

一种应用于强度与相位调制信号的全光异或逻辑门方案

段杰^{1,2} 温钰¹ 谢小平^{1,2}

¹ 西安通信学院, 陕西 西安 710106

² 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119

摘要 提出一种能够同时应用于强度调制与相位调制信号的全光异或(XOR)逻辑门方案,利用 π 相移后两束光信号的直接干涉来实现异或逻辑操作。通过仿真验证了该方案对输入为强度调制与相位调制信号的异或操作的可行性与有效性。在输入为10 Gb/s强度调制信号,两输入信号占空比小于0.4,峰值功率相同时,异或输出Q因子为103;当输入为10 Gb/s,调制深度为 π 的相位调制信号时,异或输出Q因子为272。

关键词 光通信;全光异或门;干涉;相位调制;强度调制

中图分类号 O438 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.030602

An All-Optical XOR Logic Gate Scheme for Phase-Modulated or Amplitude-Modulated Signals

Duan Jie^{1,2} Wen Yu¹ Xie Xiaoping^{1,2}

¹ Xi'an Telecommunication College, Xi'an, Shaanxi 710106, China

² State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

Abstract An all-optical XOR logic gate for phase-modulated (PM) or amplitude-modulated (AM) signals is proposed. It achieves XOR operation by direct interference of light. Through simulation, this scheme is proved to be effective for XOR operation of PM or AM signals at 10 Gb/s. When the inputs are AM signals of which the duty cycle is less than 0.4 and the peak powers are equal, the Q factor of XOR output is 103. When the inputs are PM signals with π phase modulation depth, the Q factor of XOR output is 272.

Key words optical communications; all-optical XOR gate; interference; phase modulation (PM); amplitude modulation (AM)

OCIS codes 060.2330; 200.3050; 200.3760

1 引言

随着网络带宽需求的增长,单信道传输速率已经逼近电子速率的极限。全光信号处理技术具有超高速率的潜质,有望突破电子速率瓶颈,使得网络单信道传输速率大大增加。在全光信号处理技术中全光异或(XOR)逻辑门是其重要组成部分,它可以用于光标签或分组交换、门限判决、数据编码、奇偶校验、信号再生和全光数据加密等重要功能^[1~6]。目前,实现全光异或逻辑门通常基于非线性效应,由于半导体光放大器(SOA)与高非线性光纤(HNLF)较好的非线性特性^[7~11],所以全光异或逻辑门通常利用这两种材料来实现。利用HNLF的全光异或逻辑门方案主要基于四波混频(FWM)效应^[12]和交叉相位调制(XPM)效应^[13,14];利用SOA的全光异或逻辑门方案主要基于交叉相位调制(XPM)效应^[15~17],交叉增益调制(XGM)

收稿日期: 2012-12-25; 收到修改稿日期: 2013-01-15; 网络出版日期: 2013-01-31

基金项目: 国家自然科学基金(60907026)和国际科技合作项目(2010DFA14640)资助课题。

作者简介: 段杰(1986—),男,硕士研究生,主要从事光通信物理层安全方面的研究。E-mail: duanjiedemail@163.com

导师简介: 谢小平(1976—),男,博士,副教授,主要从事高速光通信网关键技术方面的研究。

E-mail: xxp@opt.ac.cn

效应^[18]。在以上方案中,除 HNLF-FWM 的全光异或逻辑门方案外,其余方案都仅能应用于输入为强度调制(AM)信号的情况。但是基于 HNLF-FWM 的全光异或逻辑门方案转换效率低、体积庞大难以集成的缺点限制了其实际应用。

本文提出了一种能够同时应用于输入为相位调制(PM)与强度调制信号的全光异或逻辑门方案,该方案通过输入信号的直接干涉实现异或操作,由于没有采用任何非线性介质,因而避免了基于 HNLF-FWM 的全光异或门方案转换效率低的缺点,并且结构简单,易于集成。通过仿真验证了该方案在速率为 10 Gb/s,调制格式为相位调制或强度调制情况下的可行性与有效性,并且分析了强度调制信号输入情况下不同“峰值功率比”(PPR)对异或输出信号 Q 因子的影响以及相位调制信号输入情况下相位调制器的调制相移稳定性对输出信号 Q 因子的影响。

