

文章编号: 0258-7025(2009)09-2367-05

利用单个半导体光放大器实现非反转归零码的可重构全光逻辑门

韩丙辰^{1,2} 于晋龙¹ 张立台¹ 王文睿¹ 江 阳¹ 张爱旭¹ 杨恩泽¹

(¹ 天津大学电子信息工程学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

² 山西大同大学物理与电子科学学院, 山西 大同 037009

摘要 提出了一种新型非反转归零(RZ)码的可重构全光逻辑门方案。该方案基于单个半导体光放大器(SOA)和可调谐光带通滤波器(TOBPF)。利用 SOA 的四波混频效应和交叉增益调制(XGM)效应,实现了 RZ 码信号的多功能逻辑运算。在不改变实验装置的情况下,通过调节带通滤波器中心波长和信号光功率,可以在不同逻辑功能之间进行切换。实验实现了 10 Gb/s 全光信号间的“与”,“非”,“或非”,“同或”,“ $\bar{A}\cdot B$ ”,“ $A\cdot\bar{B}$ ”等基本逻辑运算。与用连续光作为探测光不同的是,本方案采用了时钟信号作为探测光,这样各个逻辑门的输出均为非反转 RZ 码,有利于不同逻辑门的进一步组合。

关键词 光通信; 全光逻辑门; 半导体光放大器; 四波混频; 交叉增益调制

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093609.2367

Reconfigurable All-Optical Logic Gates with Not-Inverted Data Technique by Using Single Semiconductor Optical Amplifier

Han Bingchen^{1,2} Yu Jinlong¹ Zhang Litai¹ Wang Wenrui¹ Jiang Yang¹

Zhang Aixu¹ Yang Enze¹

(¹ Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology, Ministry of Education, School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China
² School of Physics and Electronic Science, Shanxi Datong University, Datong, Shanxi 037009, China)

Abstract A reconfigurable all-optical logic gates with not-inverted data technique is demonstrated by using a single semiconductor optical amplifier (SOA) and a tunable optical band-pass filter (TOBPF). Based on cross-gain modulation (XGM) and four-wave mixing (FWM) in the SOA, multiple Boolean calculation of the return-to-zero signal is realized, and different logical functions are switched by adjusting band-pass filter center wavelength and optical signal power. In the experiment, all-optical multiple logic gates of AND, NOT, NOR, NXOR, $\bar{A}\cdot B$, and $A\cdot\bar{B}$ functions at 10 Gb/s are demonstrated without changing the experimental setup. In order to obtain not-inverted RZ data, the clock signal is used for the probe signal which is benefit to combining the basic logics to complicated logic gates.

Key words optical communication; all-optical logic gates; semiconductor optical amplifier; four-wave mixing; cross-gain modulation

收稿日期: 2008-08-04; 收到修改稿日期: 2008-12-25

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60736035), 国家自然科学基金(60572013), 国家 863 计划(2007AA01Z272), 天津市自然科学基金(06YFJMJC01400)和教育部新世纪人才计划资助项目。

作者简介: 韩丙辰(1976—), 男, 博士研究生, 主要从事高速光纤通信方面的研究。E-mail: han_bchen@126.com

导师简介: 于晋龙(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高速光纤通信系统、光微波和光纤传感等方面的研究。

E-mail: yujinlong@tju.edu.cn

1 引 言

在光域中实现各种逻辑功能已成为未来光网络亟待解决的问题。为此,研究人员已经提出了多种全光逻辑门的实现方案,包括:基于级联单端半导体光放大器(SOA)中交叉增益调制(XGM)效应的新型全光逻辑与门^[1],基于超快非线性干涉仪(UNI)实现异或(XOR)功能^[2],利用 SOA 的交叉增益调制特性实现 XOR 功能^[3],利用两级级联 SOA 实现全光与门^[4,5]和或非(NOR)功能^[6],利用级联 SOA 实现逻辑与门^[7],基于周期性极化铌酸锂波导(PPLN)的逻辑与门^[8]等。上述各种全光逻辑的实现技术各有优势。国内外的研究者们也采用单个 SOA 实现了逻辑“或非”,“同或”,“非”和“与”门等多种高速全光逻辑^[3~9]。这些方案中采用了连续光作为探测光,故输出的信号是反转的归零(RZ)码格式,不利于逻辑信号的进一步组合。

