

几种基于非线性效应的全光逻辑门及其发展

戴培¹, 曹文华², 徐平²

(1. 五邑大学信息科学研究所, 广东 江门 529020; 2. 深圳大学电子科学与技术学院, 广东 深圳 518060)

摘要:在未来的超高速光纤系统、全光信息处理及光子计算机系统中,全光数字逻辑器件将成为必不可少的基本单元。本文介绍了几类非线性全光逻辑门的基本结构及工作原理。分析了它们的优缺点,展望了未来的发展趋势。

关键词:全光逻辑门;交叉相位调制;交叉增益调制;半导体光放大器;四波混频

中图分类号:TN253

文献标识码:A

Several nonlinear effect-based all optical logic gates and their developments

DAI Pei¹, CAO Wen-hua², XU Ping²

(1. Institute of Information Science, Wuyi University, Jiangmen 529020, China;

2. College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: All-optical digital logic devices play an important role in future ultra-high speed optical fiber communication systems, all-optical signal processing and photonic computer systems. In this paper the basic configurations and principles of several all optical logic gates are introduced, their advantages and disadvantages are analyzed, the present status of this field is summarized and reviewed. The trend of their development is also discussed.

Key words: all-optical logic gate; XPM; XGM; SOA; FWM

1 引言

基于光学非线性的全光逻辑门器件是实现高速信息传输和处理的基础。在未来的全光网络中,光交换、光计算和光传输是实现全光信号处理的核心单元,而它们都需要用到全光数字逻辑操作。此外,光逻辑门还可以实现全光信号提取、全光地址识别和全光复用/解复用等^[1-2]。因此,在未来的全光高速通信网络和新一代光计算机中将有着巨大的应用潜力。本文介绍了几类基于非线性效应工作的全光逻辑门,并对其各自的特点进行了比较。重点介绍了目前运用比较广泛的基于半导体光放大器的全光逻辑门。

2 基于交叉相位调制的全光逻辑门

在人们对于光学克尔(Kerr)非线性效应研究的基础上,1983年,Kenju Otsuka首次通过分束镜和Kerr媒介的组合结构在非线性环境中观察到了全光

逻辑与门(AND)和或门(OR)操作^[3]。随后,Ken-ichi Kitayama等人又从理论和实验上证实了基于光纤克尔效应的全光逻辑与门的可行性^[4]。

上述克尔效应是指一类介质折射率与被照射光强有关的非线性现象,包括自相位调制(SPM)和交叉相位调制(XPM)。一种典型的基于XPM效应的全光逻辑门是孤子牵引逻辑门。它起源于高双折射率光纤中孤子俘获这一非线性现象,由M. N. Islam首次从理论和实验上进行了全面研究^[5-7],基本原理如下:在数字逻辑中,每个光脉冲被指定为一个时隙,时隙宽度由时钟速度决定,如果一个信号脉冲与一个正交偏振的控制脉冲一起入射进光纤,而且控制脉冲足够强,则在碰撞过程中控制脉冲可捕获这

作者简介:戴培(1986-),男,硕士研究生,主要研究方向为高速光纤通信系统。E-mail:dp0405604@163.com

收稿日期:2010-01-17;**修订日期:**2010-03-23

个信号脉冲。这样,XPM 效应会导致二者的群速度发生改变,互相牵引的结果使得二者均被牵引而离开指定的时隙。换句话说,光纤输入端有无信号脉冲取决于控制脉冲是否能存在于指定的时隙。这种时域的移动就构成了基本逻辑元件,并能完成更复杂的逻辑操作。因为作为孤子传输的控制脉冲通过 XPM 相互作用拉动其时隙,所以称此器件为孤子牵引逻辑门。图 1 所示是一个典型的全光或非门 (NOR) 结构。

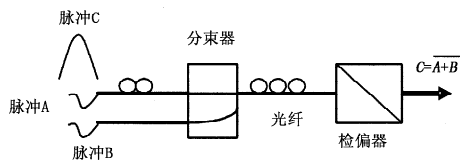


图1 基于 XPM 的全光或非门

其中, C 为控制脉冲,其脉宽为 500 fs,中心波长接近 $1.685\ \mu\text{m}$ 。 A 和 B 为输入信号脉冲且偏振态和 C 正交,两端光纤的长度分别为 75 m 和 350 m,光纤的偏振模色散大约为 80 ps/km。当 $A=0, B=0$ 时,脉冲 C 因为无 XPM 相互作用,从而到达指定时隙,输

