

文章编号:1001-5078(2007)07-0601-04

全光异或逻辑门技术

叶小华, 张 民, 叶培大
(北京邮电大学电信工程学院, 北京 100876)

摘 要:文中对现有的全光异或逻辑门方案作了一个概括,比较了基于半导体光放大器(SOA)的各种设计,特别是带有干涉结构的技术方案。

关键词:全光异或逻辑;半导体光放大器;对比度

中图分类号:TN256 **文献标识码:**A

All-optical XOR Logic Technology

YE Xiao-hua, ZHANG Min, YE Pei-da

(School of Telecommunication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: It is summarized for current all-optical XOR logic technology, schemes investigated and compared include different designs based on semiconductor optical amplifiers(SOA), especially the configurations employing interferometers.

Key words: all-optical XOR logic; SOA; contrast ratio

1 引言

随着通信的发展,单信道传输速率已经逼近电子速率的极限,全光信号处理技术有望突破电子速率瓶颈,且可去除交换节点的光/电/光的转换,引起人们的广泛兴趣。尽管目前尚未商用,但在研究领域,全光处理技术,尤其是其中的全光逻辑门的研究非常活跃,出现了许多设计方案。

作为全光逻辑门中的重要组成部分,全光异或门能实现诸如光标签或分组交换、门限判决、再生、光计算、随机信号发生、奇偶校验等重要功能,因而倍受关注。在异或门实现过程中,通常需要采用非线性介质。由于SOA具有高非线性系数、高稳定性、低功耗、结构紧凑、易于集成等特点,因此现有的大多数全光异或门的设计都是基于SOA的架构而实现的。基于SOA的设计可以分为两类,一类是基于SOA本身的非线性效应而实现的异或门设计,诸如利用SOA的交叉偏振调制(CPM)效应、交叉相位调制(XPM)效应、交叉增益调制(XGM)效应以及四波混频(FWM)效应等;另一类是基于SOA辅助的干涉仪架构的设计,其中干涉仪有基于光纤的结构,

也有基于波导的构造。

下面我们对以上所提到的基于SOA结构的全光异或门作一介绍,第一部分介绍基于SOA本身的非线性效应而实现的异或门设计;第二部分给出基于SOA辅助的干涉仪架构的各种设计;在第三部分,我们对各种设计作一比较,并给出未来的发展趋势。

2 基于SOA本身的非线性效应的全光异或门设计

早期的异或门方案利用光纤的Kerr效应实现对光信号的逻辑运算,但这种设计所需光功率大、时延长且需要很长的光纤,导致性能不稳定。而SOA由于其独特的优越性使其成为首选的非线性介质。

2.1 基于SOA的交叉偏振调制效应的逻辑门方案

利用SOA的CPM效应的逻辑门方案结构如图1(a)所示^[1]。在CPM效应下,出射信号光不仅跟入射信号光强相关,还跟控制光的强度和偏振方向

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 60372100)。

作者简介:叶小华,男,北京邮电大学光通信与光波技术教育部重点实验室博士,目前研究领域为全光信号处理技术。E-mail: yexh@tom.com

收稿日期:2006-12-11

有关。通过在 SOA 后面放置一个补偿片和检偏器,对出射光束起偏振校验功能:当出射的两束光偏振态相同时,均无法通过检偏器;而当两束出射光偏振态相互垂直时,检偏器无法同时滤去两个信号,因此有一束信号输出。由此,如果以相互垂直的两个偏振态代表“0”、“1”信号时,当两路信号同为“0”或“1”时,也即偏振态相同时,从检偏器过滤后,无信号输出;而当一路信号为“0”、另一路为“1”时,检偏器仅能滤去其中的一个信号,因此输出信号为“1”,从而实现了全光异或逻辑运算。该方案结构紧凑,易于集成,且适用于 NRZ 和 RZ 信号。但其对偏振敏感,性能不稳定。与其他方案相比,其输出信号对比度也较低。

2.2 基于 SOA 的四波混频效应(FWM)的逻辑门方案

SOA 的 CPM 效应的响应较慢,难以适应高速率的逻辑运算,而 FWM 效应的响应时间为飞秒量级,其快速响应特性适于满足各种高速率的需求,吸引了众多研究兴趣。迄今已报道的有采用 RZ - DPSK 编码方式的 20Gb/s 异或门^[2],采取 NRZ 编码方式的 2.5Gb/s 的装置^[3]等,其实现原理如图 1(b)所示。在该方案中,两束入射信号为不同波长的线偏振光,出射光中除了原有的两个人射信号之外,还有两个不同波长的信号,它们的偏振方向由入射的两路信号光的偏振方向决定。如图 1(b),通过适当设定入射信号的波长及偏振,通过对新的波长信号的检测即可实现两路入射信号的异或逻辑运算输出。对于 10Gb/s,强度为 6dBm 的入射信号,实验可获得大于 20dB 对比度的输出逻辑信号^[3]。