2 全光异或逻辑门原理

目前的光纤通信系统普遍采用的信号调制格式为强度调制。对于强度调制(AM)信号而言,如表 1 所示,异或逻辑是指当两信号码字相同时,输出为“0”,当两信号码字不同时,输出为“1”。

表 1 强度调制异或逻辑操作结果

Table 1 Result of XOR operation for AM signals input

Input 1	0	1	1	0
Input 2	0	1	0	1
XOR output	0	0	1	1

通过表 1 可以发现强度调制信号异或逻辑的规律。两信号的异或结果与两信号的直接耦合结果所不同之处在于:对于异或操作而言,当两输入信号码字同时为“1”时,异或的输出为“0”。因此,如果能够实现两输入信号为“1”的情况下,耦合输出为 0,其他输入情况下耦合输出不变,那么这种“特殊的耦合”就是两强度调制信号的异或逻辑操作。

而对于相位调制(PM)信号,当脉冲周期内调制相位为 π 时,该周期码字记为“1”,当调制相位为 0 时,该周期码字记为“0”。如表 2 所示,两相位调制信号耦合时会发生干涉,当脉冲周期内相位相同时,干涉相长,输出高功率光脉冲,记为“1”;当相位相差为 π 时,干涉相消,输出低功率光脉冲,记为“0”。

表 2 相位调制信号耦合干涉结果

Table 2 Result of coupling and interference of PM signals input

Input 1 (code/modulated phase)	0/0	$1/\pi$	$1/\pi$	0/0
Input 2 (code/modulated phase)	0/0	$1/\pi$	0/0	$1/\pi$
Coupler output	1	1	0	0

对比表 1 和表 2 可以看出,相位调制信号耦合输出结果与异或结果恰好相反。因此,如果能够产生与表 2 所示耦合结果相反的输出即能够实现两相位光信号的异或逻辑操作。

为满足上述强度调制信号与相位调制信号的异或逻辑操作对耦合的特殊要求,本文设计如图 1 所示结构。相位或强度调制信号 A 通过 π 移相器后,信号的各码元周期均发生 π 相移,此信号与相同调制格式的信号 B 在耦合器中耦合干涉,具体干涉过程如图 2,图 3 所示。

如图 2 所示,假设信号 A(010100111)与信号 B(011001101)均为强度调制信号,它们的初始相位均为 0。当信号 A 通过 π 移相器之后,相位变为 π ,但强度不发生改变(如图 2 中 A* 所示)。信号 A* 与信号 B 在耦合器中相遇并发生干涉,干涉服从以下公式:

$$I_{\text{out}} = I_{A^*} + I_B + 2\sqrt{I_{A^*} I_B} \cos \Delta\phi, \quad (1)$$

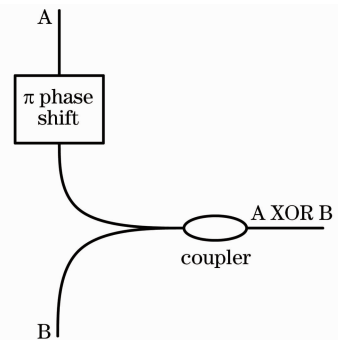


图 1 应用于相位与强度调制信号全光异或门结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the all optical XOR gate for PM and AM signal

