

# 基于高非线性光纤中非线性偏振旋转效应的全光逻辑门研究\*

王文睿<sup>1)†</sup> 于晋龙<sup>1)</sup> 韩丙辰<sup>1)2)</sup> 郭精忠<sup>1)</sup> 罗俊<sup>1)</sup> 王菊<sup>1)</sup> 刘毅<sup>1)</sup> 杨恩泽<sup>1)</sup>

1) (天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

2) (山西大同大学物理与电子科学学院, 大同 037009)

(2011年6月18日收到; 2011年8月3日收到修改稿)

提出了一种新型的基于高非线性光纤 (HNLF) 中非线性偏振旋转 (NPR) 效应的全光逻辑门实现方案. 将两路非归零码数据信号  $A$  和  $B$  以及一路直流光同时注入 HNLF, 光功率变化导致的非线性双折射在两个偏振分量上引入非线性相对相移, 从而导致光信号的偏振态旋转. 在 HNLF 输出端, 通过波分解复用器和偏振分束器同时滤出数据信号和直流光的正交偏振态, 从而同时实现多种基础组合逻辑, 并可以在同一段 HNLF 中实现较为复杂的半加器、半减器逻辑功能. 理论分析了信号光在 HNLF 中的偏振态演化, 以及利用 HNLF 中的 NPR 效应同时实现多种全光逻辑门的原理. 并在实验中得到了 10 Gbit/s 全光信号“与”、“非”、“或”、“同或”、“异或”、“ $\bar{A} \cdot B$ ”、“ $A \cdot \bar{B}$ ”、半加器、半减器等逻辑功能, 验证了方案的可行性.

**关键词:** 光通信, 全光逻辑门, 高非线性光纤, 非线性偏振旋转

**PACS:** 42.81.-i, 42.81.Gs

## 1 引言

近年来, 随着人们对信息的需求和依赖与日俱增, 新一代超高速光通信网络, 尤其是光分组交换网络已成为国际上的一个研究热点<sup>[1]</sup>. 而在光分组交换网络中, 随着分组长度的减小和对分组交换速度要求的提高, 高速、小时延的全光信号处理成为制约光网络进一步发展的瓶颈所在. 因此, 在新一代光网络的地址识别、分组控制等诸多子系统中, 在光域而非电域实现光信号处理成为了亟待解决的问题.

全光组合逻辑是实现光信号处理的基础, 在光信号处理领域起着关键作用, 近年来受到国内外研究人员的广泛关注, 已经开展了一系列对全光组合逻辑的研究工作. 这些研究工作主要包括以下几方面: 基于半导体光放大器 (SOA) 中交叉增益调制效应<sup>[2,3]</sup>、交叉相位调制效应<sup>[4]</sup>、四波混频效应<sup>[5]</sup>

等的全光逻辑门; 基于超快非线性干涉仪实现全光逻辑门<sup>[6]</sup>; 基于马赫-曾德尔半导体放大器的全光逻辑门<sup>[7,8]</sup>; 基于周期性极化铌酸锂波导 (PPLN) 的全光逻辑门<sup>[9]</sup>; 基于高非线性光纤 (HNLF) 的全光逻辑门<sup>[10]</sup>; 基于非线性光纤环镜的逻辑门<sup>[11]</sup>; 基于 SOA 中的非线性偏振旋转 (NPR) 效应的可重构全光逻辑门<sup>[12]</sup>; 基于环形谐振腔结构的光逻辑门<sup>[13]</sup> 等. 但现有方案在相同工作参数下大多只能输出单一基础逻辑, 如果要实现更为复杂的逻辑则需要通过多个器件级联得到, 如利用 PPLN 和 SOA 级联实现全光半加器<sup>[10]</sup>、利用 SOA 级联实现全光半加/半减器等<sup>[14]</sup>.

本文提出了一种新型的基于 HNLF 中 NPR 效应的全光逻辑门实现方案, 该方案不仅可以通过改变系统工作参数得到几乎所有基础组合逻辑, 还可以在相同工作参数下同时得到多种基础组合逻辑, 从而在单一器件中实现全光半加器/半减器等较复

\* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 60736035)、国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB327603, 2012CB315704) 和山西省青年科学基金 (批准号: 2011021018) 资助的课题.

† E-mail: wangwenrui@tju.edu.cn

杂逻辑功能. 当抽运光和探测光同时进入 HNLf 后, 随着抽运光强度的变化, HNLf 的非线性双折射现象将引起探测光在两个偏振方向上的非线性相移, 从而导致探测光的 NPR 效应. 在理论分析 HNLf 中的 NPR 现象和基于 NPR 现象构建全光逻辑门原理的基础上, 在实验中, 利用两路 10 Gbit/s 的非归零信号光和一路直流光同时注入 HNLf, 在 HNLf 输出端, 利用波分解复用器 (WDM) 同时滤出信号光和直流光波长, 之后利用偏振分束器选择特定偏振态的光信号. 通过调节信号光和直流光的功率、偏振态以及偏振分束器的相对偏振态, 实现了全光信号的“与”、“非”、“或”、“同或”、“异或”、“ $\bar{A} \cdot B$ ”、“ $A \cdot \bar{B}$ ”、半加器、半减器等逻辑功能.