2.3 基于 SOA 的交叉增益调制效应(XGM)的逻辑门方案

利用 SOA 中的 XGM 带来的增益饱和效应,当 SOA 被高强度脉冲(控制信号)激励至增益饱和状态时,小信号脉冲(探测信号)经过 SOA 时将不再获得增益放大,可以等效为当控制信号为“0”时,探测信号才能通过 SOA,否则可认为没有探测信号输出。基于这点,图 1(c)给出了采用 XGM 实现 XOR 运算的方案示意图,由 SOA1 输出的是 A 和 B 的与逻辑运算,而 SOA2 输出的 A 和 B 的与逻辑运算,两路信号耦合,也即作或运算后,输出的即为 A 和 B 的异或逻辑运算信号。

采用此方案已有的报道中,对于 10Gb/s 入射信号,获得了 11dB 对比度的输出逻辑信号^[4]。

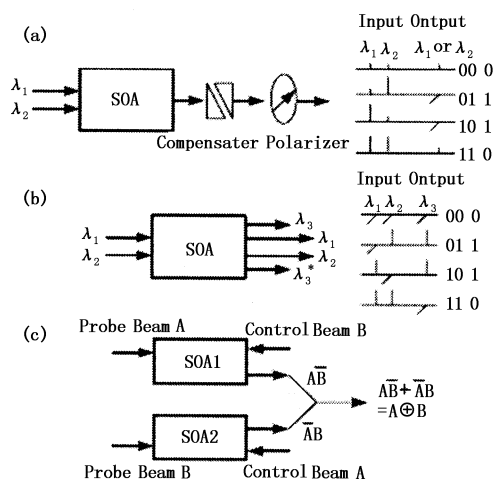


图1 基于 SOA 本身的非线性效应的全光异或门方案

(a)基于 SOA 的 XPM 效应的逻辑门方案;

(b)基于 SOA 的 FWM 效应的逻辑门设计;

(c)基于 SOA 的 XGM 效应的逻辑门方案

3 基于 SOA 辅助的干涉仪架构的全光异或门设计

采用 SOA 辅助的干涉仪架构的全光异或门方案主要是利用 SOA 的交叉相位调制(XPM)效应实现门限开关,主要包括基于超快速非线性干涉仪(UNI)结构、太赫兹非对称光解复用器(TOAD)以及马赫-泽德干涉仪结构的设计方案等。

3.1 基于 TOAD 结构的全光异或门设计

图 2 为典型的基于 TOAD 结构的全光异或门结构示意图,它由一个 3dB 耦合器、两个偏振选择型耦合器(PSC)、两个偏振控制器(PC)以及一个 SOA 组成。探测时钟信号由端口 R 进入光纤环,控制信号 A、B 经过两个 PSC 进入系统。当 A、B 脉冲不同时,也即一个为“0”、一个为“1”时,由于 SOA 中的 XPM 效应,控制信号将给光纤环中的两路探测信号带来一定的相位差,因此在端口 T 干涉输出“1”信号;而当 A、B 脉冲同为“0”或“1”时,两路探测信号经过 SOA 后没有产生相位差,由此在 T 端口没有干涉信号输出,从而实现对 A、B 两路信号的异或逻辑运算功能。

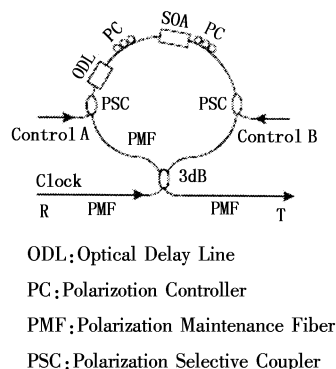


图2 基于 TOAD 结构的全光异或门结构示意图

文献[5]报道了采用上述结构的逻辑门方案的性能,在 10Gb/s 入射信号情况下,获得了对比度超过 11dB 的逻辑输出信号。

图 3 给出了一种改进了的基于 TOAD 结构的全光异或门^[6],其实现原理与图 2 所示方案类似,但由于其采用了对称放置非线性介质(NLE,可以采用 SOA 作为 NLE 材料),且没有采用偏振选择型耦合器,探测信号在光纤环往返一次调节两个 SOA 的增益及非线性相位,其有益效果是适用于高比特速率的逻辑运算,理论分析表明,在 80Gb/s 入射信号情况下,输出信号的对比特度可达 15dB 以上。

