

基于单个半导体光放大器的高速多功能逻辑门^{*}

董建绩 张新亮[†] 王 阳 黄德修

(华中科技大学光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

(2007 年 6 月 13 日收到, 2007 年 9 月 25 日收到修改稿)

采用半导体光放大器(SOA)中的非线性效应可以实现多种多样的高速全光信号处理. 利用 SOA 的非线性效应(包括四波混频、交叉增益调制、瞬态交叉相位调制等)实现了多种功能的逻辑运算, 包括“与”、“或非”、“同或”、“或”和“非”. 由于 SOA 用于全光信号处理的调制速率受到增益恢复时间较慢的限制而无法实现高速的信号处理, 在 SOA 后面级联一个带宽为 0.32 nm 的失谐滤波器可以提高 SOA 的工作速率, 仅用一个 SOA 实现了 40 Gbit/s 的多功能逻辑门.

关键词: 半导体光放大器, 全光逻辑门, 瞬态交叉相位调制

PACC: 4255P, 4265P, 4280V

1. 引 言

近年来, 半导体光放大器(SOA)以其小体积、低功耗和易集成等优点在全光信号处理技术中受到广泛的关注. 利用 SOA 的非线性效应实现了各种不同功能的全光逻辑门^[1-3]. 而利用单个 SOA 实现多功能逻辑门则可以增加逻辑器件的灵活性和可操作性, 同时只用少量器件有利于减少系统的复杂度和降低系统的成本, 具有广阔的研究前景. 例如, 利用 SOA 的四波混频效应可以实现偏振键控(PolSK)码型的可重构多功能逻辑门, 其原理就是在 PolSK 码型中偏振态相互垂直的光信号避免四波混频效应, 而偏振态平行的光信号则发生四波混频产生新的频率光^[4]. Kumar 等^[5]提出了利用 SOA 的四波混频效应获得逻辑与门, 然后利用交叉增益调制效应获得或非门, 将两路输出信号经过功率配比混合输出逻辑同或门. Berrettini 等^[6]将或非门和与门输出设定在同一个波长上, 只用一个滤波器就可以滤出同或门而避免了耦合等操作步骤, 不过两个逻辑门的输出偏振态必须垂直以消除相干性, 另外用一路反向注入 SOA 的保持光消除码型效应. 在以上方案中, SOA 的四波混频效应对比特率是透明的, 但是交叉

增益调制效应却受到 SOA 增益恢复时间较慢等限制而无法应用于高速率的通信系统^[7].

目前, 利用 SOA 的瞬态交叉相位调制效应辅助以窄带滤波器是一种新颖的加速 SOA 增益恢复、实现高速全光信号处理的有效途径^[8-10]. 基于这项技术, 我们在 SOA 后面级联一个光纤延时干涉仪实现了 40 Gbit/s 的逻辑或非门^[11], 同时用两个级联的 SOA 在滤波器的辅助下实现 40 Gbit/s 的与门^[12]. 而目前已有报道用延时干涉仪和 SOA 相结合实现了速率高达 80 Gbit/s 的逻辑或门^[13].

基于文献[5, 6]报道的多功能逻辑门, 我们将 SOA 的瞬态交叉相位调制效应、四波混频效应和交叉增益调制效应等多种非线性效应相结合, 实现了基于单个 SOA 的可重构的多功能逻辑门, 工作速率为 40 Gbit/s. 利用四波混频效应得到逻辑与门, 利用交叉增益调制效应和失谐滤波器结合实现逻辑或非门, 这两个逻辑输出信号混合后得到逻辑同或门, 利用瞬态交叉相位调制效应得或门.

2. 工作原理

基于单个 SOA 的多功能逻辑门如图 1 所示, A 和 B 是待处理的数据信号, 其波长分别为 λ_A 和 λ_B .

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60577007)、国家高技术研究发展计划(批准号: 2006AA03Z0414)和湖北省杰出青年人才基金(批准号: 2006ABB017)资助的课题.

[†] E-mail: xlzhang@mail.hust.edu.cn

探测光是一路波长为 λ_p 的连续光, 输入到 SOA 之后, 其增益和相位均受到数据信号的调制, 所以探测光的输出光谱将会展宽. SOA 后面串接一个光带通滤波器, 根据滤波器不同的滤波设置可以得到不同的逻辑门输出, 表 1 为对应的逻辑真值表.