## 2 工作原理

### 2.1 HNLf 中的 NPR 效应

在考虑光纤双折射的情况下, 光纤中光信号的电场可以表示为

$$E(r, t) = \frac{1}{2}(\hat{e}_x E_x + \hat{e}_y E_y) e^{-i\omega_0 t} + \text{c.c.}, \quad (1)$$

其中,  $E_x$  和  $E_y$  是载波为  $\omega_0$  的光场的两偏振分量的复振幅,  $\hat{e}_x$  和  $\hat{e}_y$  是正交偏振本征矢量.

当光纤长度  $L$  远远小于色散长度  $L_D = T_0^2/|\beta_2|$  和走离长度  $L_W = T_0/|\Delta\beta|$  时, 光脉冲在快轴和慢轴上的慢变幅度  $A_x$  和  $A_y$  在椭圆双折射光纤中的传输可以用下面的耦合模方程描述<sup>[15]</sup>:

$$\begin{aligned} \frac{dA_x}{dz} + \frac{\alpha}{2}A_x &= i\gamma(|A_x|^2 + B|A_y|^2)A_x, \\ \frac{dA_y}{dz} + \frac{\alpha}{2}A_y &= i\gamma(|A_y|^2 + B|A_x|^2)A_y. \end{aligned} \quad (2)$$

这里,  $T_0$  为脉冲宽度,  $\beta$  为传输常数,  $\beta_2$  为群速度色散,  $\Delta\beta = (2\pi/\lambda)B_m$ ,  $B_m = |n_x - n_y|$  为双折射度,

$\alpha$  为吸收系数,  $\gamma$  为非线性系数,  $B = \frac{2 + 2\sin^2\theta}{2 + \cos^2\theta}$ ,  $\theta$

为椭圆角,  $A_x$  和  $A_y$  可以表示为

$$\begin{aligned} A_x &= \sqrt{P_x} e^{-\alpha z/2} e^{i\phi_x}, \\ A_y &= \sqrt{P_y} e^{-\alpha z/2} e^{i\phi_y}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $P_x$ ,  $P_y$  和  $\phi_x$ ,  $\phi_y$  分别是两偏振分量的功率和相位.

求解 (2) 式, 得到光场的两偏振分量的相位分别为

$$\begin{aligned} \phi_x &= \gamma(P_x + BP_y)L_{\text{eff}}, \\ \phi_y &= \gamma(P_y + BP_x)L_{\text{eff}}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中有效光纤长度  $L_{\text{eff}} = (1 - e^{-\alpha L})/\alpha$ . (4) 式表明, 光信号的两个偏振分量都产生了非线性相移. 而两偏振分量的相对相位差

$$\Delta\phi_{\text{NL}} = \gamma L_{\text{eff}}(1 - B)(P_x - P_y). \quad (5)$$

对于线性双折射光纤, 有  $\theta = 0$ , 故  $B = 2/3$ , 若功率为  $P_0$  的光信号与慢轴成  $\varphi$  角入射, 则  $P_x = P_0 \cos^2\varphi$ ,  $P_y = P_0 \sin^2\varphi$ , 代入 (5) 式可得

$$\Delta\phi_{\text{NL}} = (\gamma P_0 L_{\text{eff}}/3) \cos(2\varphi). \quad (6)$$

当  $\varphi = 0$  或  $\pi/2$  时,  $|\Delta\phi_{\text{NL}}|$  取到最大值,  $|\Delta\phi_{\text{NL}}| = \gamma P_0 L_{\text{eff}}/3$ .

当一束光强为  $P_p$  的抽运光和一束光强为  $P_s$  (场强为  $E_s$ ) 的探测光共同进入光纤, 假设抽运光和探测光均为线偏振光, 且两束光之间的相位夹角为  $45^\circ$ . 这样, 探测光的琼斯矢量可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\text{Si}} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} E_{Sx} \\ E_{Sy} \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} E_S \\ E_S \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (7)$$

此时, 若抽运光与  $x$  轴平行, 对探测光  $x$  轴分量产生非线性相移. 这样, 在光纤的输出端, 探测光的琼斯矢量可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\text{So}} &= \frac{E_S}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} e^{i(\delta + \Delta\phi_{\text{NL}})} \\ e^{i\delta} \end{bmatrix} \\ &= \frac{E_S}{\sqrt{2}} e^{i\delta} \begin{bmatrix} e^{i\Delta\phi_{\text{NL}}} \\ 1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (8)$$

其中  $\delta$  为线性相移量. 图 1 为 HNLf 中 NPR 效应的示意图. 如图 1(a) 所示, 当  $\Delta\phi_{\text{NL}} = \pi$  时, 在 NPR 作用下, 信号光旋转为正交偏振态的线偏振光输出. 更为一般的情况是信号光将旋转为椭圆偏振光输出, 图 1(b) 给出了  $\Delta\phi_{\text{NL}} = 2\pi/3$  和  $\Delta\phi_{\text{NL}} = 4\pi/3$  时的输出结果.