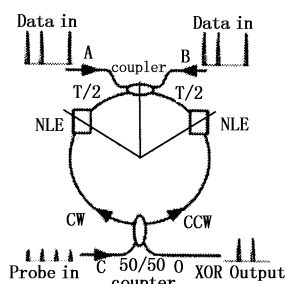


图 3 基于改进 TOAD 结构的全光异或门方案示意图

3.2 基于 UNI 结构的全光异或门方案

UNI 开关依靠信号的两个相互垂直的偏振分量的非线性相移实现信号的开关功能。在实现 XOR 功能时,如图 4 所示,入射时钟信号首先经过一段单偏振光纤成为线偏振光,之后经过一段慢轴与其偏振方向成 45° 的保偏光纤(PMF),信号分解成两个等幅成分,且产生一定时延。两路较强的信号 A 和 B 充当控制脉冲反向通过 SOA。设定系统参数,使得 A, B 脉冲不一致时探测信号在输出端经过 PMF 后获得干涉加强,而其余情况,也即同时为“0”或“1”时干涉相消,即可有效实现 XOR 功能。采用该方案要获得理想的输出,各个信号需要严格的同步,因此该方案对于时间抖动很敏感,但是该方案对入射信号的能量需求很低,文献[7]报道了在 40Gb/s 应用中,探测信号和控制信号的能量仅需 3fJ 和 4.5fJ 即可。而如果不采用 SOA 的话,其能量需求则为 200fJ 和 250fJ。

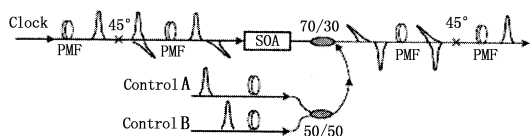


图 4 基于 UNI 结构的全光异或门方案结构示意图

3.3 基于 SOA-MZI 结构的全光异或门方案

一种典型的基于 SOA-MZI 结构的全光异或门

设计结构如图 5 所示,包括一个对称的 SOA-MZI: 由两个分光比为 50/50 的耦合器,两个光波分复用器 WDM1, WDM2 以及两个 SOA 组成。入射信号 AB 作为控制信号由 WDM1, WDM2 分别进入 MZI 的上下两臂,而探测时钟信号从端口 C1 经 C1 分成两路进入 MZI。当信号 A, B 的脉冲不一致时,两个 SOA 的增益不同,从而给探测信号带来不同的相移,导致其在端口 3 获得干涉增强,输出“1”信号;而当信号 A, B 的脉冲相同时, MZI 上下两臂处于平衡状态,探测信号在端口 3 获得干涉相消,输出“0”信号,由此实现了信号 A, B 的比特异或逻辑运算。

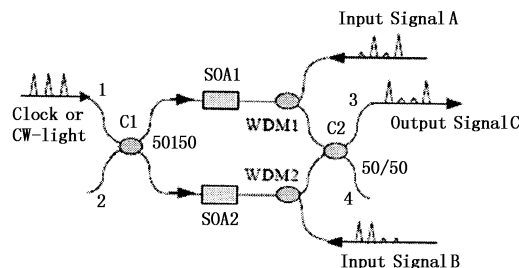


图 5 基于 SOA-MZI 结构的全光异或门方案结构示意图

该方案是现有的结构最紧凑、性能最稳定的方案之一。T. Fjelde 等人在文献[8]中报道了采用该方案获得了对比特度超过 13dB 的逻辑运算信号。然而, SOA 的增益恢复时间也即载流子的寿命时间限制了方案所适用的比特速率。为了克服这一不足,通常采用差分调制信号作为控制信号,也即在 MZI 的上下两臂均有 A, B 两路信号,只是在上臂中,信号 A 比信号 B 提前一定的时间差值,而在下臂中,信号 B 比信号 A 提前相同的时间差值。采用这种调制方式,可以有效克服 SOA 载流子寿命的限制,使逻辑门的运行速率上升到 40Gb/s 甚至更高,并获得了 12dB 对比度的逻辑信号^[9]。然而,该方案也属于偏振敏感类型,且对入射信号需要严格的时间和相位同步。

3.4 基于 SOA 辅助的迈克尔逊干涉仪(MI)结构的全光异或门方案

图 6 所示为一种基于 SOA 辅助的 MI 结构的全光异或门方案。该方案采用波导结构,两个 SOA 分别位于波导的两臂上,控制信号 A, B 从端口 1, 2 进入系统,探测信号光经过一个光环行器由端口 3 分成两部分,分别经过两个 SOA,并在端口 1, 2 处反射回传,再次经过 SOA 后在端口 3 干