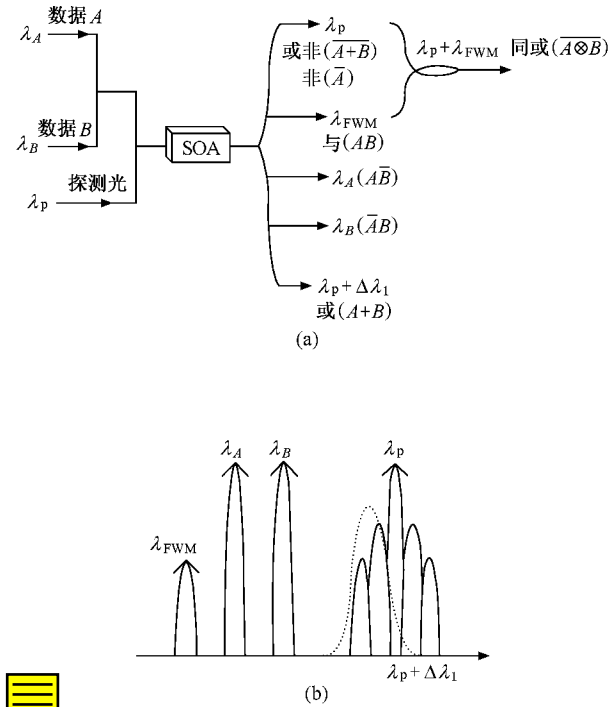


图 1 基于单个 SOA 的多功能逻辑门原理示意图
(a) 工作原理示意图 (b) 光谱分布图

表 1 多功能逻辑门的真值表

数据 A	数据 B	与	或非	或	同或	$\bar{A}B$	$A\bar{B}$	\bar{A}
0	0	0	1	0	1	0	0	1
0	1	0	0	1	0	0	1	1
1	0	0	0	1	0	1	0	0
1	1	1	0	1	1	0	0	0

当数据 A 和 B 同时为“1”时, 在 SOA 内部发生四波混频效应, 产生新频率的共轭光, 而且该信号光只在 A 和 B 同时为“1”时才存在, 如果用滤波器对准此共轭光滤波, 则输出为信号 A 和 B 的逻辑与门.

当数据 A 和 B 中至少有一路信号为“1”时, 探测光信号将会受到交叉增益调制而输出为“0”, 当两路数据信号都为“0”时, 探测光的输出才为“1”, 所以, 如果用滤波器对准探测光频率, 则输出逻辑或非

门. 但是 SOA 较慢的增益恢复时间会使输出的信号质量恶化, 出现严重的码型效应. 为了加速 SOA 的增益恢复, 有必要将滤波器的中心波长相对于探测光波长进行适当的蓝移.

图 2 描述了蓝移滤波器加速增益恢复的工作原理. 假设光脉冲从 A 点开始注入 SOA, 到 B 点结束, 在这段时间内, 载流子一直处于消耗过程, 此时啁啾为负. 从 B 点开始, 增益开始缓慢恢复, 此时啁啾为正, 而 C 点对应最大啁啾处. 由于滤波器的蓝移量较小, 探测光的中心载波并没有被完全抑制, 在增益恢复过程的某时刻, 携带正啁啾的探测光频率刚好对准滤波器中心频率, 虽然增益没有达到最大值, 但输出功率却较大. 而当增益完全恢复时, 由于探测光载波频率漂移量恢复为零, 虽然增益恢复到最大值, 但载波的部分光功率被滤波器衰减, 所以从 C 点到 D 点输出功率保持相对稳定. 这样, 滤波器的蓝移使得探测光的频率漂移补偿了较长的增益恢复时间, 从而使得滤波器输出功率从最低迅速上升到一个稳定值(从 B 点到 C 点), 如果把 SOA 及其后的滤波器看成是一个系统, 则从整体上表现为加快了系统的有效增益恢复^[9].