本文提出了一种新型的基于单个 SOA 和可调谐光带通滤波器(TOBPF)并采用时钟脉冲序列作为探测光的可重构全光逻辑门方案。利用 SOA 的四波混频(FWM)和交叉增益调制效应,通过调整带通滤波器的中心波长和信号光、探测光的功率,实现了“ $A \cdot B$ ”,“ \bar{A} ”,“ $\bar{A} \cdot \bar{B}$ ”,“ $\bar{A} \cdot B$ ”,“ $A \cdot \bar{B}$ ”,“ $A \odot B$ ”等全光逻辑功能。实验中采用了时钟脉冲序列而不是连续光作为探测光,避免了在 SOA 中采用连续光

发生 XGM 效应时的 RZ 码型反转问题。根据 XGM 效应特点,当采用连续光作为探测光时,其输出码型必然是反转的,因此对一些应用带来不便^[10]。例如由反转码信号提取的时钟信号质量要劣于由相同幅度的非反转码信号提取的时钟信号质量;而在脉冲形状为高斯形的高速率 RZ 码中,反转码的平均功率要高于非反转码且信号波形不理想,严重影响反转码信号在常规单模光纤中的传输质量。对于全光逻辑而言,基本逻辑输出如果为反转码信号的话,该逻辑信号无法直接组合为更复杂的组合逻辑(半加器、全加器等),必须进一步做逻辑“非”运算得到非反转码信号,才可进行逻辑组合。这样就会增加系统的复杂性,同时会导致信号的恶化^[11,12]。在 10 Gb/s 工作速率下,实验验证了两路 10 Gb/s 归零码的非反转可重构逻辑运算。

2 工作原理

基于 SOA 的多功能逻辑门原理如图 1 所示,A 和 B 是两路数据信号光,其波长分别为 λ_A 和 λ_B ,而探测光是一路波长为 λ_P 的时钟脉冲光 C,输入到 SOA 之后,其增益和相位均受到数据信号 A 和 B 的调制。SOA 后面接一个可调谐窄带光带通滤波器,通过调节滤波器的中心波长可以得到不同的逻辑门输出,表 1 为对应的逻辑真值表。

表 1 逻辑门真值表

Table 1 Logic gates true value

Data A	Data B	$A \cdot B$	\bar{A}	$\bar{A} \cdot \bar{B}$	$\bar{A} \cdot B$	$A \cdot \bar{B}$	$A \odot B$
0	0	0	1	1	0	0	1
0	1	0	1	0	1	0	0
1	0	0	0	0	0	1	0
1	1	1	0	0	0	0	1

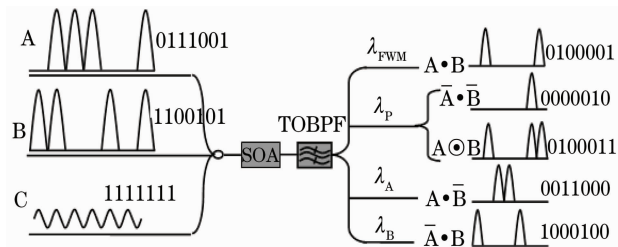


图 1 基于单个 SOA 的多功能逻辑门工作原理示意图

Fig. 1 Principle of the multi-functional all-optical logic gates based on single SOA

实现“非”逻辑则相对简单,将滤波器中心波长调到 λ_P ,并使探测光为连“1”信号,当信号 A(或 B)输入时,由于 SOA 中的 XGM 效应,输出信号将是输入信号 A(或 B)的“非”运算结果。

将滤波器中心波长调到 λ_P ,探测光为连“1”小功率信号,并调整探测光波长使得 $\lambda_P \neq \lambda_{FWM1}$ (λ_{FWM1} 为闲频光波长位置)。由于 SOA 中的 XGM 效应,当两路输入信号任一为“1”码时,探测光被抑制,视输出为“0”码,只有当两路输入信号 A 和 B 同时为“0”码时,小信号探测光被放大,输出为“1”码,即完成“或非”运算。

如果数据 A 和 B 的峰值功率差较大,数据 A 的峰值功率比 B 的峰值功率大时,数据 B 将受到数据 A 的交叉增益调制。将滤波器中心波长调到 λ_B 即可得到逻辑 $\bar{A} \cdot B$ 。反之,当数据 B 的功率大于数据 A 的功率时,将滤波器中心波长调到 λ_A 则可得到逻辑 $A \cdot \bar{B}$ 。

当数据 A 和 B 同时为“1”码时,且偏振态相同时,在 SOA 内部发生明显的 FWM 效应,从而在信号 A 和信号 B 的频谱两侧分别产生新频率的闲频光(λ_{FWM1} 和 λ_{FWM2}),而且该闲频光只在 A 和 B 同时为“1”码时才存在。如果用滤波器对准此闲频光波长进行滤波,则输出信号可视为信号 A 和 B 的逻辑“与”运算结果。

