *et al.*. All-optical logic xor gate at 80 Gb/s using SOA-MZI-DI[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2006, **42**(8): 747~751
  - 10 Zhang Xinliang, Dong Jianji, Wang Ying *et al.*. Experimental and theoretical investigation on novel all-optical logic and gates [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(5): 2066~2071  
张新亮, 董建绩, 王颖等. 新型全光逻辑与门的理论和实验研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(5): 2066~2071
  - 11 Zhao Chan, Zhang Xinliang, Dong Jianji *et al.*. Investigation on all-optical logic AND and NOR gates based on the same structure [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(8): 4150~4155  
赵婵, 张新亮, 董建绩等. 基于同一结构实现全光逻辑与门和或非门的研究[J]. *物理学报*, 2006, **55**(8): 4150~4155
  - 12 J. M. Martinez, F. Ramos, J. Marti. All-optical packet header processor based on cascaded SOA-MZIs [J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(14): 894~895
  - 13 J. M. Martinez, J. Herrera, F. Ramos *et al.*. All-optical correlation employing single logic XOR gate with feedback [J]. *Electron. Lett.*, 2006, **42**(20): 1170~1171
  - 14 J. M. Tang, K. A. Shore. Strong picosecond optical pulse propagation in semiconductor optical amplifiers at transparency [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(7): 1263~1269
  - 15 G. P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics[M]. Third Edition, San Diego: Academic Press, 2001

栏目编辑:殷建芳