

基于非线性光纤环镜的 40 Gb/s 可重构光逻辑门

王文睿¹ 于晋龙¹ 罗俊¹ 韩丙辰^{1,2} 郭精忠¹ 王菊¹ 刘毅¹ 杨恩泽¹

(¹ 天津大学电子信息工程学院光纤通信实验室, 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 提出了一种新型的基于非线性光纤环镜(NOLM)的可重构全光逻辑门实现方案。传统的基于 NOLM 的全光逻辑利用自相位调制效应或交叉相位调制效应,透射传输函数重构的自由度低,可实现的逻辑门种类较少。该方案在传统的结构基础上,分析了 NOLM 中探测光的偏振态的演化,以及输入光偏振态和环内偏振控制器对 NOLM 的传输特性的影响。理论分析和数值仿真结果表明在考虑 NOLM 中的非线性偏振旋转效应的情况下,可以更加自由地构建不同透射传输函数,从而利用单一 NOLM 结构,仅通过调节偏振控制器,即能够可重构地实现绝大部分基础组合逻辑。实验中,完成了两路 40 Gb/s 的数据信号之间的“非”、“与”、“或”、“或非”、“同或”、“异或”等各种基础组合逻辑,验证了方案的可行性。

关键词 信号处理;全光逻辑门;非线性光纤环镜;非线性偏振旋转;高非线性光纤

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0506003

40 Gb/s Reconfigurable All-Optical Logic Gate Based on Nonlinear Optical Loop Mirror

Wang Wenrui¹ Yu Jinlong¹ Luo Jun¹ Han Bingchen^{1,2}

Guo Jingzhong¹ Wang Ju¹ Liu Yi¹ Yang Enze¹

¹ *Optical Fiber Communication Laboratory, School of Electronic and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

² *School of Physics and Electronic Science, Shanxi Datong University, Datong, Shanxi 037009, China*

Abstract All-optical ultra-fast and reconfigurable logic gates have been implemented by exploiting simple and low-cost schemes based on nonlinear optical loop mirrors (NOLM). Conventional NOLM-based all-optical logic gates utilize the self-phase modulation effects or cross-phase modulation effects. Thus, types of logic gates that can be achieved are limited by the low degree of freedom in reconstruction of the transmission function. Here, an improved scheme of NOLM-based all-optical logic gate is proposed by exploiting the nonlinear polarization rotation in the NOLM. The evolution of the polarized state of light is analyzed as well as the effect of the polarization of the input light and the polarization controller in NOLM. Theoretical analysis and numerical simulation results show that all the basic logic gates can be realized using a single NOLM structure, only by adjusting the polarization controller. Because it is more free to rebuild the transmission function when the nonlinear polarization rotation effect is taken into account. We demonstrate the feasibility of the scheme experimentally by realizing all-optical logic gates of “NOT”, “AND”, “OR”, “NOR”, “XOR”, “NXOR” at 40 Gb/s operation.

Key words signal processing; all-optical logic gate; nonlinear optical loop mirror; nonlinear polarization rotation; high-nonlinearity fiber

OCIS codes 060.4370; 320.7140; 200.4660

1 引言

随着光通信技术的不断发展,光纤的传输容量

不断提高,目前已达单纤 45.2 Tb/s^[1]。但与此同时,在现有光电网络中,交换则仍旧在电域内完成,

收稿日期: 2011-11-04; 收到修改稿日期: 2011-12-14

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60736035)和国家 973 计划(2010CB327603)资助课题。

作者简介: 王文睿(1980—),男,博士,讲师,主要从事高速光纤通信系统方面的研究。E-mail: wangwenrui@tju.edu.cn

由于受到电子器件速率的限制(所谓的“电子瓶颈”),决定了高速光信号的交换很难以分组的形式来完成,只能进行光路交换和突发交换。这样一方面导致了通信体系的复杂化,大大降低了分组交换本身具有的灵活、高效的优点;另一方面也使得最终用户很难得到宽带的优质服务。解决这个问题的办法是直接采用高速率的光分组交换技术。而在光分组交换网络中,高速、小时延的全光信号处理已经成为光网络发展中至关重要的关键技术,是进一步解决分组交换中报头识别、分组处理等技术的基础。