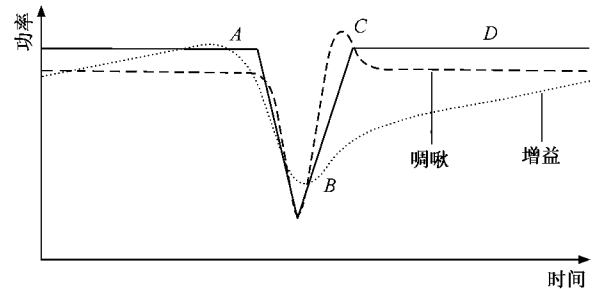


图 2 蓝移滤波器加速增益恢复示意图

另一方面, 当滤波器的中心波长相对于探测光波长蓝移较大, 如 $\lambda_p + \Delta\lambda_1$, 则滤波器的作用是滤掉探测光的载波频率而选取蓝移的边带信号. 根据 SOA 的瞬态交叉相位调制效应的原理, 当数据 A 和 B 只要有一路信号为“1”, 就会引起探测光波长的瞬态蓝移, 而该蓝移边带刚好在滤波器的通频带, 输出为“1”. 如果数据 A 和 B 都为“0”, 探测光信号不会出现瞬态波长蓝移, 滤波器将阻止探测光载波通过, 输出为“0”. 由此可推断, 输出为逻辑或门, 这是利用 SOA 的瞬态交叉相位调制效应获得逻辑或门.

利用四波混频得到逻辑与门,利用交叉增益调制得到逻辑或非门,将这两个逻辑门通过一定的功率配比后耦合即可得到逻辑同或门. 而其中的或非门也可以简化为一个逻辑非门,方法是只让一路数据信号工作.

上述逻辑门均是在数据 A 和 B 的峰值功率相等的情况下得到的. 如果数据 A 和 B 的峰值功率差较大,比如数据 A 的峰值功率比 B 的峰值功率大 10 dB,那么数据 B 将受到数据 A 的深度强度调制,用滤波器对准数据 B 滤波即可得到逻辑 $\bar{A}B$. 反之,当数据 B 的功率远大于数据 A 的功率,用滤波器对准数据 A 滤波,也可以得到逻辑 $A\bar{B}$. 这两个逻辑的组合正好是一个异或门,前提是必须用到两个 SOA.

3. 实验结果及讨论

多功能全光逻辑门的实验装置如图 3 所示. 激光器 LD1 和 LD2 激射的连续光信号经过耦合器 1 耦合后输入到两个级联的马赫-曾德尔调制器中,比特眼图发生器对调制器进行编码控制. 两路连续光

经过调制器输出的是 40 Gbit/s 的伪随机归零信号,其占空比为 33%. 然后用掺铒光纤放大器 EDFA1 对输出信号光功率放大,经过波分复用器将两路数据信号分开,其中一路数据信号经过一定的延时后再和另一路合波,这样就产生了两个独立的数据比特流,分别记为数据 A 和数据 B ,波长分别为 1549.3 和 1550.7 nm. 第三路连续光由激光器 LD3 产生,波长为 1557.3 nm. 这三路信号通过耦合器 3 耦合后输入到 SOA 中. 实验所用 SOA 器件是 Kamelian 公司制造的非线性超快 SOA,增益恢复时间(定义为增益从稳定值的 10% 上升 90% 所经历的时间)约为 60 ps. 在 SOA 后面,带宽为 0.32 nm 的窄带滤波器 1 用来对共轭光和蓝移的探测光滤波,分别得到逻辑与门和或门. 另外一个带宽为 1 nm 的滤波器 2 用来对探测光滤波得到或非门,或者对数据 A 滤波得到 $\bar{A}B$,或者对数据 B 滤波得到 $A\bar{B}$,而逻辑 $\bar{A}B$ 和 $A\bar{B}$ 都是数据 A 和 B 的功率差较大的时候才能得到. 第二个掺铒光纤放大器 EDFA2 用来放大逻辑与得到的输出功率,然后耦合器 5 将逻辑与门和或非门功率叠加即可得到逻辑同或门. 最后光谱仪和光示波器用来观测信号光谱和波形.