如果在光纤输出端加入一与  $x$  轴成  $\psi$  夹角的检偏器, 则检偏器的输出光强度为

$$P_{\text{out}} = \frac{E_S^2}{2} (\cos \Delta\phi_{\text{NL}} \cos \psi + \sin \psi)^2$$

$$= \frac{P_S}{2} (\cos \Delta\phi_{NL} \cos \psi + \sin \psi)^2. \quad (9)$$

特别地, 当  $\psi = 3\pi/4$  时, 有

$$\begin{aligned} P_{out1} &= \frac{P_S}{4} (1 - \cos(\Delta\phi_{NL}))^2 \\ &= P_S \sin^2 \left( \frac{\Delta\phi_{NL}}{2} \right). \end{aligned} \quad (10)$$

此时, 当抽运光功率  $P_p = 0$ ,  $\Delta\phi_{NL} = 0$  时, 探测光被完全阻挡,  $P_{out1} = 0$ . 而当  $\Delta\phi_{NL}$  为  $\pi$  或  $\pi$  的奇数倍时,  $P_{out1}$  取到最大值.

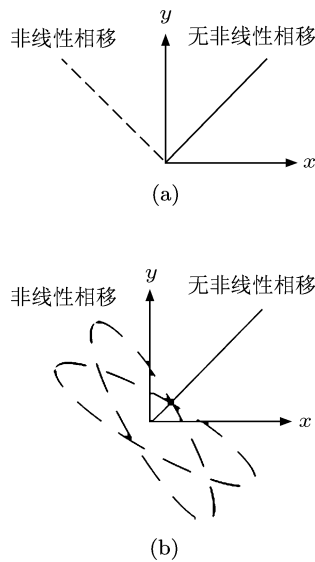


图1 HNLF 中 NPR 示意图 (a)  $\Delta\phi_{NL} = \pi$ ;  
(b)  $\Delta\phi_{NL} = \frac{2\pi}{3}, \frac{4\pi}{3}$

当  $\psi = \pi/4$  时, 有

$$\begin{aligned} P_{out2} &= \frac{P_S}{4} (1 + \cos(\Delta\phi_{NL}))^2 \\ &= P_S \cos^2 \left( \frac{\Delta\phi_{NL}}{2} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

事实上, 此时为 (10) 式情况的正交偏振输出, 当抽运光功率  $P_p = 0$  时, 探测光完全通过, 而当  $\Delta\phi_{NL}$  为  $\pi$  或  $\pi$  的奇数倍时,  $P_{out1} = 0$ .

## 2.2 基于 HNLF 中的 NPR 的全光逻辑门原理

在上述分析基础上, 进一步分析利用光纤中 NPR 实现全光逻辑门的原理. 系统的实验原理如图 2 所示, 信号光  $A$ ,  $B$  和直流光  $C$  同时注入 HNLF, 在 HNLF 的输出端首先用滤波器选出其

中一个波长, 然后用偏振分束器 (PBS) 或检偏器检测出信号的特定偏振态.

首先以信号光  $A$  和  $B$  注入 HNLF, 输出端滤出信号光  $B$  为例. 设信号光  $A$ ,  $B$  是夹角为  $45^\circ$  的线偏振光. 由 (9) 式可知, 经过与信号光  $A$  成  $\psi$  夹角的检偏器后输出光强度为

$$P_{out} = \frac{P_B}{2} (\cos(\gamma P_A L_{eff}/3) \cos \psi + \sin \psi)^2. \quad (12)$$

显然, 当信号光  $B$  为“0”码时,  $P_B = 0$ , 则输出端恒为“0”; 信号光  $B$  为“1”码时, 若此时信号光  $A$  为“0”码, (12) 式中  $P_A = 0$ , 非线性相移  $\Delta\phi_{NL}$  为 0. 当信号光  $A$  为“1”码, 调节光强, 使得信号光  $A$  在  $x$  轴上的附加相移  $\Delta\phi_{NL} = \pi$ . 此时, 有无附加非线性相移情况下, 输出光的偏振态正好正交. 如果将起偏器对准信号光的正交偏振态, 即  $\psi = 3\pi/4$  时, 由 (10) 式可知

$$P_{out} = P_B \sin^2 \left( \frac{\Delta\phi_{NL}}{2} \right). \quad (13)$$

当且仅当  $A$ ,  $B$  同为“1”码的情况下, 输出为“1”码, 否则输出为“0”码, 即实现了“ $AB$ ”的功能. 若起偏器对准信号光偏振方向, 即  $\psi = \pi/4$ , 则有

$$P_{out} = P_B \cos^2 \left( \frac{\Delta\phi_{NL}}{2} \right). \quad (14)$$

当且仅当  $B$  为“1”码,  $A$  为“0”码时, 输出“1”码, 即实现了“ $\bar{A} \cdot B$ ”逻辑. 值得指出的是, 输出端可以用偏振分束器代替检偏器, 从而在偏振分束器的两个输出端分别得到“ $AB$ ”和“ $\bar{A} \cdot B$ ”逻辑. 类似地, 如果输出端滤出信号光  $A$ , 则可以实现“ $AB$ ”和“ $A \cdot \bar{B}$ ”逻辑.

若仅注入信号光  $A(B)$  和直流光  $C$ , 可以把  $C$  看作一恒为 1 的信号, 此时输出端滤出信号  $C$ . 与上面讨论一致, 可以得到“ $A(B)$ ”和“ $\bar{A}(\bar{B})$ ”信号, 即可以实现波长变换和非门逻辑.