作为光信号处理的基础,高速全光逻辑成为近年来国内外的研究热点之一。从本质上来讲,高速全光逻辑可视为一个非线性光控光开关。因此,各种非线性器件被广泛应用于全光逻辑,包括半导体放大器(SOA)^[2~6]、马赫-曾德尔半导体放大器(MZ-SOA)^[7]、周期极化铌酸锂晶体(PPLN)^[8,9]、高非线性光纤(HNLF)^[10,11]、超快非线性干涉仪(UNI)^[12]、太赫兹光学解复用器(TOAD)^[13]和半导体环形谐振腔^[14,15]等。与此同时,利用非线性光纤环境(NOLM)中自相位调制(SPM)效应或交叉相位调制(XPM)效应作为非线性光开关在全光逻辑中也得以应用。对于全光逻辑门来讲,可重构则意味着在可以利用单一的单元架构构成多样复杂的组合逻辑,采用相对简单的系统架构,更加灵活地实现更为复杂的功能。近年来,NOLM中的非线性偏振旋转(NPR)效应越来越引起研究人员的重视^[16],利用NPR效应可以更加灵活地构建各种不同的非线性传输特性^[17],使得基于NPR效应的光逻辑门有

非常好的可重构性。

本文提出了一种新型基于NOLM的可重构全光逻辑门实现方案,该方案综合利用了NOLM中的XPM效应和NPR效应,从而利用单一NOLM结构,仅通过调节偏振态即可实现“非”、“与”、“或”、“或非”、“异或”、“同或”等绝大部分基础组合逻辑。理论分析了NOLM中的XPM效应和NPR效应,及实现可重构光逻辑门的机理。在此基础上,实验完成了40 Gb/s的全光基础组合逻辑门,验证了基于NOLM的可重构光逻辑的可行性。

2 工作原理和分析

基础组合逻辑从本质上而言,就是通过非线性开关门将输入信号A和B的不同组合映射为0、1两个输出结果。以图1(a)表示的情况为例:A、B输入功率存在三种不同可能性: P_{in0} (A和B均为0码), P_{in1} (A和B中仅有一个1码)和 P_{in2} (A和B均为1码),如果能构建一个合适的传输函数 $T(P_{in})$,使得 $T(P_{in0}) = T(P_{in1}) = P_{out0}$, $T(P_{in2}) = P_{out1}$,则当且仅当A和B均为1码时,输出1码,其他情况下输出0码,这样就实现了“与”逻辑。类似的,如图1(b)和图1(c)表示“或”和“异或”以及其他基础组合逻辑均可以通过构建合适的非线性传输函数得到。因此,实现可重构光逻辑门的关键在于寻找一个传输特性可灵活重构的非线性开关。本文中,采用NOLM结构这一功能。

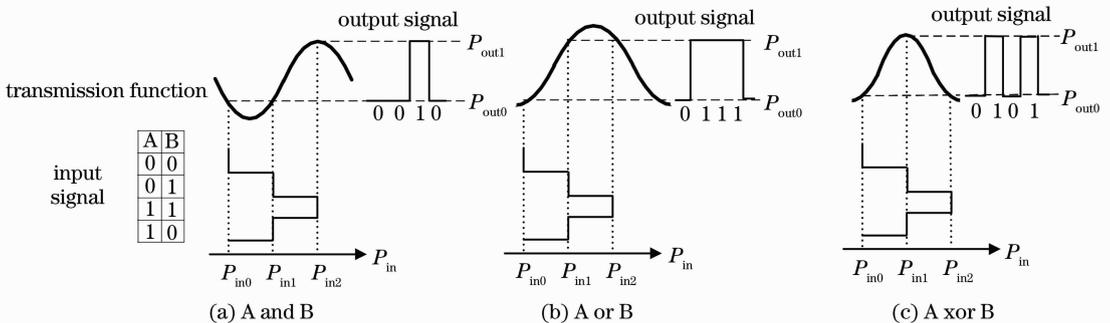


图1 利用非线性传输特性实现光逻辑原理图

Fig. 1 Schematic diagram of optical logic utilizing the nonlinear transmission function

NOLM的典型结构如图2所示,即用一段光纤将耦合器的两个输出口连接起来形成一个环。假设探测光功率为 P_0 的连续光,控制光功率为 P_C ,耦合器的分光比为 ρ ,环境中光纤长度为 L ,非线性系数为 γ 。首先,忽略NOLM中的偏振效应,这样

