

·光电器件与材料·

## 基于 SOA 辅助的全光逻辑异或门性能研究

白晓棠, 段惠丹, 李二龙

(重庆邮电大学, 通信与信息工程学院, 重庆 400065)

**摘要:**分析有 SOA 辅助设计的 Sagnac 全光逻辑异或门、SOA-MZI 全光逻辑异或门和基于 SOA-MZI 双端输入的全光逻辑异或门的结构及工作原理, 比较 3 种逻辑异或门的性能、系统的复杂度等. 在此基础上, 提出一种改进的基于 SOA-MZI 全光逻辑异或门, 并分析方案的可行性. 最后讨论方案的数学模型及建模方案. 数值分析表明, 该方案能够有效的实现逻辑异或功能, 且适当调整参数, 系统性能将优于现有的 SOA-MZI 全光逻辑异或门.

**关键词:**全光信号处理技术; 半导体光放大器; 半导体-马赫增德尔干涉仪; 异或门

中图分类号: TH744.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2009)04-0034-04

## Research on the Performance of All Optical XOR Gate based on SOA-Assisted

BAI Xiao-tang DUAN Hui-dan LI Er-long

(College of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** The structures and working operations of SOA-assisted Sagnac XOR gate, all-optical MZI XOR gate and the SOA-assisted bidirectional data input XOR gate were analyzed, then the three XOR's performance and the complexity of the system were compared. Based on it, a modified SOA-MZI-based all-optical XOR logic gate was proposed. The feasibility of the program was analyzed. Finally, the optical principle and mathematical model of the program were discussed. Values analysis shows that the program can effectively achieve the XOR function, and appropriately adjust the parameters, the system performance will be superior to the existing XOR gate.

**Key words:** all-optical signal processing; semiconductor optical amplifier; MZI; XOR

全光信号处理技术被视为解决“O/E/O”转换所带来的系统瓶颈的一种行之有效的方法. 随着全光逻辑器件的发展, 完全在光域内实现分组头处理、净荷定位、时钟提取、3R 再生、光分组自路由和光信号编码等功能是未来的发展趋势, 而这些功能在很大程度上依赖于全光逻辑器件的发展.

目前全光逻辑器件大都依靠超高速的非线性效应来实现, 例如非线性光路环(NOLM)、THz 全光非对称解复用器(TOAD)、超高速非线性干涉仪(UNI)、马赫-曾德尔干涉仪(MZI)、延迟干涉仪

(DI) 等. 已试验成功的全光逻辑器件有全光异或门、与门、或非门、与非门等. 由于 SOA-MZI 的器件具有功耗低、延时短、稳定性高且可集成性好等优点, 因此这类异或门受到关注并得到了实验的验证.

对 3 种有 SOA 辅助的全光逻辑异或门技术进行了系统全面的介绍, 比较其性能优劣, 并在此基础上提出一种全新的基于改进的 SOA-MZI 的全光逻辑异或门.

收稿日期: 2009-05-19

基金项目: 重庆邮电大学自然科学基金(A2008-61); 重庆市自然科学基金(KJ070513, KJ060508, KJ090511)

作者简介: 白晓棠(1983-), 女, 辽宁鞍山人, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤通信与光交换.

# 1 有 SOA 辅助的全光异或门设计

## 1.1 基于 Sagnac 的全光逻辑异或门

基于 SOA 辅助的 Sagnac 干涉仪的异或门结构如图 1 所示. Sagnac 干涉仪由一个光学环, 一个 SOA 和一个 3 dB 的耦合器组成<sup>[2]</sup>.

SOA 的位置不是在中间, 而是存在一个值为  $\Delta l$  的偏移量. 2 号端口为反射端口, 3 号端口为透射端口. 探测脉冲通过端口 2 进入干涉仪, 在耦合器的作用下, 分成 2 个在相反方向传送的脉冲, 一束按照顺时针传送 (CW), 另一束按照逆时针的方向传送 (CCW). 由于 SOA 的位置偏移  $\Delta l$ , 因此 CW 和 CCW 脉冲进入 SOA 的时间不同, 则存在  $\Delta \tau ps$  的时间差.  $\Delta \tau$  可以表示为

$$\Delta \tau = 2\Delta l / v_g$$

其中,  $v_g$  是光在光纤环中的群速度. 2 路信号光从 SOA 的两端进入, 其中 CW 比 CCW 晚  $\Delta \tau ps$  进入 SOA. 如果二者完全相同, 都是“0”或者都是“1”时, 则相应的 CW 脉冲和 CCW 脉冲在通过 SOA 后, 能够获得相同的增益和相移, 相位差为 0. 它们在耦合器 C1 相遇时, 干涉相消, 干涉仪处于反射状态, 3 号端口无输出, 视为逻辑“0”; 如果 A 和 B 不同, 则 2 路脉冲所受到的增益和相移不同, 存在相位差, 这时干涉仪处于透射状态, 它们在耦合器 C1 中相遇时, 干涉相加, 耦合器有输出, 视为逻辑“1”. 从而能够有效地完成信号的异或运算.