将滤波器中心波长调到 λ_P ,探测光为连“1”小功率信号,并调整探测光波长使得 $\lambda_P = \lambda_{\text{FWM1}}$ 。当信号 A, B 同为“1”码时,由于 FWM 效应,输出为“1”。当信号 A, B 相异(其中一路为“0”另一路为“1”)时,由于 XGM 效应,小信号将不被放大,视输出为“0”。当信号 A, B 同为“0”码时,小信号探测光被放大,输出为“1”,即完成“同或”运算。

3 实验结果及讨论

可重构全光逻辑门整体实验方案如图 2 所示。

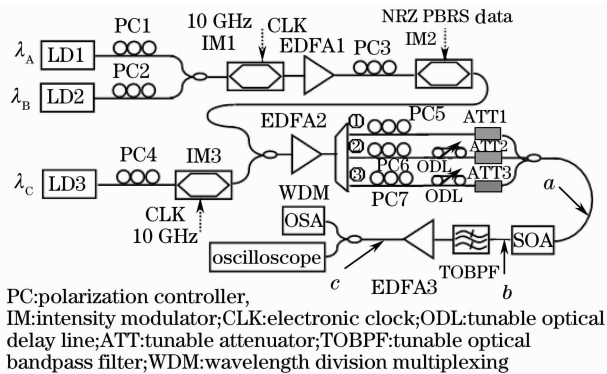


图 2 单个 SOA 的非反转码可重构全光逻辑门系统实验图

Fig. 2 Experiment setup of the single SOA based reconfigure all-optical logic gates with not-inverted data

两路波长分别为 1550.9 nm 和 1551.7 nm 的直流激光器产生的连续光(CW)经过偏振控制器 PC1 和 PC2 后,通过一个 50:50 的光耦合器合为一输入到 LiNbO₃ 电光强度调制器 IM1,经调制产生 10 GHz 光时钟脉冲并通过掺铒光纤放大器(EDFA)放大后再输入 IM2。非归零(NRZ)编码电信号(data)将 10 GHz 光脉冲变成 10 Gb/s RZ 伪随机码序列(PRBS)。此刻,两路不同波长的光信号的码型完全相同。

LD3 为中心波长可调谐连续光源,产生的连续光经 PC4 输入到强度调制器 IM3。同时 10 GHz 的时钟射频信号输入到 IM3 对连续光进行强度调制,产生 10 GHz 的光脉冲序列作为探测光。

PRBS 信号光和探测光通过一个 50:50 的光耦合器合为一路经 EDFA2 后进一步放大,放大后的信号光和探测光经过波分解复用器(WDM)分为 3 路。①路为 1550.9 nm 波长通道(设为 A),由 PC5 来调整其偏振态,并可通过可调衰减器(ATT1)改变该路信号的光功率,码型为“0111001”,如图 3(a)所示。②路为 1551.7 nm 波长通道,信号光经 PC6 来调整其偏振态,信号光经过光可调延时线(ODL)调整与信号 A 的相对延时,产生相应的码型为“1100101”,通过可调衰减器 ATT2 改变该路信号的光功率,在本实验中设该路信号为 B,如图 3(b)所示。③路为探测光波长通道,通过 PC7 来调整该路信号的偏振态,使用 ODL 来调整时钟(OLK)探测光的时序。令探测光的时序与两路编码信号的时序对准,经 ATT3 来改变其光功率,其码型为“1111111”。信号光 A 和 B 及探测光经光耦合器合为一输入进入半导体光放大器 SOA,在中发生交叉增益调制和四波混频效应。由带宽 0.26 nm 的可调谐窄带光滤波器滤出所需信号后,可用示波器(Agilent-86100A)和光谱仪(Agilent-86142B)分别观测逻辑门输出的信号波形和光谱。

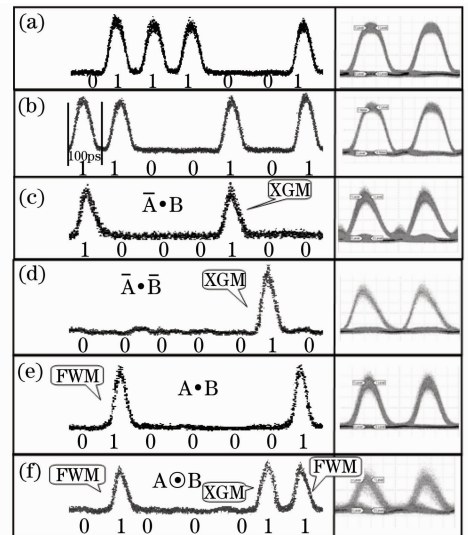


图 3 信号 A 和 B 及构成不同逻辑门的时序图
Fig. 3 Waveform of signal A, B and the outputs of different logic gates