最后考虑  $A$ ,  $B$  和  $C$  同时注入 HNLF 的情况, 输出端滤出信号  $C$ . 调整  $P_A = P_B = P_0$ , 由 (6) 式可知,  $A$ ,  $B$  同为“1”码时的非线性相移  $\Delta\phi_{NL2}$  是当  $A$ ,  $B$  仅有一个为“1”码时的非线性相移  $\Delta\phi_{NL1}$  的 2 倍. 若调整  $P_0$  使得  $\Delta\phi_{NL1} = \pi$ , 则有  $\Delta\phi_{NL2} = 2\pi$ , 此时检偏器如果分别与  $x$  轴成  $3\pi/4$  和  $\pi/4$ , 则分别实现了“同或”和“异或”逻辑. 若  $\Delta\phi_{NL1} = 2\pi/3$ ,  $\Delta\phi_{NL2} = 4\pi/3$ , 则有  $\sin^2 \left( \frac{\Delta\phi_{NL1}}{2} \right) = \sin^2 \left( \frac{\Delta\phi_{NL2}}{2} \right) = \frac{3}{4}$ , 此时实现了

“ $A + B$ ”逻辑. 这样, 通过调整  $P_0$  和偏振控制器可以实现几乎所有全光基础组合逻辑. 表 1 列出了利用 HNLf 中的 NPR 效应实现全光逻辑门的真值、滤波波长、非线性相移量和检偏器的相对偏振角. 考虑到  $C$  为直流线偏振光, 不引起非线性相移, 除了“ $A + B$ ”逻辑, 其他逻辑要求的非线性相移量均为  $\pi$ , 因此其他逻辑可以通过在不同 WDM 的输出端加入偏振分束器同时得到.

进一步, 根据图 2 所示原理仿真了基于 HNLf 中 NPR 效应的“同或”逻辑, 图 3 给出了数值仿真

结果. 输入  $A$  和  $B$  为 10 Gbit/s 的随机序列, 设置单个“1”码产生的非线性相移为  $\pi$ , 考虑实际情况, 设码字上升时间和下降时间均为 0.15 码元周期. 对应于连续光  $C$  的波长的 WDM 输出端通过起偏器可以得到“同或”逻辑, 如图 3(a) 所示. 输出信号中“1”码间的小凹陷是由于码字上升沿和下降沿功率变化造成偏振态变化而形成的. 如果码字为无上升时间和下降时间的理想方波信号, 则小凹陷不再存在, 如图 3(b) 所示. 实际情况下, 凹陷也仅发生在码字的上升沿、下降沿处, 并不会影响码字的判决.

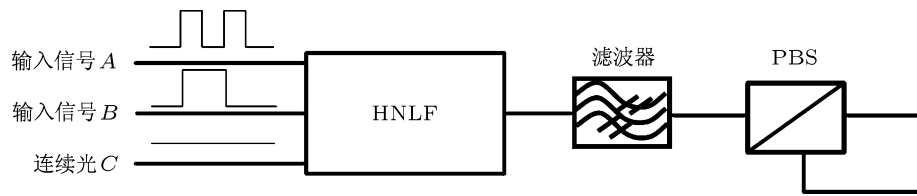


图 2 基于 HNLf 中 NPR 的全光逻辑门实验原理框图

表 1 基于 HNLf 中 NPR 效应的全光逻辑门真值、滤波波长、非线性相移和检偏器的相对偏振角

	$A$	$B$	$A \cdot B$	$\bar{A} \cdot B$	$A \cdot \bar{B}$	$\bar{A}$	$\bar{B}$	$A \otimes B$	$A \oplus B$	$A + B$
真值	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1
	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1
	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1
滤波波长	—	—	$\lambda_A$ 或 $\lambda_B$	$\lambda_B$	$\lambda_A$	$\lambda_C$	$\lambda_C$	$\lambda_C$	$\lambda_C$	$\lambda_C$
$\Delta\phi_{NL}$	—	—	$\pi$	$\pi$	$\pi$	$\pi$	$\pi$	$\pi$	$\pi$	$2\pi/3$
$\psi$	—	—	$\pi/4$	$3\pi/4$	$3\pi/4$	$3\pi/4$	$3\pi/4$	$3\pi/4$	$\pi/4$	$3\pi/4$