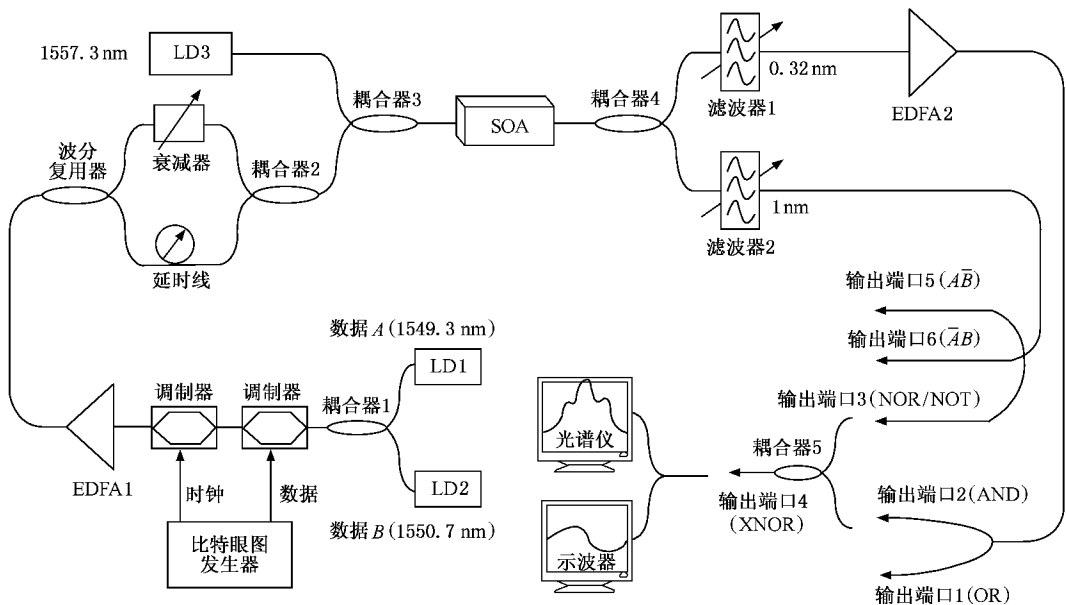


图 3 基于单个 SOA 的多功能逻辑门实验装置示意图

输入的数据信号 A 和 B 的波形如图 4(a) 和 (b) 所示,两路信号的峰值功率均为 2.6 mW,输入消光比均为 13 dB. 探测光功率为 0.6 mW. 由于信号 A 和 B 的波长相隔非常近,在 SOA 的输出端很容易观测到四波混频现象,产生共轭光如图 5(a) 所示. 该

共轭光波长为 1548 nm,然后用滤波器 1 对该波长滤波,用 EDFA2 对其功率放大. 输出的波形如图 4(c) 所示,可以看出输出信号是输入信号 A 和 B 的逻辑与运算. 眼图质量较好,测量其输出消光比为 8.04 dB. 实际上,输入的探测光信号在这里有一个特殊

功能,那就是加速 SOA 的增益恢复,消除码型效应. 因为该探测光的注入相当于一个保持光,使得 SOA 工作在一个优化的饱和状态^[6]. 当滤波器 OBF2 相对于探测光蓝移 0.1 nm 时,输出信号为逻辑或非门,其波形如图 4(d)所示,输出消光比达 10 dB. 由于 SOA 的增益恢复时间大于单个比特周期,利用交叉增益调制实现波长转换时输出结果会有较为严重的码型效应,故利用滤波器的微小失谐量来改善输出特性. 由于利用四波混频的转换效率较低,所以输出的逻辑与门的功率较低,而交叉增益调制得到

的或非门的功率较高. 为了得到质量较好的同或门,或非门和与门的输出功率应该在相同的功率水平. 为此,与门的输出功率经过 EDFA2 放大后和或非门信号耦合,最终的输出峰值功率为 3.4 mW. 输出的混合信号波形如图 4(e)所示. 可以看出输出的“1”电平存在较大的噪声,这主要是因为或非门和与门受到的调制深度不同造成的. 输出消光比只有 6 dB. 当激光器 LD2 关闭后,或非逻辑可以简化为一个非门,其输出波形如图 4(f)所示,输出消光比达 11.5 dB.