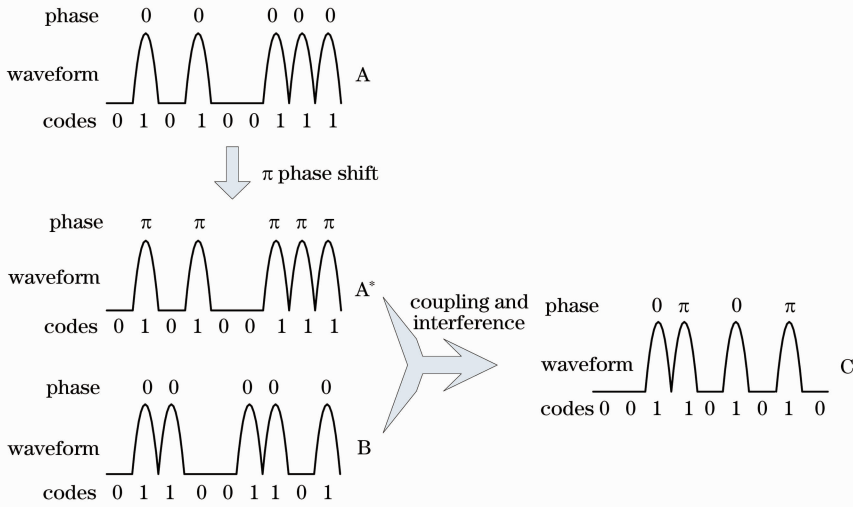


图2 强度调制信号异或逻辑过程

Fig.2 Process of XOR operation with AM signals input

式中 I_{out} 为干涉输出光强, I_{A^*} 与 I_B 为耦合器输入光强, $\Delta\phi$ 为信号 A^* 与 B 的相位差。当 A, B 同时为 1 时, $I_{A^*} = I_B = I$, 则(1)式可写作

$$I_{out} = 2I + 2I\cos \Delta\phi. \tag{2}$$

当信号 A 与 B 仅有一个为 1 时, (1)式可写作

$$I_{out} = I_{A^*} \text{ or } I_{out} = I_B. \tag{3}$$

当 A^* , B 同为 1 时, 根据(2)式可知, 由于 $\Delta\phi = \pi$, 所以 $I_{out} = 0$; 当 A, B 中仅有一个为 1 时, 根据(3)式可知, I_{out} 为 I_{A^*} 或 I_B ; 当 A, B 同为 0 时, 由(1)式可知, $I_{out} = 0$ 。如图 2 所示, 干涉结果(C:001101010)恰好满足信号 A 与 B 的异或逻辑操作。由此可知, 当强度调制信号 A 经过 π 相移后再与信号 B 耦合, 即为上文中提到的“特殊的耦合”。

如图 3 所示, 信号 A(010100111)与信号 B(011001101)均为相位调制信号, 其中 1 码的调制相位为 π , 0 码的调制相位为 0, 信号强度保持不变。当信号 A 通过 π 移相器后, 其各个码元周期的相位发生 0, π 间反转(如图 3 中 A^* 所示)。当信号 A^* 与信号 B 在耦合器中相遇时, 会发生干涉, 耦合干涉过程服从表 2 所示规律, 干涉输出结果如图 3 所示。可以看出, A^* 与 B 的干涉输出恰好为信号 A 与信号 B 的异或逻辑运算结果(001101010)。因此, 对两路相位调制信号中一路做 π 相移之后的耦合干涉, 即完成了原始两路信号的异或逻辑操作。