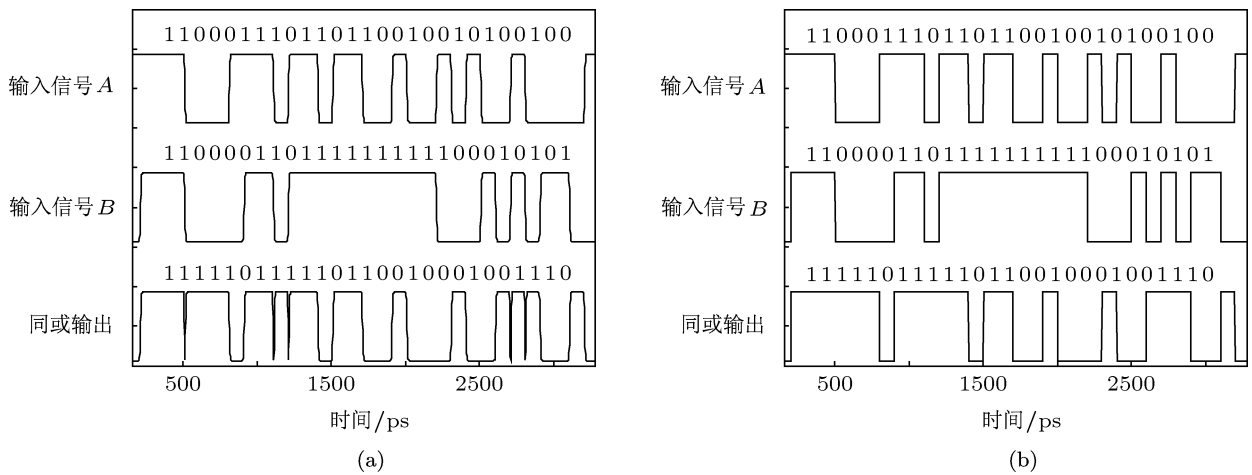


图 3 基于 HNLf 中 NPR 的同或逻辑仿真结果 (a) 上升时间和下降时间均为 0.15 码元周期; (b) 无上升时间和下降时间

### 3 实验及结果分析

图 4 为基于 HNLF 中 NPR 效应的全光逻辑门实验装置示意图. 光信号由 Agilent 8167 型可调光源 (LD) 产生, 两路信号光波长  $\lambda_A$  和  $\lambda_B$  以及连续光波长  $\lambda_C$  分别为 1552.52, 1553.33 和 1555.75 nm, 即国际通信联合会制定的波长标准的 C31, C30 和 C27 通道, 波长选择主要是便于实验中利用 WDM 实现多波长信号的合束和分束.  $\lambda_A$  和  $\lambda_B$  经 3 dB 耦合器合束后进入马赫-曾德尔型的 LiNbO<sub>3</sub> 光强度调制器 (MZM), 由 MP1800A 型误码仪产生的数据信号对  $\lambda_A$  和  $\lambda_B$  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 WDM 解复用后分为两路, 其中信号光 B 经过一段延时线 (ODL) 使得信号光 A 和信号光 B 之间的码字不同. 时延后的信号光 B 和信号光 A 及连续光 C 均可由可调光衰减器 (OTA) 调节光功率, 由偏振控制器 PC3—PC5 控制偏振态. 之后两路信号光和一路连续光经由 WDM 合束后, 由大功率掺铒光纤放大器 (HP-EDFA) 放大至 26 dBm 后进入 HNLF, 实验中采用的 HNLF 长度为 500 m, 非线性系数  $\gamma = 11 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ , 零色散波长为 1545 nm. 在输出端, 用 WDM 分别滤出  $\lambda_A$ ,  $\lambda_B$  和  $\lambda_C$ , 由偏振控制器 PC6—PC8 分别调节滤出信号光与 PBS 主轴间的关系, 在 PBS 的输出端由 agilent 86100A 型示波器观测输出波形.

经过相对延时后, 信号光 A 和信号光 B 的波形分别如图 5(a) 和 (b) 所示, 码字分别为 “111101011001000” 和 “010001111010110”. 图 5(a) 和 (b) 同时也给出了信号光 A 和信号光 B

的眼图, 测得信号信噪比分别为 12.6 和 13.1. 经过 HNLF 中的 NPR 效应, 在 WDM 的  $\lambda_A$  输出端, 调节偏振控制器, 在 PBS 的两个正交偏振输出端得到的输出信号如图 5(c) 和 (d) 所示, 从信号的波形可以看出两个输出端分别实现了 “A 与 B” 逻辑和 “ $A \cdot \bar{B}$ ” 逻辑. 此时虽然直流光 C 亦注入 HNLF, 但是考虑 C 为直光线偏振光, 只是引入固定角度的偏振旋转效应, 可通过调节 PBS 前的偏振控制器去除其干扰. 因此, 此时 HNLF 中可以认为是信号光 A 和信号光 B 相互作用的结果. 同样, 在 WDM 的  $\lambda_B$  输出端, 通过调节 PC7, 可以得到 “ $\bar{A} \cdot B$ ” 逻辑, 输出结果如图 5(e) 所示. 三个逻辑的信噪比分别为 10.3, 10.7, 10.2, 信噪比的恶化主要是由于大功率 EDFA 引入的自发辐射噪声造成的.

在 WDM 的  $\lambda_C$  输出端, 断开信号光 A 或信号光 B, 则在 PBS 的输出端可以得到  $\bar{B}$  和  $\bar{A}$  逻辑, 得到的波形和眼图分别如图 5(f) 和 (g) 所示. 同时注入信号光 A 和信号光 B, 调整信号光功率和偏振控制器, 分别可以得到  $A+B$ ,  $A \otimes B$  和  $A \oplus B$  逻辑, 三个逻辑的信号输出结果分别如图 5(h), (i) 和 (j) 所示. 在图 5(i) 中, 码字 “0000” 的前三个连 “0” 码字输出信号幅度有一定的小起伏, 而最后两个连 “0” 码字则不存在类似起伏, 这主要是由于输出信号是由 “0100” $\otimes$ “1011” 产生, 而实验中信号并非理想的方波信号, 因此在信号 A 和信号 B 的上升沿和下降沿处, 两者的总功率相对于信号不发生变化的情况下会有一些的变化. 同样原因,  $A+B$  的 “1” 码以及  $A \otimes B$  和  $A \oplus B$  逻辑的 “1” 码和 “0” 码处均存在类似的幅度起伏. 不过这些起伏均发生在信号的上升沿和下降沿, 因此不会对信号的判决造成干扰.