图 3 分别给出了不同条件下,信号 A 和 B 间所得到的不同逻辑功能的实验结果。表 2 为相应的实验参数,其中 SOA 的工作电流为 300 mA。图 3(a)和(b)分别为信号 A(0111001)和信号 B(1100101)的波形图。图 3(c)~(f)分别为逻辑“ $A \cdot B$ ”,“或非”,“与”,“同或”的输出结果。

表 2 逻辑门实验参数

Table 2 Experimental parameters with logic gates

Logic	A power /dBm	B power /dBm	C power /dBm	Filter /nm
$\bar{A} \cdot B$	-2.7	-9	×	1551.7
$\bar{A} \cdot \bar{B}$	-3.9	-4.2	-10	1554.05
$A \cdot B$	-2	-2.1	×	1552.5
$A \oplus B$	2	0	-27	1552.5

在实现“或非”逻辑时,为使交叉增益的效果更好,把探测光 C 的中心波长调至 1554.1 nm。在通过带通滤波器滤波时,为提高消光比,将滤波器的中心波长调至蓝移 1554.05 nm 处^[9]。实现“与”逻辑时,数据 A 和 B 在 SOA 中发生 FWM,为使四波混频效率较高,两路光信号的偏振态应保持一致。

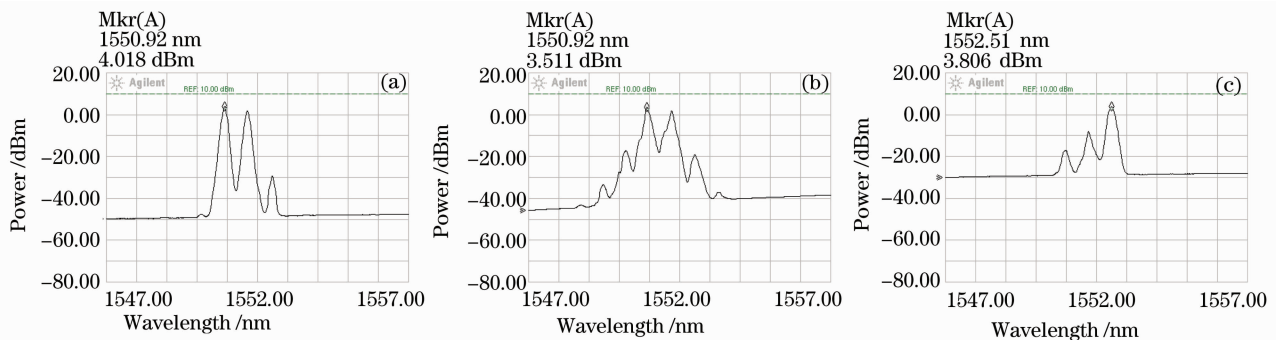


图 4 “同或”逻辑实验中测试点 (a, b, c) 的光谱图

Fig. 4 Optical spectra of XNOR experiment at the corresponding nodes

当多路光同时入射 SOA 时,每路光都会引起 SOA 有源区内载流子浓度的变化,从而影响其他各路光的增益,导致各路光之间的相互调制(即 XGM)。相比较而言,采用连续光作为探测光,因其光功率保持恒定,故不会引起 SOA 载流子的动态变化,因此探测光和信号光之间的功率关系容易满足。但是时钟脉冲光作为探测光却会导致 SOA 载流子的动态变化,对探测光和信号光之间的功率关系要求更为严格^[13]。另外,采用时钟光作为探测光时,要求该时钟与信号严格时序对准。

4 结 论

提出了一种新型的非反转 RZ 码的可重构全光逻辑门的实现方案,通过改变外加的信号光脉冲的功率和调节带通滤波器的中心波长,可以获得全光逻辑的“与”,“非”,“或非”,“同或”,“ $\bar{A} \cdot B$ ”,“ $A \cdot \bar{B}$ ”等基础逻辑功能。在理论和实验上,通过研究 SOA 的四波混频效应和交叉增益调制效应,实现了全光逻辑运算。实验完成了两路 10 Gb/s 归零码信号的多种逻辑,证实了该方案的可行性。该方案中只使