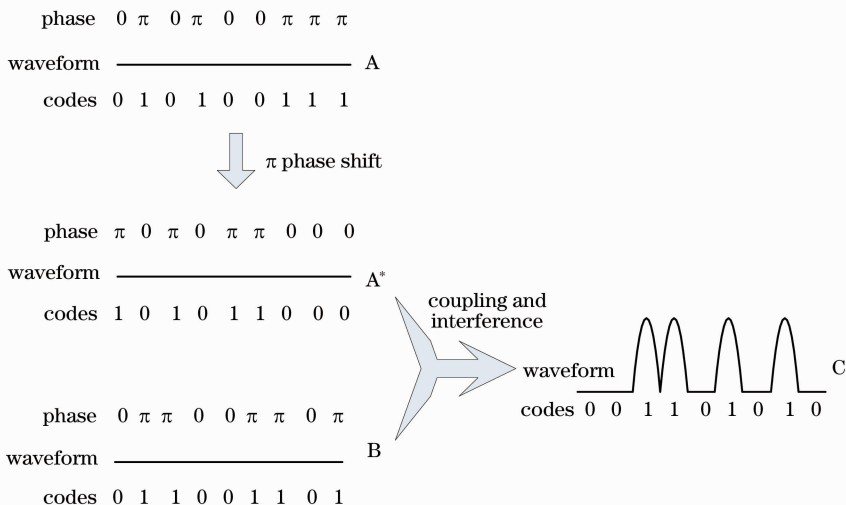


图3 相位调制信号异或逻辑过程

Fig.3 Process of XOR operation with PM signals input

3 仿真验证

3.1 输入为强度调制信号情况的仿真

如图 4 所示,在信号源部分,为了产生相干光信号 A 与 B,用于光电调制的连续光来自同一连续(CW)光源,其光功率为 10 mW,线宽为 10 mHz,波长为 1550 nm。耦合器 1 和耦合器 2 均为 3 dB 耦合器。利用马赫-曾德尔调制器(MZM1,MZM2)对连续光进行外调制,产生波长为 1550 nm,速率为 10 Gb/s,调制深度为 20 dB,峰值功率为 5 mW,占空比为 0.3 的伪随机高斯脉冲信号 A 与 B。信号 A 经过移相器之后,发生 π 相移。通过调节光衰减器(VOA)的大小,使得进入耦合器 2 的信号 A* 与信号 B 的脉冲峰值功率相同。光延时线(ODL)用来调节信号 B 的时延,使得信号 A* 与信号 B 的脉冲能够同步进入耦合器 2。两个偏振控制器用来调节信号 A* 与 B 的偏振方向相同。两个偏振控制器用来调节信号 A* 与 B 的偏振方向相同。

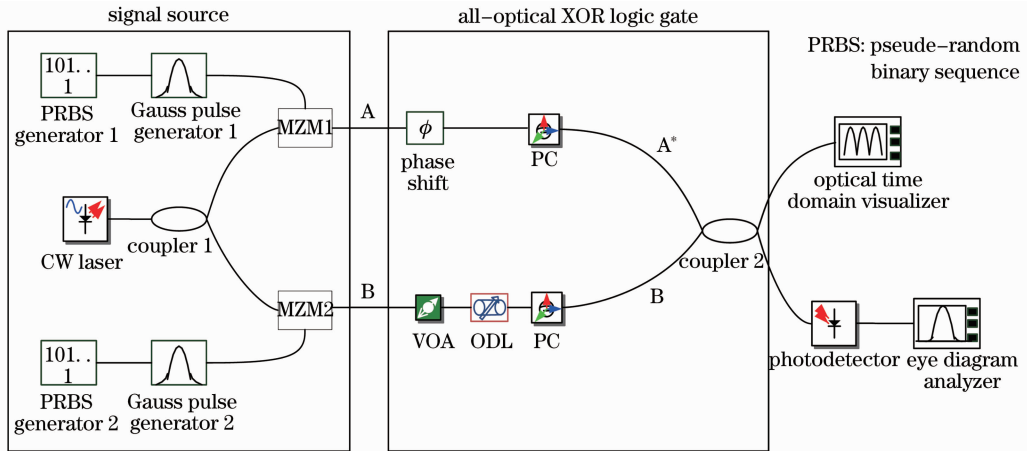


图 4 10 Gb/s 强度调制信号输入全光异或门仿真结构

Fig. 4 Simulation setup of the all-optical XOR gate with 10 Gb/s AM signals input

图 5 给出了信号 A 与 B 前 16 个周期的脉冲波形,可以看出,信号 A 的码序列为 1001001010110001,信号 B 为 11111110110110001,耦合器 2 的输出信号(C)为 0110110001101000。图 6 给出了耦合器 2 输出信号的眼图,利用 optisystem7.0 软件的眼图分析功能,将耦合器 2 输出与 A,B 的直接异或结果对比,得到耦合器 2 输出信号误码率(BER)为 0,Q 因子为 103。