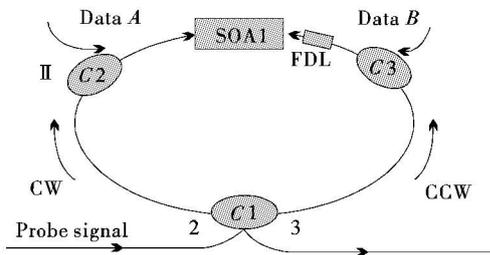


图 1 基于 Sagnac 的全光逻辑异或门

## 1.2 基于 SOA-MIZ 的全光逻辑异或门

基于 SOA-MZI 的全光异或门如图 2 所示, SOA1 和 SOA2 对称的放置在干涉仪两臂, 连续的

探测光通过耦合器 C1 分成两部分, 注入到干涉仪的两臂, 信号 A 在耦合器 C3 处注入 SOA1, 同理信号 B 在 C4 处注入 SOA2, 输入的信号光的峰值功率高于 SOA 的最大线性输入功率, 当输入功率超过 SOA 的最大线性输入功率时, SOA 的有源区内载流子的浓度会发生变化, 这样会使有源区内的有效折射率发生变化, 使得探测光经过上下两臂的 SOA 时得到不同的增益而导致经历不同的相移, 2 路经过相位调制的探测光在耦合器 C2 干涉, 将相位转移成光强而由干涉仪输出, 完成了 2 路数据信号的异或运算<sup>[3-5]</sup>.

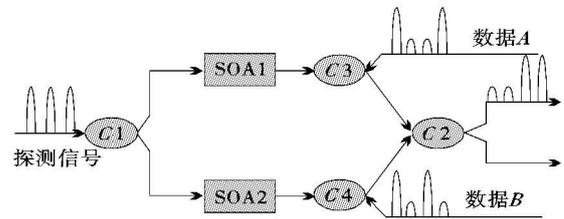


图 2 基于 SOA-MZI 的全光异或门

## 1.3 基于 SOA-MZI 的双端输入的全光逻辑异或门

基于 SOA-MZI 的双端输入的全光逻辑异或门如图 3 所示<sup>[6,7]</sup>. 输入信号 A, B 经耦合器 C1 和 C2 分光, 分成信号光和探测光, 探测信号经耦合器 C3 耦合后进入 MZI, 控制光经 C5 和 C6 反向进入 SOA-MZI, 记为 B1 和 B2.

当 2 路信号光 A 和 B 都为“0”时, 由于没有输入信号, 视为“0”, 当 2 束信号光中一有束信号为“1”时, 设 B 为“1”, A 为“0”时, 则 MZI 的下臂 SOA2 由于受到控制光的影响, 经过 SOA2 的信号光会获得额外的非线性相移, 而当探测光经过上臂 SOA1 时, 没有受到控制光影响, 当上下两臂的探测光在耦合器 C4 相遇时, 由于相位差不为 0, 而干涉相加, 结果从 2 端口输出, 认为输出为逻辑“1”, 当 2 路信号都为“1”时, 这时上下两臂的 SOA 得到相同的非线性相移, 二者没有相位差, 干涉相消, 视为逻辑“0”, 从而实现 2 路信号的异或<sup>[10]</sup>.