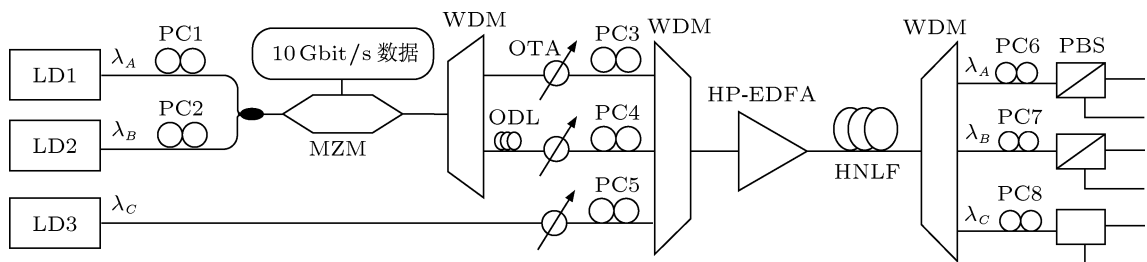


图 4 基于 HNLF 中 NPR 效应的全光逻辑门装置示意图

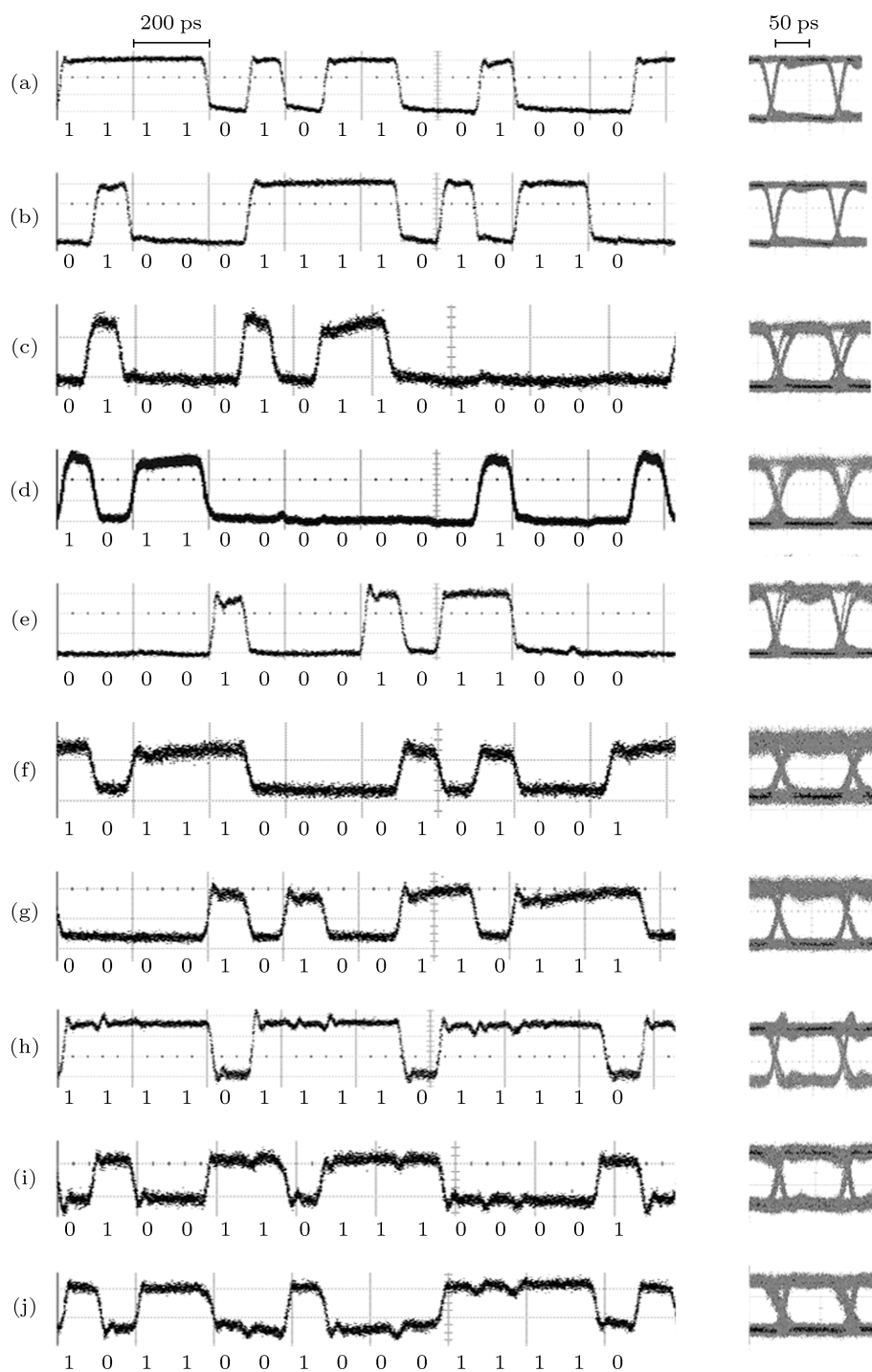


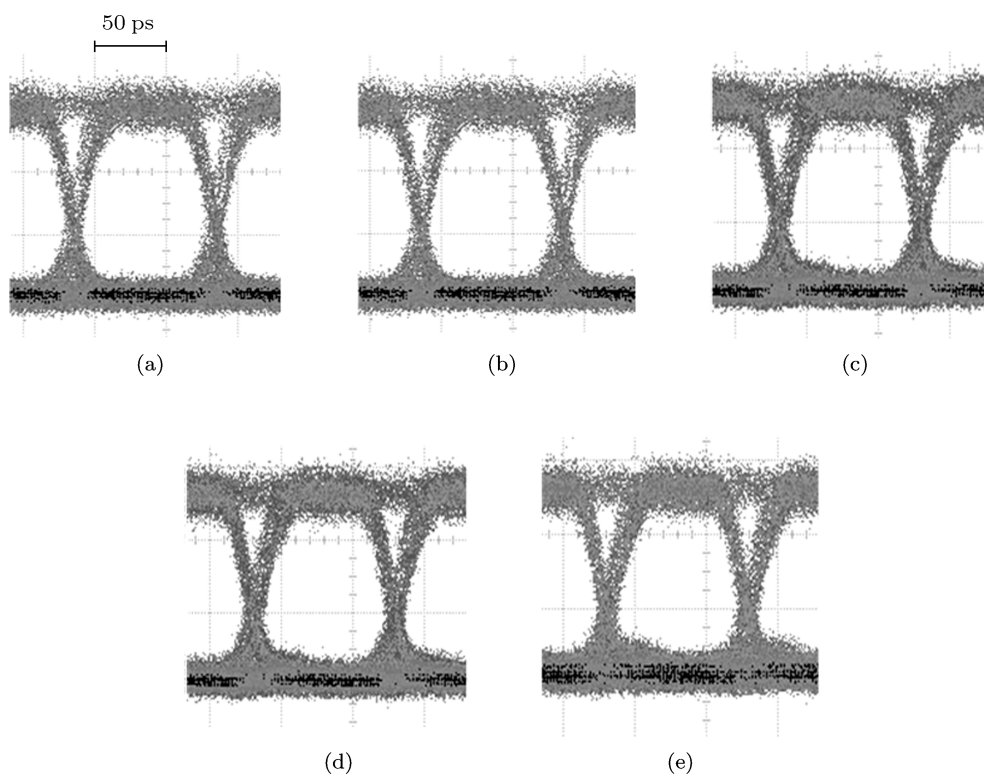
图5 信号光  $A$ 、信号光  $B$  及各种组合逻辑时序图 (a) 信号光  $A$ ; (b) 信号光  $B$ ; (c)  $A \cdot B$ ; (d)  $A \cdot \bar{B}$ ; (e)  $\bar{A} \cdot B$ ; (f)  $\bar{B}$ ; (g)  $\bar{A}$ ; (h)  $A + B$ ; (i)  $A \otimes B$ ; (j)  $A \oplus B$

表 2 列出了各种逻辑门的实验参数和最终得到信号眼图的信噪比 ( $Q$  值). 实验中, 在 WDM 的  $\lambda_C$  输出端得到的信号信噪比相对较低, 这主要是由于直流光信号功率相对较弱造成的. 此外,  $A \cdot B$ ,  $\bar{A} \cdot B$ ,  $A \cdot \bar{B}$ ,  $A \oplus B$  和  $A \otimes B$  均可以在相同

的实验参数条件下由不同的输出端口得到.  $A \cdot B$  和  $A \oplus B$  逻辑组合, 分别作为“进位位”和“和位”, 便实现了“全光半加器”, 而  $\bar{A} \cdot B$  或  $A \cdot \bar{B}$  和  $A \oplus B$  逻辑组合, 分别作为“借位位”和“差位”, 则可实现“全光半减器”.