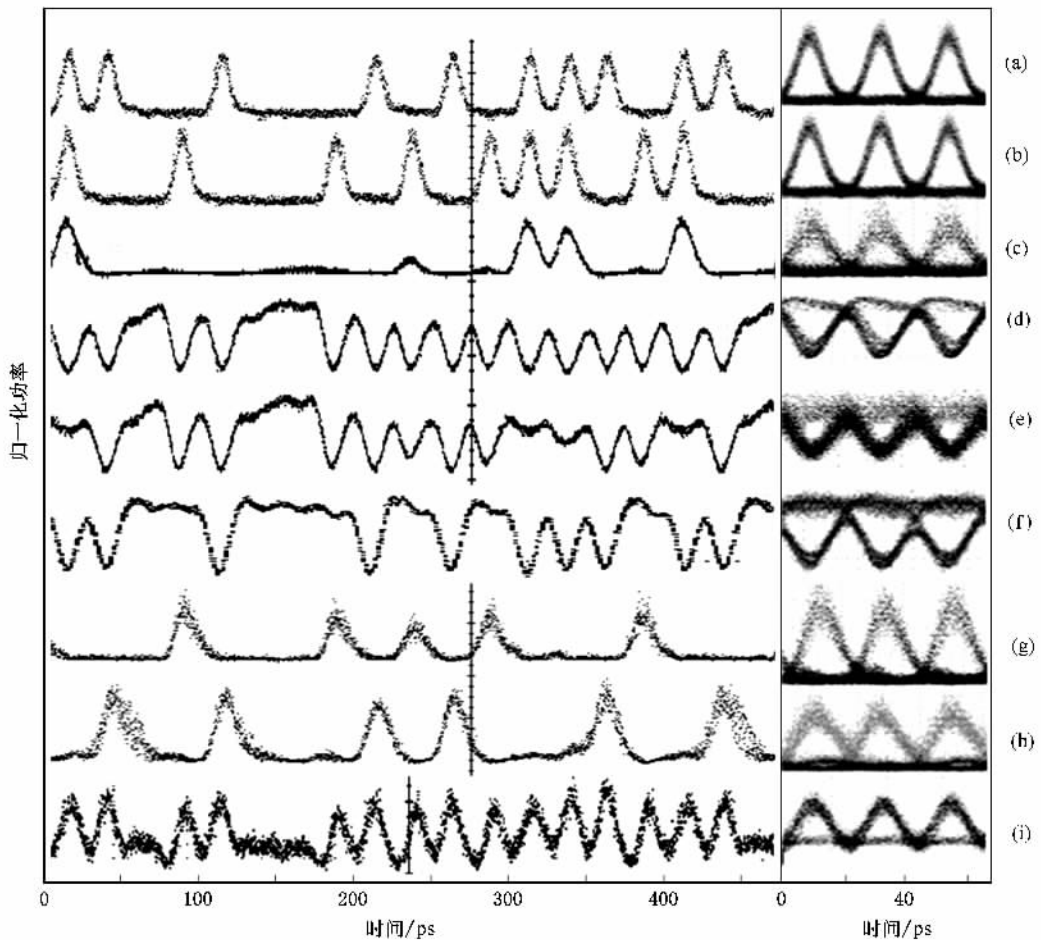


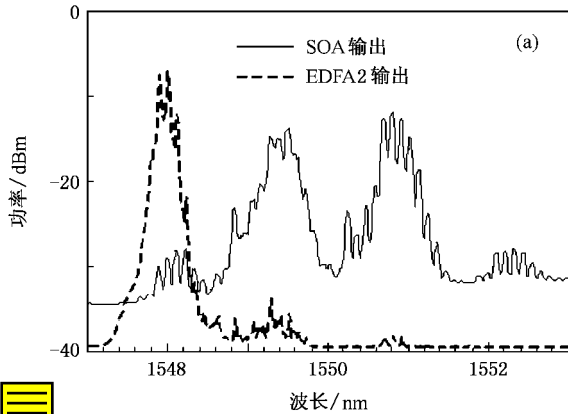
图 4 输入信号 A, B 和不同逻辑门的输出结果 (a)和(b)是输入的信号 A 和 B (c)(d)(e)(f)(g)(h)和(i)分别是输出的逻辑与、或非、同或、 \bar{A} 、 $\bar{A}B$ 、 AB 和或门. 左侧为波形,右侧为相应的眼图

为了获得逻辑或门,必须利用窄带滤波器滤波,因为滤波器用来选取探测光的蓝移边带信息而滤掉中心频率. 图 5(b)显示的是探测光在未进入 SOA 时的光谱,当滤波器 1 相对于探测光载波蓝移 0.3 nm 输出的光谱如图 5(c)所示. 可以明显看出,探测光的蓝移分量较强,此时输出信号是逻辑或门,如图 4(i)所示. 但是输出光功率却比较低,因为探测

光的载波频率受到抑制.

为了得到逻辑 $\bar{A}B$ 和 AB , 数据 A 和 B 的功率需要重新设置,且两路信号的功率差较大. 图 6 描述了进入 SOA 之前的两路信号功率对比. 比如数据 B 的功率下降到比数据 A 功率还低 12 dB,可以得到逻辑 $\bar{A}B$,此时滤波器对准数据 B 波长,输出的逻辑如图 4(g)所示,其输出消光比为 13 dB. 反之,当数据

A 的功率比数据 B 还低 17 dB 时, 滤出数据 A 即得到逻辑 $\bar{A}\bar{B}$, 如图 3(h) 所示. 输出消光比为 11.2 dB. 逻辑 $\bar{A}\bar{B}$ 和 $\bar{A}B$ 可以看成逻辑异或门的两个子逻辑, 如果两个相同的 SOA 并联就可以实现一个异或门^[14].