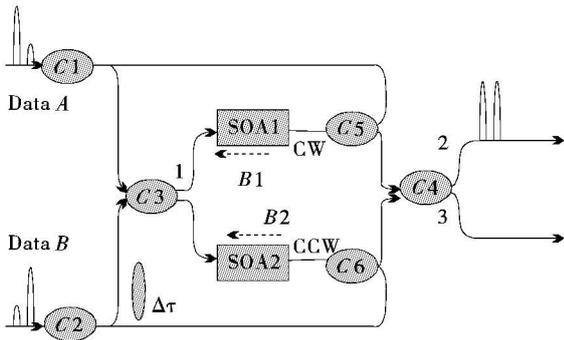


图 3 基于双端输入的全光异或门

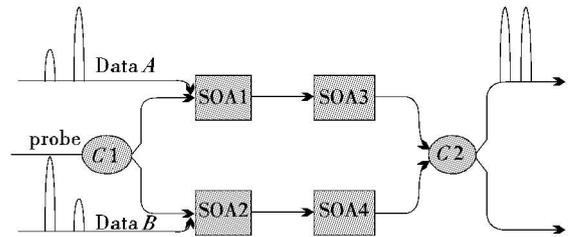


图 4 基于改进的 SOA-MZI 的全光异或门

## 2 性能比较

表 1 有 SOA 辅助的全光逻辑异或门的性能比较

类型	消光比/dB	能量	可集成性
TOAD	11	适中	弱
SOA-MZI	13	低	强
SOA-UNI	10	低	弱
双光 SOA-MZI	13-15	低	强

从表 1 可以看出, 现有的全光逻辑异或门技术, 虽然能够实现异或运算, 但是消光比不够理想, 因此研究出一种消光比理想的全光异或门是目前研究的重点, 对未来全光网络的实现具有一定的现实意义。

## 3 改进的基于 SOA-MZI 的全光逻辑异或门

第 2 节介绍了比较重要的 3 种全光逻辑异或门, 并对三者的性能进行了比较分析, 进而得出基于 SOA-MZI 的全光逻辑异或门具有性能好、易集成等特点而倍受关注。因此在现有的全光逻辑异或门的基础上提出了一种改进的基于 SOA-MZI 的全光逻辑异或门。改进的 SOA-MZI 的全光逻辑异或门如图 4 所示, 在原有的差分异或门的基础上, 在 SOA-MZI 的上下臂各增加一个 SOA。

其原理和现有的基于 SOA-MZI 的全光逻辑异或门类似, 所不同的是信号在 SOA-MZI 的上下臂分别经过 2 个完全相同的 SOA, 额外增加的 2 个 SOA 是为了加速 SOA 的动态增益变化过程, 减少码形对开关窗口的影响, 使输出脉冲的抖动减少, 减小输出脉冲的误码率(BER)且提高异或门的消光比。

## 4 全光逻辑门的非线性光学原理

半导体光放大器 SOA 具有很强的非线性特性, 以及低功耗、易集成的特点, 使研究者的开发兴趣就转向对半导体光放大器中各种非线性特性的利用。由于其良好的特性, 成为各种全光逻辑门的主要功能器件。描述其内部载流子浓度变化的速率方程是<sup>[8]</sup>

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{1}{eV} - R(N_i) - S_{ASE}(N) - \sum_w \frac{\Gamma g(N, \lambda_w)}{h\nu_w A} P_w(t) \quad (1)$$

其中,  $N$  为 SOA 有源区内载流子浓度;  $P_w(t)$  为对应波长为  $\lambda_w$  的光的光功率;  $I$  为注入电流;  $e$  为电子电荷量;  $V$  为 SOA 有源区体积;  $\Gamma$  为光场限制因子;  $h$  为普朗克常量;  $\nu_w$  为光波的频率;  $A$  为 SOA 有源区的横截面积。式(1)右边第 1 项代表载流子的注入, 第 2 项代表自发辐射复合引起的载流子消耗; 第 3 项  $S_{ASE}$  表示放大的自发辐射引起的载流子消耗; 第 4 项代表入射信号引起的受激辐射的载流子消耗。

## 5 理论模型分析

在全光分组头处理技术中, 半导体光放大器工作的理论模型采用 J. M. Tang 等人提出的模型<sup>[9]</sup>

$$\frac{\partial g(z, t)}{\partial t} = \frac{g_0 - g(z, t)}{\tau} - \frac{g(z, t)}{1 + \epsilon P(z, t)} \cdot \frac{P(z, t)}{E_{sat}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial P(z, t)}{\partial z} = \frac{[g(z, t) - \alpha_{int}] \cdot P(z, t)}{1 + \epsilon P(z, t)} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varphi(z, t)}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2} \cdot \frac{1}{1 + \epsilon P(z, t)} g(z, t) \quad (4)$$

式中,  $g_0$  是 SOA 的小信号增益;  $E_{sat}$  为饱和效应;  $a$

为线性增强因子;  $\alpha_{\text{int}}$  是 SOA 的内部损耗,  $\epsilon$  为 SOA 载流子加热、谱烧孔等带来的非线性增益压缩因子.