涉输出。与 SOA-MZI 结构类似,只有当信号 A,B 不相同,端口 3 才有脉冲输出,其余情况均无干涉信号输出,由此而实现了对信号 A,B 的异或逻辑运算功能。

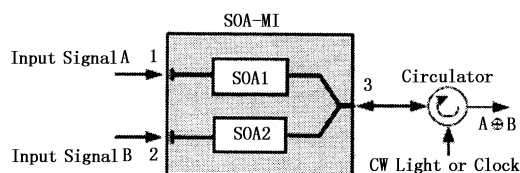


图6 基于 SOA-MI 结构的全光异或门方案结构示意图

已有的报道中,对于 10Gb/s 的入射信号,采用上述方案获得了 13dB 对比度的逻辑输出信号^[10]。由于采用差分调制信号同样可以克服方案中的载流子恢复时间所带来的不良影响,因此该方案可以实现 40Gb/s 速率的逻辑运算功能。

4 各种方案的比较

上述各方案中,均采用了 SOA 作为非线性介质,利用了其 CPM,FWM,XGM 及 XPM 效应等。对于基于 CPM 效应的设计,在运算速率及输出信号的对比度方面均难以获得理想结果。

基于 FWM 效应的方案可以实现超高速运算,但需要复杂的实现偏振独立性的设置,此外,其输入与输出信号功率比值也不够理想。因此,FWM 方案更适于在超高速例如 100Gb/s 及以上的场合中使用。

对于 XGM 效应的逻辑门方案,如果采用增益对偏振不敏感型号的 SOA,则对应的逻辑门设计也具有偏振不敏感性,而且输入输出功效高。但由于 XGM 效应引起的啁啾特性,采用该方案难以获得高对比度的逻辑运算信号。

目前大部分报道的逻辑门设计都是基于 SOA 中的 XPM 效应,且采用了一定形式的干涉仪结构,所采用的干涉仪可以基于光纤构造,也可以基于波导形式。基于波导结构的设计相对而言更易于集成。这些方案通常具有低功耗且适于高比特速率运算的特性,此外,该类方案往往还同时具有 2R 或 3R 功能。其中,基于 TOAD 结构的设计仅适用于 RZ 入射信号,且对偏振敏感,体积较为庞大,不利于实际应用。基于 UNI 结构的方案有利于实现高速率逻辑运算,但需要信号的严格同步,对时间抖动非常敏感;而基于 MZI 和 MI 结构的设计结构简单、紧凑,易于集成,此外由于其运行速率

可以通过差分调制格式而得以提高,因而获得了特别关注,且出现了最多基于该类型设计的研究和报道。未来的网络是建立在传输和交换节点处均消除了电子瓶颈的全光网络,因此全光逻辑门的发展趋势应该是能够取代电子速率极限的设计方案,也即应该朝着高速率即 40Gb/s 或以上的开关速率的方向发展。

参考文献:

- [1] H Soto, D Erasme, G Guekos. 5 Gb/s XOR optical gate based on cross-polarization modulation in semiconductor optical amplifiers[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2001, 13(4):335-337.
- [2] Kit Chan, et al. Demonstration of 20 Gb/s all-optical XOR gate by four-wave mixing in semiconductor optical amplifier with RZ-DPSK modulated inputs[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2004, 16(3):897-899.
- [3] K Vahala, R Paiella, G Hunziker. Ultrafast WDM logic[J]. IEEE J. Sel. Topic in Quantum Electron., 1997, 3(2):698-701.
- [4] Jae Hun Kim, et al. All-optical XOR gate using semiconductor optical amplifiers without additional input beam[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2002, 10:1436-1438.
- [5] T Houbavlis, et al. 10Gbit/s All-optical boolean XOR with SOA fiber sagnac gate[J]. Electron. Lett., 1999, 35(19):1650-1652.
- [6] Yunfeng Zhou, et al. Novel ultrafast all-optical XOR scheme based on sagnac interferometric structure[J]. IEEE J. of Quantum Electron., 2005, 41(6):823-827.
- [7] B S Robinson, et al. 40Gbit/s All-optical XOR using a fiber-based folded ultrafast nonlinear interferometer[C]. OFC'02, Anaheim, USA, 2002, 3:561-563.
- [8] T Fjelde, et al. Demonstration of 20Gbit/s All-optical logic XOR in integrated SOA-based interferometric wavelength converter[J]. Electron. Lett., 2000, 36(22):1863-1864.
- [9] Ling Wang, et al. Performance analysis of all-optical XOR gate using SOA-MZI with differential modulation scheme[J]. Microwave & Opt. Technol. Lett., 2004, 40(2):173-177.
- [10] T Fjelde, 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.