出状态为逻辑“1”;当 $A=0, B=1$ 时,信号脉冲 B 和控制脉冲 C 通过 XPM 相互作用,改变了控制脉冲传输速度,使其不能到达指定时隙,输出状态为逻辑“0”;同理,对于 $A=1, B=0$ 以及 $A=B=1$ 两种情况,也由于控制脉冲和信号脉冲之间的 XPM 相互作用,使得输出状态为逻辑“0”。

自从 1989 年首次证明了这种逻辑门以来,现已取得了很大进展。这种孤子牵引逻辑门输出逻辑判决是规定脉冲能不能在指定时隙到达,由于光纤非线性较弱,因此设计这种全光逻辑门所需光纤较长,并且稳定性不高,因此很难得到实际运用。

3 基于萨格纳克干涉仪的全光逻辑门

萨格纳克 (Sagnac) 干涉仪是用一段光纤将光纤耦合器的两个输出端口连接起来形成一个环。若耦合器中采用 3 dB 结构,则所有输入光全部被反射, Sagnac 环相当于一个全反射镜。在 1990 年, M. Jinno 和 T. Matsumoto 通过非线性 Sagnac 干涉仪成功设计出了异或门 (XOR)、与门和反相器^[8]。实验方案如图 2 所示。

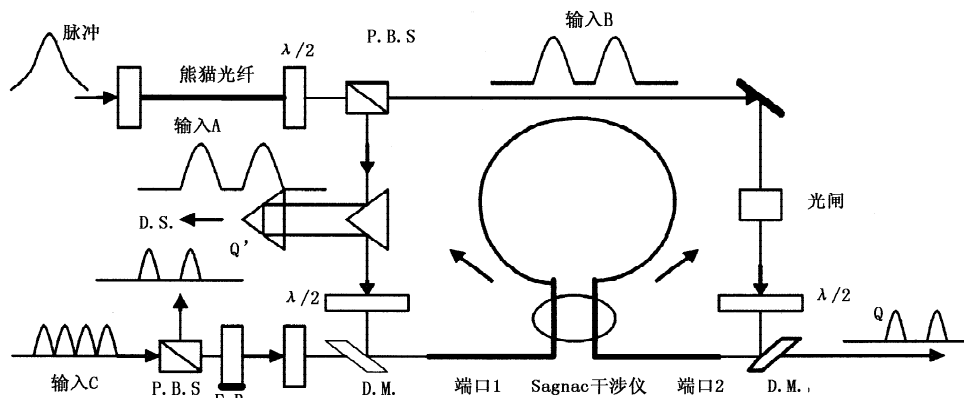


图2 基于 Sagnac 干涉仪的全光逻辑门

其中, F. R 为 45° 法拉第旋光器, D. M. 为分色镜, $\lambda/2$ 为半波片, P. B. S 为偏振分束器, D. S. 为色散延时线, 确保输入脉冲 A 和脉冲 B 能够同时入射进 Sagnac 干涉仪的两个端口, 光闸在必要时能够关闭输入脉冲 B 。 Q 和 Q' 为输出端。

锁模 Nd:YAG 激光器产生的高强度脉冲通过高双折射率的熊猫光纤后, 产生了两正交偏振的输入脉冲 A 和输入脉冲 B , 该实验中脉冲 A 和脉冲 B 延时 260 ps。输入脉冲 C 为光时钟, 全为逻辑“1”状态。当输入脉冲 A 和 B 的逻辑状态同为“0”时, C 被 Sagnac 干涉仪全反射, 从而 Q 无脉冲输出, 逻辑状态为“0”, 而 Q' 的逻辑状态为“1”; 当输入脉冲 A 和 B 中只有一个逻辑状态为“1”时, C 和输入脉冲的 XPM 改变了反向传输的两脉冲中一个脉冲的相