NOLM中只需考虑XPM效应,即在顺时针光和逆时针光之间引入了一个正比于控制光功率 P_C 的非线性相对相移量 ϕ_{XPM} :

$$\phi_{XPM} = \gamma P_C L. \quad (1)$$

此时,NOLM的透射率函数可以表示为^[18]

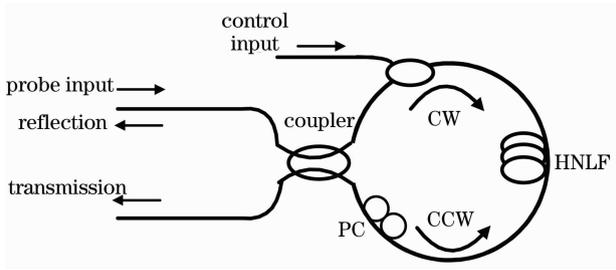


图 2 非线性光纤环镜系统框图

Fig. 2 System block of nonlinear optical loop mirror

$$T_{\text{XPM}} = 1 - 2\rho(1 - \rho) \times \{1 + \cos[(1 - 2\rho)\gamma P_0 L + \gamma P_c L]\}, \quad (2)$$

考虑理想 3 dB 耦合器的情形, 当 $\rho=0.5$ 时, 则有

$$T_{\text{XPM}} = 1 - \frac{1}{2}[1 + \cos(\gamma P_c L)] = \frac{1}{2}[1 - \cos(\gamma P_c L)], \quad (3)$$

由 (3) 式, 图 3(a) 给出了 NOLM 透射率和 $\gamma P_c L$ 的关系曲线。在光纤一定的情况下, 即 γ 和 L 一定的情况下, NOLM 的透射率可由控制光光强 P_c 唯一决定, 且当 $P_c=0$ 时, $T_{\text{XPM}}=0$, 即控制光为“0”码时, NOLM 透射端无光输出。因此, 基于 XPM 效应的 NOLM 的传输函数仅有控制光光强一个自由度, 可以实现的逻辑门种类受到较大的限制。

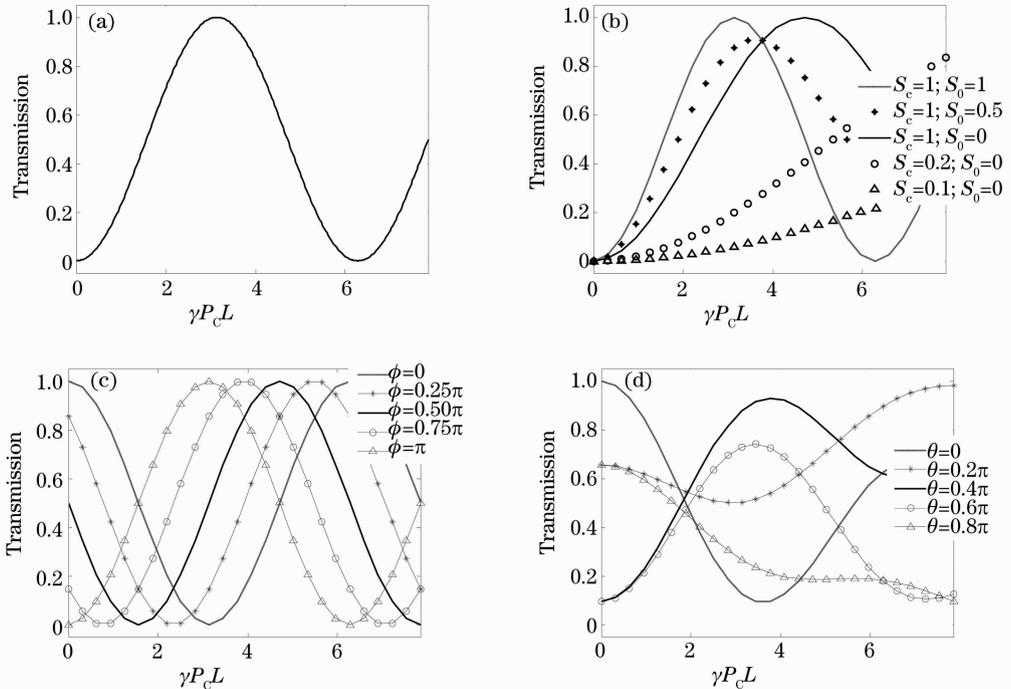

 图 3 NOLM 透射传输函数。(a) 只考虑 XPM 效应; (b) S_0, S_c 的影响; (c) ϕ 的影响; (d) θ 的影响

Fig. 3 Simulation results of the transmission function. (a) When only XPM effect taken into account;