表2 基于 HNLf 中 NPR 实验参数和信噪比

	$A \cdot B$	$\bar{A} \cdot B$	$A \cdot \bar{B}$	$\bar{A}$	$\bar{B}$	$A \otimes B$	$A \oplus B$	$A + B$
$P_A/\text{dBm}$	24.1	24.1	24.1	24.1	—	24.1	24.1	21.7
$P_B/\text{dBm}$	24.4	24.4	24.4	—	24.4	24.4	24.4	21.8
$P_C/\text{dBm}$	18.9	18.9	18.9	18.9	18.9	18.9	18.9	18.9
滤波波长	$\lambda_B$	$\lambda_B$	$\lambda_A$	$\lambda_C$	$\lambda_C$	$\lambda_C$	$\lambda_C$	$\lambda_C$
信噪比	10.3	10.7	10.2	8.0	8.5	9.7	9.3	9.2

图6 不同阶数伪随机码情况下  $A \cdot \bar{B}$  逻辑眼图比较 (a) 4阶; (b) 7阶; (c) 15阶; (d) 23阶; (e) 31阶

利用 HNLf 中的 NPR 效应的优点之一是不存在码型效应. 图 6 给出了信号光  $A$  和信号光  $B$  采用不同阶数 (4 阶、7 阶、15 阶、23 阶和 31 阶) 伪随机码输入情况下,  $A \cdot \bar{B}$  逻辑的输出眼图. 从图 6 可以看出, 随着伪随机码阶数的提高, 输出信号的眼图基本没有恶化.