移, C 在 Sagnac 干涉仪中反向传输的两脉冲的平衡被打破, 从而有大部分脉冲能量在端口 2 输出, Q 的逻辑状态为“1”, 端口 1 只有少数脉冲能量输出, 此时 Q' 的逻辑状态可判为“0”; 当输入脉冲 A 和 B 同为逻辑状态“1”时, C 在 Sagnac 干涉仪中反向传输的两脉冲由 A 和 B 致 XPM 产生的相移相同, 此种状态和无输入脉冲 A 和 B 一样, 端口 2 无输出, Q 逻辑状态为“0”, Q' 逻辑状态为“1”。这样 Q 就代表了异或门的输出, Q' 则代表了同或 (XNOR) 门的输出。获得与门输出的道理和上述类似, 不同之处是通过光闸关闭了输入脉冲 B , 因此在有脉冲 A 的情况下, C 在 Sagnac 干涉仪中反向传输的两脉冲的平衡被打破, 端口 2 就会有大部分能量得到输出, 输出 Q 的逻辑状态为“1”; 无脉冲 A 输入时, Q 的逻辑状态

为“0”, Q 端即为 A 和 C 的逻辑与操作。

该实验中测得的光逻辑操作所需的人射脉冲的能量为 0.18 nJ, 由于所需能量高, 在实际运用中, 必须增加光纤环的长度。当光纤长度增加至 2 km, 入射脉冲的能量可降为 1.8 pJ。另外, 这种全光逻辑门不能级联, 输出的消光比低。虽然这种全光逻辑门具有高稳定性, 并且能够处理速率高达 100 Gbit/s 全光信息, 但是所需光纤长度太长, 不便于集成。

4 基于半导体光放大器的全光逻辑门

由于光纤中的非线性效应较弱, 实现光纤逻辑门所需的光纤较长, 人们把目光投向了半导体光放大器(SOA)。半导体光放大器能够提供很高的非线性^[9], 如: 交叉相位调制(XPM)、交叉增益调制(XGM)、交叉偏振调制(XPolM)和四波混频(FWM); 此外 SOA 易于集成, 制作成本也很低。在 2002 年, 研究人员设计出了全光或非门^[10], 仅用了两个 SOA。原理如图 3 所示。

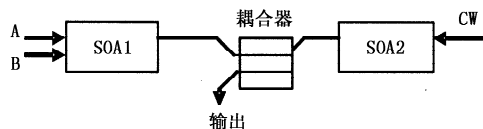


图3 基于SOA的全光或非门

当输入 A 和 B 为低能量时, 可视为逻辑状态“0”, 连续波(CW)经 SOA2 放大后再通过 3 dB 耦合器, 从而在输出端得到逻辑状态“1”。当输入端 A 和 B 有任意一个为高能量输入时, 输入能量首先被 SOA1 放大, 再通过耦合器传输至 SOA2, 吸收 SOA2 大部分载流子, 因而 SOA2 对 CW 提供的增益将减少, CW 通过 SOA2 的能量很少, 耦合器输出端得到低能量, 视为逻辑状态“0”。同理, 当 A 和 B 输入同时为高能量时, 由于 SOA2 的增益饱和, 输出端能量也小, 视为逻辑状态“0”。从而得到光或非门。

在另一研究中^[11], 用两个 SOA 就实现了与非门(NAND), 而且只要稍加改动就可以设计为异或门。原理如图 4 所示。

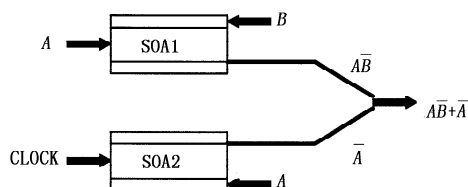


图4 基于SOA的全光与非门

图 4 中, 对于 SOA1, 输入为探测脉冲 A 和泵浦脉冲 B , 输出为 AB , 即当 B 端有脉冲输入时 ($B=1$), SOA1 饱和, 输出 $AB=0$; 当 $B=0$ 时, SOA1 的输出 $AB=A$ 。对于 SOA2, 两个输入分别是时钟信号

(CLOCK) 和探测脉冲 A (可视为从 SOA1 的 A 输入端分出一路)。显然, SOA2 的输出为 $\bar{A}$, 即当输入 A 为高能量 ($A=1$) 时, SOA2 饱和, 输出端不能得到放大的时钟信号 (输出端为 0); 当输入 A 为低能量时 ($A=0$), 时钟信号经 SOA2 得到放大 (输出端为 1)。因此, 如果将 SOA1 和 SOA2 的两个输出耦合到一起, 便可得到输出 $\bar{A} + A\bar{B}$, 它是一个与非门。显然, 若将输入时钟信号换为脉冲 B , 则在 SOA2 的输出端可得到 $\bar{A}B$, 总输出为 $\bar{A}B + A\bar{B}$, 从而得到异或门。