(b) effects of S_0 and S_c ; (c) effect of ϕ and (d) effect of θ

进一步考虑探测光和控制光的偏振态及其在 NOLM 中的演化。对于偏振态的分析, 采用通用的琼斯矩阵分析法。在忽略插损的前提下, 偏振控制器可以等效为级联的旋偏器和相位延时器, 即可以用两个琼斯矩阵 M_1 和 M_2 相乘表示。其中

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-j\phi) \end{bmatrix}, \quad M_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (4)$$

M_1 和 M_2 分别表示了偏振控制器的相移 ϕ 和偏转角旋转 θ 。进一步采用上文中的 3dB 耦合器理想情况的假设, 则顺时针和逆时针光可以写成琼斯矢量的形式, 即

$$A_{\text{CW}} = \sqrt{0.5} \begin{bmatrix} A_{0x} \\ A_{0y} \end{bmatrix}, \quad A_{\text{CCW}} = j \sqrt{0.5} \begin{bmatrix} A_{0x} \\ A_{0y} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 A_{0x} 和 A_{0y} 分别是输入探测光在 x 和 y 两个偏振方向上光场的振幅。在高非线性光纤中, 外加控制光将在高非线性光纤的快轴和慢轴上产生非线性相移, 对于线性双折射光纤, 非线性相移可以表示为

$$\varphi_x = \gamma L \left(P_{cx} + \frac{2}{3} P_{cy} \right), \quad \varphi_y = \gamma L \left(\frac{2}{3} P_{cx} + P_{cy} \right), \quad (6)$$

式中 P_{cx} 和 P_{cy} 分别是控制光在 x 和 y 两个偏振方

向上的功率。这样,在透射输出端,顺时针方向探测光光场可以表示为

$$\mathbf{A}_{\text{CW}}^{\text{out}} = \frac{1}{2}(\mathbf{M}_2\mathbf{M}_1) \begin{bmatrix} \exp(j\varphi_x) & 0 \\ 0 & \exp(j\varphi_y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{0x} \\ A_{0y} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} A_{0x} \cos \theta \exp(j\varphi_x) - A_{0y} \sin \theta \exp[j(\varphi_y - \varphi)] \\ A_{0x} \sin \theta \exp(j\varphi_x) + A_{0y} \cos \theta \exp[j(\varphi_y - \varphi)] \end{bmatrix}. \quad (7)$$

对于逆时针方向探测光,由于探测光和信号光反方向传输,可以忽略其 XPM 效应。则在透射输出端,逆时针方向探测光光场可以表示为

$$\mathbf{A}_{\text{CCW}}^{\text{out}} = \frac{j}{2}(\mathbf{M}_1\mathbf{M}_2) \begin{bmatrix} A_{0x} \\ A_{0y} \end{bmatrix} = -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} A_{0x} \cos \theta - A_{0y} \sin \theta \\ (A_{0x} \sin \theta + A_{0y} \cos \theta) \exp(-j\varphi) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

因此,透射光信号的光场可以表示为

$$\mathbf{A}_{\text{T}}^{\text{out}} = (\mathbf{A}_{\text{CW}}^{\text{out}} + \mathbf{A}_{\text{CCW}}^{\text{out}}). \quad (9)$$

定义探测光偏振分束系数 $S_0 = P_{0x}/(P_{0x} + P_{0y})$,则此时 NOLM 的透射率可以表示为

$$T_{\text{NPR}} = |\mathbf{A}_{\text{T}}^{\text{out}}|^2 / P_0 = \frac{1}{2} \{1 + S_0 [\cos^2 \theta \cos \varphi_x + \sin^2 \theta \cos(\varphi_x + \phi)] + (1 - S_0) [\cos^2 \theta \cos \varphi_y + \sin^2 \theta \cos(\varphi_y - \phi)] + \sqrt{S_0} \sqrt{(1 - S_0)} \cos \theta \sin \theta [2 + 2 \cos(\varphi_x - \varphi_y + \phi) - \cos \varphi_x - \cos \varphi_y - \cos(\varphi_x + \phi) - \cos(\varphi_y - \phi)]\}. \quad (10)$$