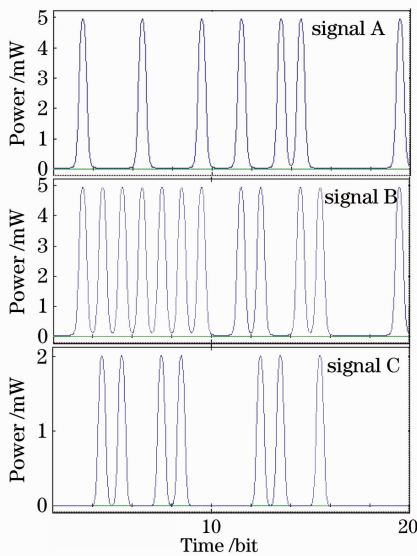


图 5 10 Gb/s 信号 A,信号 B 与全光异或门输出 C 波形图

Fig. 5 Waveforms of signal A, signal B and the output of all-optical XOR gate C at 10 Gb/s

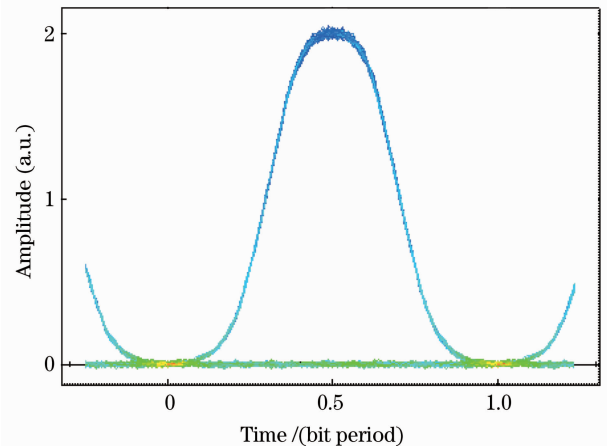


图 6 10 Gb/s 全光异或门输出眼图

Fig. 6 Output eye diagram of the all-optical XOR gate at 10 Gb/s

3.2 输入为相位调制信号情况的仿真

在 10 Gb/s 的情况下,应用于相位调制信号仿真与强度调制信号仿真系统不同之处在于前者将图 4 中的 MZM 替换为相位调制器。相位调制器的相位调制关系为,当伪随机二进制序列(PRBS)发生器产生码字为 1 时,相位调制器对连续光产生 π 相移,当码字为 0 时,不产生相移。信号 A 的码序列为 11111110110110001,信号 B 的码序列为 10010010101100001。

图 7(a)为相位调制信号 A 与信号 B 经过全光异或门的输出信号波形图。从图中可以看到输出码序列为 01101100011010000。利用 Optisystem 7.0 的眼图分析功能,将耦合器 2 输出与信号 A,B 的直接异或结果对比,得到耦合器 2 输出信号误码率为 0,Q 因子为 272。