随后的研究中, 又有基于 XGM 的只需一个 SOA 的全光逻辑门被提出^[9,12]。图 5 所示是一个与门级联或非门的结构图。

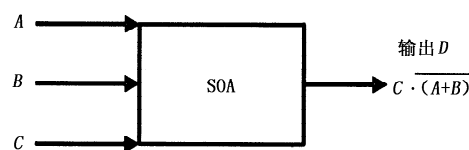


图5 基于SOA的全光AND-NOR门

其中, C 为探测输入脉冲, D 为探测输出脉冲, A 和 B 为泵浦输入脉冲。只要泵浦输入脉冲 A 和 B 中有一个是高能量, 即逻辑状态“1”时, SOA 就会出现增益饱和, 探测输入脉冲无法通过 SOA 得到输出, 此时探测输出 D 逻辑状态为“0”。当泵浦输入脉冲信号同为低能量, 即逻辑状态“0”, SOA 不会发生增益饱和, 这时探测输出 D 的状态将由探测输入脉冲决定, 当探测输入脉冲为低能量时, 输出逻辑状态为“0”, 探测输入脉冲为高能量时, 输出逻辑状态为“1”。因此, 图 5 中 A 和 B 构成了或非门, 与 C 又构成了与门。最终输出结果为: $C \cdot (A+B)$ 。

SOA 虽然具有能够提供很高的非线性、易于集成等优点, 但其非线性响应速度相当慢, 因为需要利用放大器有源区内电子-空穴对的复合, 载流子的寿命决定了其非线性响应时间约为 1 ns, 所以制作出来的设备响应速度有限, 不利于以后超快全光切换和光子计算机的发展。

5 基于光纤耦合器的全光逻辑门

由于高速光通信的发展需要, 人们重新对以前的基于光纤非线性的全光逻辑门进行了大量的研究, 其中一种基于非线性光纤耦合器的全光或门已被提出^[13]。基本结构如图 6 所示。

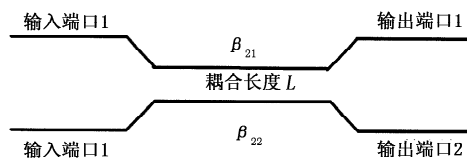


图6 基于非线性光纤耦合器的全光或门

这是一个四端口双芯双向光纤耦合器,纤芯耦合长度为 L ,纤芯1和纤芯2的色散系数分别为 β_{21} 和 β_{22} ($\beta_{22} > \beta_{21}$),数值计算中采用孤子脉冲输入,即输入脉冲形状为 $N \text{sech}(\tau)$,其中 N 代表孤子振幅,对于确定的光脉冲能量输入, N 的大小由纤芯色散系数决定。信号脉冲能否从一根纤芯耦合到另一根纤芯,取决于输入孤子振幅是否低于某一临界值。例如:对于一定能量的输入脉冲,当其从端口1输入时,由于纤芯1的色散系数较小,在纤芯1中的孤子振幅可能高于上述临界值,耦合不明显,大部分能量从端口1输出。因而,输出端口1的逻辑状态为“1”,输出端口2逻辑状态为“0”;当具有同样能量的脉冲从输入端口2入射,由于 $\beta_{22} > \beta_{21}$,这时在纤芯2中孤子的振幅低于临界值,孤子在耦合器中发生耦合,大部分能量从输出端口1出射,即为逻辑“1”状态,输出端口2为逻辑“0”状态;同理,当两孤子脉冲同时从输入端口1、2入射时,输出端口1的逻辑状态也为“1”,因而输出端口1就代表了或门的输出。研究中通过优化耦合系数,并使 β_{22}/β_{21} 为3,当脉冲从输入端口1入射时,输出端口1、2的输出能量比值达到了4:1,且输出孤子脉冲没有畸变,可以准确判决输出逻辑状态。此外,通过数值计算,当入射孤子脉宽只有几个皮秒时,需要的耦合器长度要几百米,当入射孤子脉宽为飞秒量级时,耦合长度可减为几米,这在光时分复用(OTDM)领域完全可被实际运用,因为光时分复用所需的脉冲宽度很短。