值得注意的是, 在得到的众多逻辑门中逻辑或非、同或、和非门是反相的 RZ 格式, 这种码型在实际的光网络中仍是可行的. 实际上所有的输出逻辑也都可以以同相的 RZ 码型输出, 只要将连续的探测光用同步的时钟光信号代替即可.

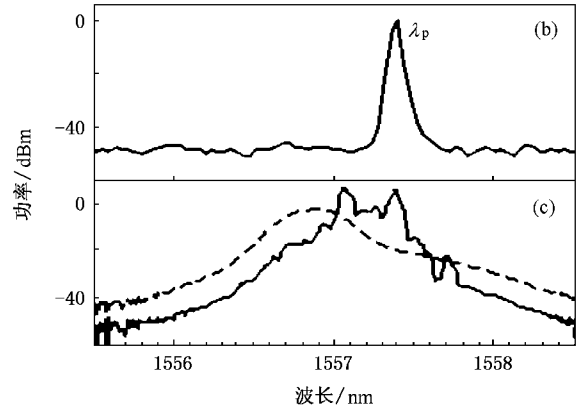


图 5 从光谱仪测得的光谱 (a) 四波混频的光谱 (b) 进入 SOA 之前的探测光光谱 (c) 输出的探测光光谱 (实线) 和滤波器 1 的光谱 (虚线)

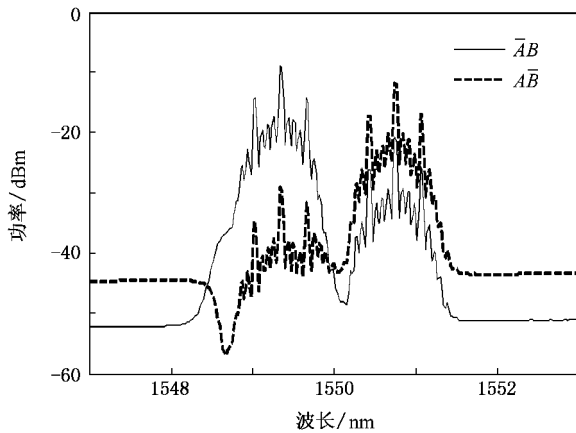


图 6 得到逻辑 $\bar{A}\bar{B}$ 和 $\bar{A}B$ 情况下输入数据 A 和 B 的功率对比

4. 模拟结果分析

根据上述实验环境, 我们从经典的 SOA 四波混频模型出发^[15], 从理论上也验证了基于单个 SOA 的多功能逻辑门. 初始条件设定如下: 数据 A 和 B 的峰值功率均为 10 mW, 输入的 RZ 信号的占空比均为 33%, 波长和实验中设定相同. 数据 A 和 B 的波形如图 7(a) 和 (b) 所示. 根据 SOA 的四波混频模型模拟得到共轭光波长为 1548 nm 的输出波形, 如图 7(c) 所示. 显然输出逻辑与门, 此时 SOA 的电流设定

为 150 mA, 饱和输出功率为 10 mW. 探测光波长设定为 1557 nm, 功率为 1 mW. 用 3 dB 带宽为 0.4 nm 的高斯滤波器对探测光进行滤波, 当滤波器的失谐量为 -0.24 nm, 即滤波器中心波长相对于探测光波长蓝移 0.24 nm, 得到或非逻辑门的波形, 如图 7(d) 所示. 可以看出输出的波形不存在明显的码型效应, 说明滤波器的蓝移可以改善输出质量. 由于逻辑与的峰值功率和逻辑或非门的峰值功率相差较大, 我们将逻辑与的输出波形放大 9 dB, 再和或非门波形相加, 得到逻辑同或门, 如图 7(e) 所示. 输出功率“1”并不平坦, 主要是由于或非门的调制深度和与门的调制深度不同造成的, 这种非平坦并不影响输出逻辑. 如果进一步将滤波器的失谐量增大到 -0.6 nm, 得到输出波形如图 7(i) 所示, 这个输出结果刚好和或非门反相, 所以输出是逻辑或门. 在得到逻辑或非门的前提下, 仅仅让数据 A 工作, 如关闭数据 B 信号, 则输出为数据 A 的反码, 即逻辑非门, 如图 7(f) 所示.