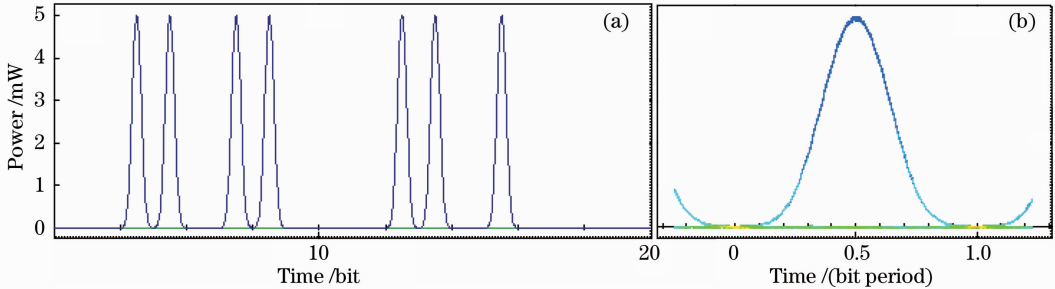


图 7 (a) 10 Gb/s 全光异或门输出波形图;(b)10 Gb/s 全光异或门输出眼图

Fig.7 (a) Waveform and (b) eye diagram of the XOR output at 10 Gb/s

4 仿真分析

4.1 强度调制信号

以输入为强度调制信号,速率为 10 Gb/s 情况为例,分析输入信号占空比与“峰值功率比”对全光异或逻辑门输出信号 Q 因子的影响。其中,将“峰值功率比”定义为

$$R_{PP} = 10 \lg \frac{P_A}{P_B}, \quad (4)$$

式中 P_A, P_B 分别为信号 A 与 B 的峰值功率。

如图 8 所示,在两信号峰值功率比由 0 dB 线性增大至 0.5 dB 的过程中,异或输出 Q 因子开始时下降较快,而后下降趋势逐渐减慢。由此可知,在峰值功率比接近 0 dB 时,异或输出 Q 因子对峰值功率比变化非常敏感。因此,为了得到较好的输出,须使输入两信号的峰值功率相近且保持稳定。

4.2 对于相位调制信号

由于普通相位调制器存在调制相移的啁啾,因此在这里分析当两个调制器“1”码存在调制相移差时对异或输出的影响,如图 9 所示。

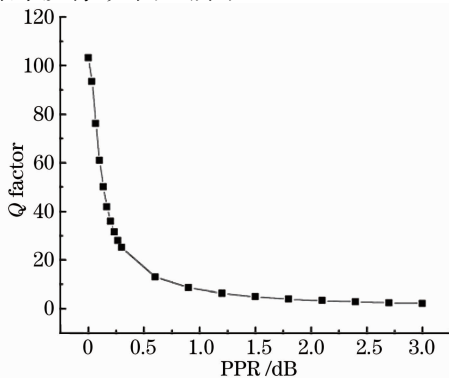


图 8 信号 A,B 峰值功率比不同时异或输出 Q 因子的大小

Fig.8 Q factor of XOR output at different PPR of input signals A and B

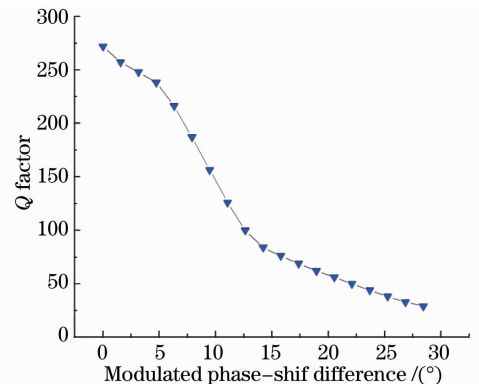


图 9 “1”码调制相移差对异或输出 Q 因子的影响

Fig.9 Q factors at different modulated phase-shif differences of code “1”

由图 9 可以看出,当两调制器的“1”码调制相移差越大,异或输出 Q 因子越小,当两调制器调制相移差小于 8° 时, Q 因子下降趋势较缓慢,当相移差继续增大时,异或输出 Q 因子降低较快。

5 结 论

提出了一种应用于强度调制与相位调制信号的全光异或逻辑门方案,该方案结构简单、紧凑,易于集成。通过仿真,实现了速率为 10 Gb/s 的强度调制或相位调制信号全光异或逻辑操作,并分析了输入强度调制信号的占空比与“峰值功率比”对全光异或逻辑门输出信号 Q 因子的影响。仿真结果表明:在不改变方案结构的基础上,可将其应用于两种调制格式信号的全光异或逻辑操作;对于相位调制信号,当两调制器的调制稳定性控制在 8° 以下时,可以获得较好的异或输出。