6 其他

利用光脉冲在光波导中的四波混频现象也可设计全光逻辑门,早期由于较难实现相位匹配,四波混频的运用受到限制。最近发现了一种PPLN材料可以实现准相位匹配,引起基于四波混频的全光逻辑门开始被大量报道^[14-16]。其中的与门可以这样理解:只有当输入光脉冲 A 和 B 同时同步入射进PPLN, A 和 B 才会通过准相位匹配实现四波混频,产生新的频率分量。在输出端接上特定波长的光滤波器,从而得到输出逻辑“1”状态,而当只有 A 或者 B 入射时,不会发生四波混频现象,无法产生新频率,得到输出逻辑“0”状态。这类基于四波混频的全光逻辑门具有响应速度快的优点。

7 结束语

本文综述了几类非线性的全光逻辑门,重点介绍了目前运用较多的基于SOA的逻辑门及其工作

原理。全光逻辑门在未来高速全光通信系统、光子计算机中具有很重要的应用。目前基于SOA的全光逻辑门占据主导地位,但因为SOA的响应速率低,特别是随着光时分复用技术逐渐成熟,因而不适宜应用在未来超高速光通信系统中。光子晶体光纤能够提供比普通光纤强很多的非线性,设计的光逻辑器件所需的光纤长度将会大大缩短,因而未来的全光逻辑器件的设计将以光子晶体光纤为基础。但怎样使基于光子晶体光纤的逻辑器件小型化,易于集成,这些技术难题将有待解决。

参考文献:

- [1] Martinez M, Ramos F, Marti J. All-optical packet header processor based on cascaded SOA-MZIs [J]. Electron. Lett., 2004, 40(14): 894-895.
- [2] Martinez M, Liu Y, Clavero, et al. All-optical processing based on a logic XOR gate and a flip-flop memory for packet-switched networks [J]. IEEE Photonics Technol. Lett., 2007, 19(17): 1316-1318.
- [3] Kenju Otsuka. Nonlinear antiresonant ring interferometer [J]. Optical society of America, 1983, 8(9): 471-473.
- [4] Ken-ichi Kitayama, Yasuo Kimura, Shigeyuki Seikai. Fiber-optical logic gate [J]. Appl. Phys. Lett., 1985, 46(4): 317-318.
- [5] M N Islam. Ultrafast all-optical logic gates based on soliton trapping in fibers [J]. Optical Society of America, 1989, 14(22): 1257-1259.
- [6] M N Islam, C E Soccolich, D A B. Miller. Low-energy ultrafast fiber soliton logic gates [J]. Optical Society of America, 1990, 15(16): 909-911.
- [7] M N Islam. All-optical cascable NOR gate with gain [J]. Optical Society of America, 1990, 15(8): 417-419.
- [8] M Jinno, T Matsumoto. Ultrafast all-optical logic operations in a nonlinear Sagnac interferometer with two control beams [J]. Optical Society of America, 1991, 16(4): 220-222.
- [9] Ammar Sharaiha, Joseph Topomondzo, Pascal Morel. All-optical logic AND-NOR gate with three inputs based on cross-gain modulation in a semiconductor optical amplifier [J]. Optics Communications, 2006, 265(1): 322-325.
- [10] Ali Hamie, Ammar Sharaiha, Mikael Guegan, et al. All-optical logic NOR gate using two-cascaded semiconductor optical amplifiers [J]. IEEE. Photonics Technology Letters, 2002, 14(10): 1439-1441.
- [11] S H Kim, J H Kim, B G Yu, et al. All-optical NAND gate

- using cross-gain modulation in semiconductor optical amplifiers [J]. Electronics Letters, 2005, 41 (18): 331 – 334.
- [12] Saurabh Kumar, Alan E Willner. Simultaneous four-wave mixing and cross-gain modulation for implementing an all-optical XNOR logic gate using a single SOA [J]. Optics Express, 2006, 14(12): 5092 – 5097.
- [13] Hamid Hatami-Hanza, P L Chu. logic operations in dispersion-mismatched nonlinear fibre couplers [J]. Optics Communications, 1996, (124): 90 – 94.
- [14] Jian Wang, Junqiang Sun, Qizhen Sun, et al. PPLN-Based flexible optical logic AND gate [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(3): 211 – 213.
- [15] J Wang, J Sun, X Zhang, et al. PPLN-based all-optical 40 Gbit/s three-input logic AND gate for both NRZ and RZ signals [J]. Electronics Letters, 2008, 44(6): 326 – 327.
- [16] B Li, D Lu, M I Memon, et al. All-optical digital logic AND and XOR gates using four-wave-mixing in monolithically integrated semiconductor ring lasers [J]. Electronics Letters, 2009, 45(13): 894 – 895.