当数据 A 和 B 的功率差较大, 也可以得到异或门的一半, 即 $\bar{A}\bar{B}$ 和 $\bar{A}B$. 设定 A 和 B 的峰值功率分别为 15 和 0.2 mW, 则信号 B 输出如图 7(g) 所示. 反之, 将 A 和 B 的峰值功率对换, 则信号输出逻辑为 $\bar{A}B$, 如图 7(h) 所示. 以上各种逻辑门的模拟均与实验结果一致.

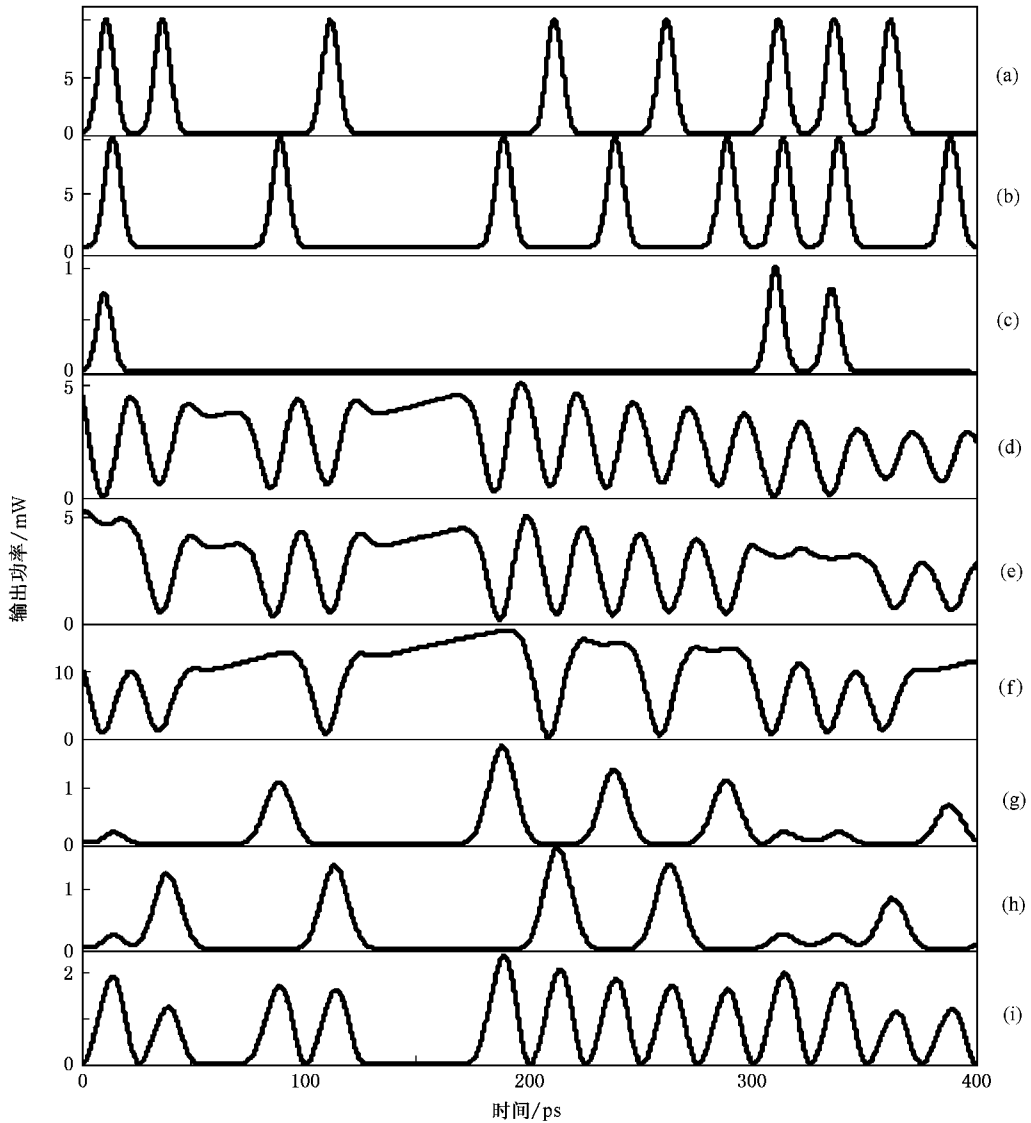



图7 输入信号 A 和 B 及不同逻辑门的输出波形模拟结果 (a)和(b)是输入数据 A 和 B 的波形 (c)(d)(e), (f)(g)(h)和(i)分别是输出的逻辑与、或非、同或、 \bar{A} 、 $\bar{A}B$ 、 AB 和或门