## 4 结论

本文提出了一种新型的利用 HNLf 中的 NPR 效应的全光组合逻辑实现方案. 通过对 NPR 现象的理论分析可知, 该方案可以在同一段 HNLf 中通过滤出不同波长和偏振态的光信号同时得到多

种基础组合逻辑. 实验完成了两路 10 Gbit/s 非归零码信号的各种基础组合逻辑, 并且在相同工作参数条件下实现了全光半加器和半减器的功能, 验证了方案的可行性. 基于 HNLf 中 NPR 效应的全光逻辑门没有码型效应, 因此具有输出信号质量与输入信号码字无关的优点. 此外, 由于 HNLf 中 NPR 的全光开关的响应时间可达 ps 量级<sup>[15]</sup>, 因此采用该方案的全光逻辑门的速率可达 100 Gbit/s 以上, 是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. 由于采用较长 HNLf, 系统的稳定性受到了一定的制约, 但是随着高非线性光波导技术<sup>[16]</sup>的发展, 可以采用高非线性光波导代替 HNLf, 从而提高系统的稳定性.

- [1] Mahony O, Politi C, Klonidis D, Nejabati R, Simeonidou D 2006 *J. Lightwave Technol.* **24** 4684.
- [2] Zhang X L, Dong J J, Wang Y, Huang D X 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2066 (in Chinese) [张新亮, 董建绩, 王颖, 黄德修 2005 物理学报 **54** 2066]
- [3] Bhambri K, Jayjee G K, Neena G, Divya D 2011 *Proceedings of the 13th International Conference on Transparent Optical Networks* (Warsaw: National Institute of Telecommunications) Tu.P.15
- [4] Dong J J, Zhang X L, Xu J, Huang D X 2008 *Opt. Commun.* **281** 1710
- [5] Li Z H, Li G F 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 1341
- [6] Theophilopoulos G, Yiannopoulos K, Kalyvas M, Bintjas C, Kalogerakis G, Avramopoulos H, Occhi L, Schares L, Guekos G, Hansmann S, Dall'Ara R 2001 *Proceedings of the Conference on Optical Fiber Communications* (New York: Optical Society of America) MB2
- [7] Singh S, Lovkesh L 2011 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **47** 1
- [8] Sa L M, Silva H, Andre P, Nogueira R 2011 *Proceedings of the International Conference on Computer as a Tool* (Lisbon: Instituto Superior Técnico) p1
- [9] Kumar S, Willner A E, Gurkan D, Parameswaran K R, Fejer M M 2006 *Opt. Express* **14** 10255
- [10] Lai D M, Kwok C H, Wong K K 2008 *Opt. Express* **16** 18362
- [11] Bogoni A, Poti L, Proietti R, Meloni G, Ponzini F, Ghelfi P 2005 *Electron. Lett.* **41** 435
- [12] Yi L L, Hu W S, He H, Dong Y, Jin Y H, Sun W Q 2011 *Chin. Opt. Lett.* **9** 030603
- [13] Phongsanam P, Polar A, Moongfangklanga N, Mitatha S, Yupapin P P 2011 *Proceedings of the 8th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology* (Khon Kaen: Khon Kaen University) p149
- [14] Han B C, Yu J L, Zhang L T, Wang W R, Jiang Y, Zhang A X, Yang E Z 2009 *Acta Opt. Sin.* **29** 2082 (in Chinese) [韩丙辰, 于晋龙, 张立台, 王文睿, 江阳, 张爱旭, 杨恩泽 2009 光学学报 **29** 2082]
- [15] Agrawal G P 2000 *Nonlinear Fiber Optics* (3rd ed) (Burlington: Elsevier Science) p130
- [16] Fietz C, Shvets G 2007 *Opt. Lett.* **36** 1683



# All-optical logic gates based on nonlinear polarization rotation in high nonlinear fiber\*

Wang Wen-Rui<sup>1)†</sup> Yu Jin-Long<sup>1)</sup> Han Bing-Chen<sup>1)2)</sup> Guo Jing-Zhong<sup>1)</sup>  
Luo Jun<sup>1)</sup> Wang Ju<sup>1)</sup> Liu Yi<sup>1)</sup> Yang En-Ze<sup>1)</sup>

1) (School of Electronic and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

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

(Received 18 June 2011; revised manuscript received 3 August 2011)

## Abstract

A novel scheme to realize all-optical logic gates is proposed based on nonlinear polarization rotation (NPR) in high nonlinear fiber (HNLF). Two optical signals  $A$  and  $B$  together with a continuous wave are injected into the HNLF. Due to the optical power variation in HNLF, nonlinear birefringence will be induced between the two polarization axes. Both the optical signal and the continuous wave are filtered out at the output of HNLF. By controlling the optical power and the polarization of the optical signal as well as the polarization of the polarizer with respect to the polarization of optical signal/continuous wave, multiple all-optical logic gates can be realized. The theoretical analysis of the optical logic gates based on NPR in HNLF is provided. And the feasibility of the scheme is demonstrated by realizing all optical “and”, “not”, “or”, “xor”, “nxor”, “ $\bar{A} \cdot B$ ”, “ $A \cdot \bar{B}$ ”, half-adder and half-subtractor at 10 Gbit/s operation.

**Keywords:** optical communication, all-optical logic gate, high nonlinear fiber, nonlinear polarization rotation

**PACS:** 42.81.-i, 42.81.Gs

\* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60736035), the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant Nos. 2010CB327603, 2012CB315704), and the Science Foundation for Young Scientists of Shanxi Province, China (Grant No. 2011021018).

† E-mail: wangwenrui@tju.edu.cn