采用简化的微分方程描述 SOA 的动态增益特性, 其传输特性描述如下

$$\frac{\partial g(z, t)}{\partial t} = \frac{g_0 - g(z, t)}{\tau_c} - \frac{gP(z, t)}{E_{\text{sat}}} \quad (5)$$

$$\frac{\partial P(z, t)}{\partial z} = (g(z, t) - \alpha_{\text{int}})P(z, t) \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varphi(z, t)}{\partial z} = -\frac{1}{2}\alpha g(z, t) \quad (7)$$

(1) 定义增益放大函数

$$h(\tau) = \int_0^L g(z, \tau) dz \quad (8)$$

它表示光脉冲包络的某一点沿着 SOA 长度  $L$  的增益积分. 将式(5)~式(7)在整个 SOA 长度  $L$  上积分, 可获得下述微分方程

$$\frac{dh(\tau)}{d\tau} = \frac{g_0 L - h(\tau)}{\tau_c} - \frac{P_{\text{in}}(\tau)}{E_{\text{sat}}} [\exp(h(\tau)) - 1] \quad (9)$$

$$G(\tau) = P_{\text{out}}(\tau)/P_{\text{in}}(\tau) = \exp(h(\tau)) \quad (10)$$

$$\Delta \varphi(\tau) = \varphi_{\text{out}}(\tau) - \varphi_{\text{in}}(\tau) = -\frac{1}{2} a \ln G(\tau) \quad (11)$$

其中,  $P_{\text{in}}(t)$  和  $\varphi_{\text{in}}(t)$  分别为输入脉冲的功率和相位,  $P_{\text{out}}(t)$ 、 $\varphi_{\text{out}}(t)$  分别为输出脉冲的功率和相位.

(2) 输入脉冲采用高斯序列的归零(RZ)码、确定分组速率、给定初值  $g_0 L$ , 对上述方程组的分析采用经典数值算法 Runge-Kutta (龙格-库塔)法.

(3) 方案耦合器 C2 的输出为

$$P_{\text{out}}(t) = 1/4 \times P_{\text{in}}(t) \{ G1(t) + G2(t) - 2\sqrt{G1(t)G2(t)} \times \cos(\Delta \Phi) \} \quad (12)$$

## 6 结 论

全面系统地分析比较 3 种有 SOA 辅助的全光异或门的结构、工作原理及 3 种异或门的性能. 从比较分析可知, 有 SOA 辅助的 MZI 干涉仪构成的全光异或门性能好、可集成性高, 并且具有对输入能量要求低等优点, 因此得到了更多的关注.

目前国内外已经提出了各种实现全光逻辑门的方案, 但仅进行了仿真和实验研究, 还没有实现商用

化, 因此需要对光逻辑门进行深入而创新的研究.

提出了一种改进的 SOA-MZI 全光逻辑异或门, 采用数值分析方法对系统进行建模分析, 理论上证明了系统的可行性, 只要参数设置适当, 系统消光比将优于现有的异或门.

## 参考文献

- [1] M C Cardakli, et al. Reconfigurable optical packet header recognition and routing using time-to-wavelength mapping and tunable fiber Bragg grating for correlation decoding[J]. IEEE Photon. Technol Lett, 2000, 12(5):552-554.
- [2] T Houbavlis, et al. 10Gbit/s All-optical Boolean XOR with SOA Fibre Sagnac Gate [J]. IEEE, electron. Lett., 1999, 35:1650-1652.
- [3] T Fjelde, et al. Demonstration of 20Gbit/s All-Optical Logic XOR in Integrated SOA-based Interferometric Wavelength Converter [J]. IEEE elctron. Lett, 2000, 36:1863-1864.
- [4] H Chen, et al. All-optical XOR using differentialScheme nd Mach-Zehnder interferometer [J]. IEEE Electronics Letters, 2002, 38:1271-1273.
- [5] H Clen, el al. All-optical logic XOR functionality in an integrated SOA-MZI[J]. IEEE Electronics Letters, 2002, 38:1271-1273.
- [6] R P Webb, et al. ,40 Gbit/s all-optical XOR gate based on hybrid-integrated Mach-Zehnder interferometer [J]. Electronics Letters, 2003, 39:79-81.
- [7] H K Jae, M J Young, et al. All-Optical XOR Gate Using Semiconductor Optical Amplifiers Without Additional Input Beam [J]. IEEE Photon Technol. Lett, 2002, 4: 1436-1438.
- [8] G P Agrawal, N A Olsson. Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifiers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1989, 25(11):2297-2306.
- [9] J M Kang, K A Shore. Strong Picosecond optical pulse propagation in semiconductor optical amplifiers at transparency[J]. IEEE Quantum Electron, 1998, 34(7): 1263-1269.
- [10] 牛长流. 光分组交换网中全光信号处理技术, 2006.
- [11] 中小华, 张民, 叶培大. 全光异或门技术 [J]. 激光与红外, 2007.