这样,NOLM 在 XPM 效应的基础上表现为偏振态的旋转演化,即非线性偏振旋转效应。若类似地定义控制光的偏振分束系数 S_c ,则传输函数可由 S_0, P_c, S_c, θ 和 ϕ 五个自由度控制,从而给 NOLM 的传输函数的构建带来了极大的自由度。

接下来,通过数值仿真的方法研究在 NPR 作用下 NOLM 的透射传输函数。固定 $\theta = 0.5\pi, \phi = \pi, S_c = 1$,改变 S_0 ,即输入光偏振态,如图 3(b)所示。可以发现透射传输函数的斜率随着 S_0 的变小而变缓,此时如果进一步调节 S_c ,也即控制光的偏振态,则透射传输函数的斜率可以进一步减小。而固定 $\theta = 0.5\pi, S_c = 1, S_0 = 1$,不同 ϕ 值下的透射传输函数如图 3(c)所示。可以看出,通过改变 ϕ 值可以改变无控制光功率条件下 NOLM 的透射率,实现透射传输曲线的平移。最后,固定 $\phi = \pi, S_c = 1, S_0 = 0.5$,改变 θ 值,得到的透射传输函数如图 3(d)所示。可见 θ 可以进一步调节 NOLM 的透射传输函数特性。这样通过综合调节 θ, ϕ, S_0 ,即可灵活地构建各种不同特性的传输函数以实现不同的基础组

合逻辑。

3 实验及结果分析

如图 4 为基于 NOLM 的全光逻辑门实验装置图。光信号由分布反馈式(DFB)半导体激光器(LD)产生,两路信号光 A 和 B 以及连续光 C 分别工作在 1552.5、1553.3、1550 nm。A 和 B 经 3 dB 耦合器合束后进入马赫-曾德尔型的 LiNbO₃ 光强度调制器(MZM)。误码仪 MP1800A 产生 10 Gb/s 伪随机码数据信号,经电复用器复用到 40 Gb/s 7 阶伪随机码后对信号光 A 和 B 进行调制。偏振控制器 PC1 和 PC2 分别用于调整信号光 A 和信号光 B 的偏振态,以保证 MZM 对两个波长信号光的调制幅度均达到最大值。调制后的信号光 A 和信号光 B 用波分解复用器(WDM)解复用后分为两路,其中信号光 B 经过一段光延时线(ODL)使得信号光 A 和 B 之间的码字不同。时延后的信号光 B 和信号光 A 经由 WDM 合束后,由大功率掺铒光纤放大器(HP-EDFA)放大至 25.4 dBm,作为控制光进

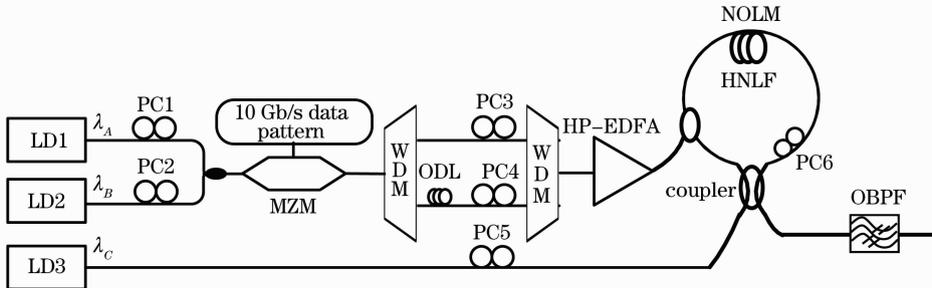


图 4 基于 NOLM 中 NPR 效应的可重构逻辑门实验装置图

Fig. 4 Experimental setup of all-optical reconfigurable logic gate based on NPR effect in NOLM

入 NOLM。同时连续光 C 作为探测光进入 NOLM。在 NOLM 环中,采用了长飞公司生产的高非线性光纤(HNLF),长度为 700 m,非线性系数 $\gamma = 11 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$,零色散波长为 1548 nm。在 NOLM 的透射输出端,用光带通滤波器(OBPF)滤出探测光 C ,带通滤波器通带形状为高斯型,3 dB 带宽为 0.3 nm。