在实现“同或”逻辑时,需把探测光 C 的中心波长调至信号 A 和 B 因 FWM 效应产生的闲频光波长位置,即 $\lambda_P = \lambda_{FWM2} = 1552.5$ nm。在此逻辑实现过程中分别使用了交叉增益调制和四波混频效应,如图 3(f)所示。因探测光波长与 FWM 的闲频光波长相同,故“同或”逻辑的输出信号只有一个波长,便于进一步组合为半加器等复杂逻辑。在实现“同或”逻辑时对实验系统中的不同位置取 3 个测试点 (a, b, c),如图 2 所示,来观测该点处的光谱,如图 4 所示。图 4(a)为信号 A, B 和探测光 C 入 SOA 前的光谱,图 4(b)为 SOA 输出端频谱图,图 4(c)为过带通滤波器经 EDFA 放大后的光谱。

用单个 SOA,利用 SOA 中非线性效应实现多种逻辑。

参 考 文 献

- 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
- B. S. Robinson, S. A. Hamilton, S. J. Savage. 40 Gbit/s all-optical XOR using a fiber-based folded ultrafast nonlinear interferometer[C]. *Conference on Opt. Fiber Commun.*, 2002, 561~563
- J. H. Kim, Young Min Jhon, Young Tae Byun *et al.*. All-optical XOR gate using semiconductor optical amplifiers without additional input beam[J]. *IEEE Photonol Technol. Lett.*, 2002, **14**(10): 1436~1438
- Wang Ying, Zhang Xinliang, Huang Dexiu. Novel all-optical AND gate based on cross gain modulation in cascaded semiconductor optical amplifiers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1433~1436
王颖,张新亮,黄德修.基于级联半导体光放大器中交叉增益调制效应的新型全光逻辑与门[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1433~1436
- Ding Yuan, Zhang Xinliang, Dong Jianji *et al.*. Improvement for all-optical logical AND gate based on cascaded semiconductor optical amplifiers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1517~1521

- 丁园, 张新亮, 董建绩等. 基于级联半导体光放大器实现全光逻辑与门的改进方案[J]. 中国激光, 2007, **34**(11): 1517~1521
- 6 Ali Hamié, Ammar Sharaiha, Mikael Guégan *et al.*. All-optical logic NOR gate using two-cascaded semiconductor optical amplifiers[J]. *IEEE Photon. Technol Lett.*, 2002, **14**(10): 1439~1441
- 7 Xinliang Zhang, Ying Wang, Sun Junqiang *et al.*. All-optical AND gate at 10 Gbit/s based on cascaded single-port-coupled SOAs [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(3): 361~366
- 8 Jian Wang, Junqiang Sun, Qizhen Sun *et al.*. PPLN-based flexible optical logic AND gate[J]. *IEEE Photon. Technol Lett.*, 2008, **20**(3): 211~213
- 9 Dong Jianji, Zhang Xinliang, Wang Yang *et al.*. High speed reconfigurable logic gates based on single semiconductor optical amplifier[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(4): 2222~2228
董建绩, 张新亮, 王阳等. 基于单个半导体光放大器的高速多功能逻辑门[J]. 物理学报, 2008, **57**(4): 2222~2228
- 10 Tang Guangqiang, Yu Jinlong, Wang Yaotian *et al.*. 40 GHz all-optical clock extraction using a Fabry-Pérot filter [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(10): 1853~1857
汤广强, 于晋龙, 王耀天等. 基于法布里-珀罗滤波器的 40 GHz 全光时钟提取实验[J]. 光子学报, 2007, **36**(10): 1853~1857
- 11 Zhang Aixu, Yu Jinlong, Wang Yaotian *et al.*. Noninverted wavelength conversion for 40 Gb/s return-to-zero signal based on semiconductor optical amplifier and optical bandpass filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 249~254
张爱旭, 于晋龙, 王耀天等. 基于半导体光放大器和整形滤波器的 40 Gb/s 的归零正码波长变换研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(2): 249~254
- 12 Zhou Yunfeng, Zhang Junyi, Wu Jian *et al.*. Simultaneous inverted and non-inverted wavelength conversion based on cross polarization modulation in semiconductor optical amplifier [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(7): 1035~1037
周云峰, 张君毅, 伍剑等. 基于半导体光放大器交叉偏振调制效应实现正、反相波长变换[J]. 光子学报, 2006, **35**(7): 1035~1037
- 13 Yu Jinlong, Wang Yaotian, Zhang Aixu *et al.*. Experimental study on 40 Gb/s all optical 3R regeneration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 801~806
于晋龙, 王耀天, 张爱旭等. 40 Gb/s 信号全光 3R 再生实验[J]. 光学学报, 2007, **27**(5): 801~806