5. 结 论

利用 SOA 的瞬态交叉相位调制效应辅助以窄带滤波器是改善 SOA 超快动态特性、实现高速全光信号处理的有效途径。本文实验研究了基于单个 SOA 辅助于窄带滤波器实现调制速率为 40 Gbit/s 的

多功能全光逻辑门。将 SOA 的瞬态交叉相位调制效应、四波混频效应和交叉增益调制效应等多种非线性效应相结合,其中利用四波混频得逻辑与门,交叉增益调制效应和失谐滤波器结合实现逻辑或非门,这两个逻辑输出信号混合后得逻辑同或门,利用瞬态交叉相位调制效应得或门。同时,通过理论模拟得到的结果和实验结果一致。

[1] Zhang X L, Wang Y, Sun J Q, Liu D M, Hang D X 2004 *Opt. Express* 12 361

[2] Wang Y, Zhang X L, Huang  2004 *Chin. Phys.* 13 882

[3] Zhao C, Zhang X L, Dong J J, Hang D X 2006 *Acta Phys. Sin.* 55 4150 (in Chinese)[赵 婵、张新亮、董建绩、黄德修 2006 物理学报 55 4150]

- [4] Li Z H , Luo G F 2006 *Photon. Techn. Lett.* **18** 1341
- [5] Kumar S , Willner A E 2006 *Opt. Express* **14** 5092
- [6] Berrettini G , Simi A , Malacarne A , Bogoni A , Poti L 2006 *Photon. Techn. Lett.* **18** 917
- [7] Dong J J , Zhang X L , Huang D X 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 763 (in Chinese) [董建绩、张新亮、黄德修 2005 物理学报 **54** 763]
- [8] Dong J J , Zhang X L , Fu S N , Shum P , Huang D X 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 990
- [9] Dong J J , Zhang X L , Fu S N , Shum P , Huang D X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2250 (in Chinese) [董建绩、张新亮、付松年、沈平、黄德修 2007 物理学报 **56** 2250]
- [10] Dong J J , Zhang X L , Xu J , Huang D X , Fu S N , Shum P , Zhang L R , Gong Y D 2007 *OFC/NFOEC* (Anaheim : IEEE Communications Society)
- [11] Xu J , Zhang X L , Liu D M , Huang D X 2006 *Opt. Express* **14** 10708
- [12] Xu J , Zhang X L , Dong J J , Liu D M , Huang D X 2007 *Electron. Lett.* **43** 585
- [13] Wang Q , Dong H , Zhu G , Sun H , Jaques J , Piccirilli A B , Dutta N K 2006 *Opt. Commun.* **260** 81
- [14] Kim Y , Jhon Y , Byun Y , Lee S , Woo D , Kim S 2002 *Photon. Techn. Lett.* **14** 1436
- [15] Li P L , Zhang X L , Chen J , Huang L R , Huang D X 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1222 (in Chinese) [李培丽、张新亮、陈俊、黄黎蓉、黄德修 2005 物理学报 **54** 1222]

High speed reconfigurable logic gates based on single semiconductor optical amplifier^{*}

Dong Jian-Ji Zhang Xin-Liang[†] Wang Yang Huang De-Xiu

(School of Optoelectronics Science and Technology , Huazhong University of Science and Technology , Wuhan 430074 , China)

(Received 13 June 2007 ; revised manuscript received 25 September 2007)

Abstract

The nonlinearities of a semiconductor optical amplifier (SOA) are exploited to realize various all-optical signal processing at ultrahigh speed. We demonstrate reconfigurable logic gates with XNOR , AND , NOR , OR , and NOT functions based on various nonlinearities of single SOA , including four-wave mixing , cross gain modulation and transient cross phase modulation. Since the modulation speed of the SOA is limited by the recovery time of carrier density , a detuning optical bandpass filter with 0.32 nm-bandwidth follows the SOA to enhance the modulation speed. Multi-logic gates at 40 Gbit/s are obtained with single SOA.

Keywords : semiconductor optical amplifier , all optical logic gate , transient cross phase modulation

PACC : 4255P , 4265P , 4280V

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60577007) , the National High Technology Development Program of China (Grant No. 2006AA03Z0414) and the Outstanding Youth Foundation of Hubei Province , China (Grant No. 2006ABB017).

[†] E-mail : xlzhang@mail.hust.edu.cn