经过相对延时后,信号光 A 和 B 的波形图分别如图 5(a),(b)所示,码字分别为“00000110000111010010”和“10011001001100000110”。由于 NOLM 中的 XPM 效应和 NPR 效应,实验中,仅通过改变 PC3-PC6 即可实现所有逻辑门。当只存在信号光 A 或者信号光 B 输入的情况下,通过 NOLM 可以实现“非逻辑”,分别得到 \bar{A} 和 \bar{B} 输出,如图 5(c),(d)所示。当 A 和 B

表 1 基于 NOLM 的可重构逻辑门输入和输出信号电域信噪比对照表

Table 1 Comparison on electric SNR of input and output signal of reconfigurable logic gate based on NOLM

	A	B	\bar{A}	\bar{B}	$A \cdot B$	$A+B$	$\bar{A}+\bar{B}$	$A \oplus B$	$A \otimes B$
SNR	6.6	6.7	6.5	6.4	5.8	6.1	5.9	6.0	5.7

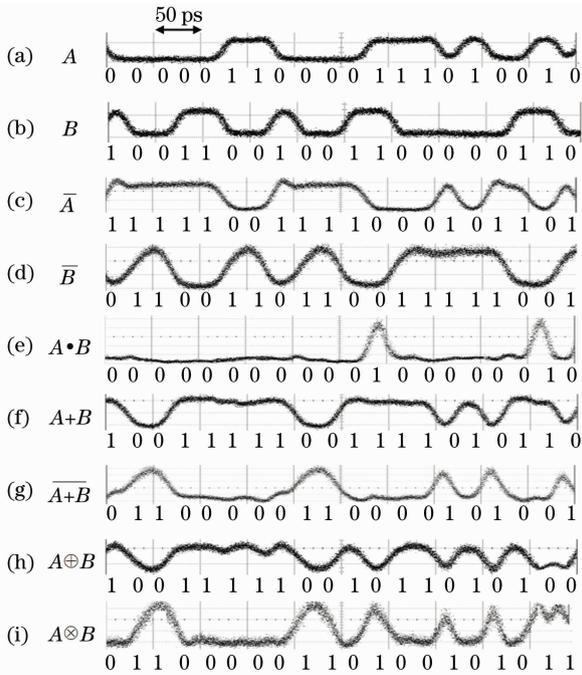


图 5 输入信号光 A 、 B 及各种组合逻辑输出波形图

Fig. 5 Waveform of the signal A , B and various combinational logic gates output

4 结 论

提出了一种新型的利用 NOLM 中 NPR 效应的可重构全光逻辑门实现方案。通过理论分析和数值仿真证明,考虑 NOLM 中的 NPR 效应,通过偏振输入光偏振态和环境中的偏振控制器,可以灵活

同时输入时,调节 PC,则分别可以实现“与”、“或”、“或非”、“异或”以及“同或”逻辑,各个逻辑的输出波形分别在图 5(e)~(i)中给出。这样,通过且仅通过偏振调节,利用 NOLM 结构实现了 40 Gb/s 信号 A 和 B 的大多数基础逻辑运算。

为了进一步衡量可重构逻辑门对信号的恶化,实验测量了输入信号和各种逻辑门输出信号的电域信噪比(SNR)。表 1 给出了测试结果,输入信号 A 和 B 的信噪比分别为 6.6 和 6.7。“非”门信噪比恶化较小, \bar{A} 和 \bar{B} 的信噪比分别为 6.5 和 6.4。输出信噪比最低的为 $A \otimes B$ 逻辑,信噪比为 5.7,与输入信号信噪比(SNR)相比,最大信噪比恶化不超过 1。信噪比的恶化主要是由于大功率 EDFA 引入的噪声导致的。

地调节 NOLM 透射端的传输特性,从而只需调节偏振态,就能够可重构地实现所有基础组合逻辑。实验完成了两路 40 Gb/s 的数据信号之间的“非”、“与”、“或”、“或非”、“异或”、“同或”逻辑,验证了方案的可行性。NOLM 的开关速率可达亚皮秒量级,因此采用该方案的全光逻辑门的速率可达每秒太比特以上,是突破现有电子瓶颈,实现超高速全光信号处理的一种具有吸引力的全光逻辑实现方案。