参 考 文 献

- 1 T. Fjelde, A. Kloch, D. Wolfson *et al.*. Novel scheme for simple label-swapping employing XOR logic in an integrated interferometric wavelength converter[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(7): 750~752
- 2 K. L. Hall. All-optical bit pattern generation and matching[J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(13): 1214~1215
- 3 A. J. Pousite, K. J. Blow, R. J. Manning *et al.*. All-optical pseudorandom number generator[J]. *Opt. Commun.*, 1999, **159**(4): 208~214
- 4 Kousik Mukherjee. A method of implementation of frequency encoded all optical encryption decryption using four wave maxing[J]. *Optik*, 2011, **122**(16): 1407~1411
- 5 Chang Wanson, Seok Lee, Gil Sang *et al.*. Realization of 10 Gb/s optical encryption and decryption by using cross-gain modulation[C]. Proceedings of 32nd Conference on Optical Fibre Technology, 2007
- 6 Wang Yaping, Wu Chongqing, Wang Zhi *et al.*. An encryption-decryption method using XOR gate based on the XPM between O-band and C-band light waves[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(7): 074219
- 7 Wang Ju, Yu Jinlong, Luo Jun *et al.*. Investigation of 40 Gb/s all-optical serial to parallel conversion to 8-channel 5 Gb/s [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0506001
王 菊, 于晋龙, 罗 俊 等. 40 Gb/s 至 8 路 5 Gb/s 全光串并转换实验研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(5): 0506001
- 8 Wang Wenrui, Yu Jinlong, Luo Jun *et al.*. 40 Gb/s reconfigurable all-optical logic gate based on nonlinear optical loop mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(5): 0506003
王文睿, 于晋龙, 罗 俊 等. 基于非线性光纤环镜的 40 Gb/s 可重构光逻辑门[J]. 光学学报, 2012, **32**(5): 0506003
- 9 Meng Tianhui, Yu Jinlong, Wang Ju *et al.*. 2×40 Gb/s all-optical 3R regeneration system using four-wave mixing in dispersion shifted fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(8): 0806004
孟天晖, 于晋龙, 王 菊 等. 基于色散位移光纤中四波混频效应的 2×40 Gb/s 全光 3R 再生系统[J]. 光学学报, 2012, **32**(8): 0806004
- 10 Hui Zhanqiang, Zhang Jianguo. Recent progress in all-optical NRZ-to-RZ format conversion[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(6): 060003
惠战强, 张建国. 全光非归零(NRZ)到归零(RZ)码型转换技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(6): 060003
- 11 Wang Shunyan, Jiang Yang, Wu Cinan *et al.*. Experimental study on all-optical clock recovery of all-fiber mode-locking cavity configuration[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(5): 0505005
王顺艳, 江 阳, 吴次南 等. 全光纤锁模腔结构的全光时钟提取实验研究[J]. 中国激光, 2012, **39**(5): 0505005
- 12 Lanlan Li, Jian Wu, Jifang Qiu *et al.*. Reconfigurable all-optical logic gate using four-wave mixing (FWM) in HNLF for NRZ-PolSK signal[J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(19): 3608~3612
- 13 Jifang Qiu, Kai Sun, Matrin Rochette *et al.*. Reconfigurable all-optical multilogic gate (XOR, AND, and OR) based on cross-phase modulation in a highly nonlinear fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(16): 1199~1201
- 14 M. Jinno, T. Matsumoto. Ultrafast all-optical logic operations in a nonlinear Sagnac interferometer with two control beams [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(4): 220~222
- 15 T. Houbavlis, K. Zoiros, A. Hatziefremidis *et al.*. 10 Gbit/s all-optical Boolean XOR with SOA fiber sagnac gate[J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(19): 1650~1652
- 16 Qiang Wang, Guanghao Zhu, Hongmin Chen *et al.*. Study of all-optical XOR using Mach-Zehnder interferometer and differential scheme[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2004, **40**(6): 703~710
- 17 Yunfeng Zhou, Jian Wu, Jintong Lin. A novel 40 Gb/s all-optical XOR logic gate[C]. Proceedings of Lasers and Electro-Optics Society A7nnual Meeting Conference, 2004. 995~996
- 18 Jae Hun Kim, Young Min Jhon, Young Tae Byun *et al.*. All-optical XOR gate using semiconductor optical amplifiers without additional input beam[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(10): 1436~1438