参 考 文 献

- 1 T. Kobayashi, A. Sano, A. Matsuura *et al.*. 45.2 Tb/s C-band WDM transmission over 240 km using 538 Gb/s PDM-64QAM single carrier FDM signal with digital pilot tone [C]. 37th European Conference and Exposition on Optical Communications, 2011, Th. 13.C. 6
- 2 K. Bhamri, G. K. Jayjee, N. Gupta *et al.*. A novel approach for SOA-based all-optical NAND gate [C]. 13th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2011, Tu. P. 15
- 3 Jianji Dong, Xinliang Zhang, Jing Xu *et al.*. 40 Gb/s all-optical logic NOR and OR gates using a semiconductor optical amplifier: experimental demonstration and theoretical analysis [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(6): 1710~1715
- 4 Zhihong Li, Guifang Li. Ultrahigh-speed reconfigurable logic gates based on four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(12): 1341~1343
- 5 Lilin Yi, Weisheng Hu, Hao He *et al.*. All-optical reconfigurable multi-logic gates based on nonlinear polarization rotation effect in a single SOA [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(3): 030603
- 6 Han Bingchen, Yu Jinlong, Zhang Litai *et al.*. The experimental research on 10 Gb/s all-optical half-subtractor by using semiconductor optical amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2082~2086

- 韩丙辰, 于晋龙, 张立台. 利用半导体光放大器实现 10 Gb/s 全光半减器的组合逻辑实验研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(8): 2082~2086
- 7 S. Singh, L. Lovkesh. Ultrahigh speed optical signal processing logic based on an SOA-MZI [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2011, **18**(2): 970~977
- 8 S. Kumar, A. E. Willner, D. Gurkan *et al.*. All-optical half adder using an SOA and a PPLN waveguide for signal processing in optical networks [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(22): 10255~10260
- 9 Ning Chunmei, Yang Aiyang, Shen Shikui *et al.*. Study on waveband optional optical sampling based on chirped periodically poled LiNbO₃ waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3270~3275
- 宁春梅, 杨爱英, 沈世奎等. 基于啁啾周期极化铌酸锂波段可选择光采样研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(11): 3270~3275
- 10 D. M. Lai, C. H. Kwok, K. K. Wong. All-optical picoseconds logic gates based on a fiber optical parametric amplifier[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(22): 18362~18370
- 11 Luo Xuan, Jiang Yang, Yu Jinlong *et al.*. Simultaneous optical signal dropping and cleaning by utilizing four-wave mixing effects based optical logic gate in optical fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2524~2528
- 罗旋, 江阳, 于晋龙等. 基于光纤中四波混频效应光逻辑门的信号同步提取与擦除[J]. 光学学报, 2010, **30**(9): 2524~2528
- 12 G. Theophilopoulos, K. Yiannopoulos, M. Kalyvas *et al.*. 40 GHz all-optical XOR with UNI gate[C]. 2001 Optical Fiber Communication Conference and Exhibit (OFC), 2001, MB2: 1~3
- 13 J. N. Roy, D. K. Gayen. Integrated all-optical logic and arithmetic operations with the help of a TOAD-based interferometer device-alternative approach [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(22): 5304~5310
- 14 Xie Sheng, Guo Weilian, Li Xianjie *et al.*. Design and fabrication of InP-based low threshold microring laser with unique unidirectional bistability operation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0302011
- 谢生, 郭维廉, 李献杰等. InP 基低阈值单向双稳态工作微环激光器的设计与制备[J]. 中国激光, 2011, **38**(3): 0302011
- 15 P. Phongsanam, C. TEEKA, S. Mitatha *et al.*. Simultaneous all-optical logic AND and OR gates using photonic circuits[J]. *Opt. & Photon. Lett.*, 2011, **4**(1): 17~24
- 16 E. A. Kuzin, N. Korneev, J. W. Haus *et al.*. Theory of nonlinear loop mirrors with twisted low-birefringence fiber[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2001, **18**(7): 919~925
- 17 O. Pottiez, E. A. Kuzin, B. I. Escamilla. Highly flexible switching characteristic using nonlinear polarization rotation in a nonlinear optical loop mirror [C]. Conference on Lasers and Electro - Optics/Quantum Electronics and Laser Science and Photonic Applications Systems Technologies, 2005, JTUC8
- 18 N. J. Doran, D. Wood. Nonlinear-optical loop mirror[J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(1): 56~58

栏目编辑: 谢婧