

基于周期性极化铌酸锂的偏振相关全光逻辑门

张寅星 陈玉萍 陈险峰

(上海交通大学物理系 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240)

摘要 基于周期性畴反转铁电材料铌酸锂的电光效应, 提出一种利用电光 Pockels 效应调制偏振态的二进制全光逻辑处理方案并进行了实验验证。当以偏振方向相互正交的两线偏振光, 分别表示光信号 1 的逻辑 0 和逻辑 1 时, 信号光的偏振方向在一定的外加电场作用下, 将在偏振面内旋转 90° , 从而实现两种偏振态即逻辑 0 和逻辑 1 的相互转换。在不加外电场的情况下, 信号光的偏振方向不产生明显变化, 从而实现可控逻辑非的功能。当以外加电场的电平信号来表示电信号 2 的逻辑 0 和逻辑 1 时, 还能实现异或和同或的逻辑功能。相比于强度编码的方案, 该偏振编码的方案对于信号的损耗很小, 因此能够更方便地应用于多重级联系统, 从而实现更复杂的逻辑功能。

关键词 光电子学; 全光逻辑门; 电光调制; 周期性极化铌酸锂

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.s117001

Polarization-Based All-Optical Logic Gates Employing Electro-Optic Effect in Periodically Poled LiNbO₃

Zhang Yinxing Chen Yuping Chen Xianfeng

(State Key Laboratory on Fiber Optic Local Area Communication Networks and Advanced Optical Communication Systems, Department of Physics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract A simple approach based on polarization to process binary all-optical logic signal with validation is proposed, by electro-optic Pockels effect. In experiment, we choose optical signal with two orthogonal linear polarization states to present logic 1 and 0. This approach can alter the polarization state of input optical signal about 90° on the polarization plane based on electro-optic modulation of periodically poled lithium niobate (PPLN). Optical signal can be switched between the two orthogonal polarization states, and polarization direction will be not changed without external applied electric field. Therefore, it can realize controllable-NOT function. If we choose external applied electric field to present logic 1 and 0, it can realize NOR and XNOR functions. In this approach, digital logic signal is carried on the polarization state of optical signal. The dissipation of intensity of optical signal is very small in this process, so this approach is more advantageous for multiply cascaded systems, comparing with traditional approach, in which digital logic signal is carried on the intensity of optical signal.

Key words optoelectronics; all-optical logic gates; electro-optic modulation; periodically poled lithium niobate (PPLN)

OCIS codes 230.1150; 230.2090; 230.3750; 250.4745

1 引 言

近年来,光通信技术在大容量和长距离中继方面取得了飞速的发展。但是,由于现有的传输技术仍然依赖于电子集成电路对高速信号的处理,所以信号处理能力的进一步发展在不远的将来必然会受到“电子瓶颈”的极大制约。因此,能够不经过光-电-光的信号转换就能够完成信号处理的全光网络,在未来的光

通信领域中具有巨大的应用潜力。而作为全光信号处理的核心单元——全光逻辑门,将在全光网络中发挥举足轻重的作用。传统的全光逻辑门方案都是将信号光的强度作为逻辑信号的载体^[1~4],而信号光的强度在处理过程中会有不同程度的衰减,尤其在多重级联系统中需要大量光放大器对信号光进行不断地放大,从而不可避免地增加了信号处理系统

收稿日期: 2011-07-22; **收到修改稿日期:** 2011-08-16

作者简介: 张寅星(1986—),男,硕士研究生,主要从事光通信器件方面的研究。E-mail: fireofstars@sjtu.edu.cn

导师简介: 陈玉萍(1974—),女,博士,副教授,主要从事非线性光学和量子光学,以及光纤通信等方面的研究。

E-mail: ypchen@sjtu.edu.cn

的复杂程度。本文选择水平和垂直偏振的线偏振光作为光信号 1 的逻辑信号载体,并以电平信号 0 和 V 作为电信号 2 的逻辑信号载体^[5],通过基于周期性极化铌酸锂(PPLN)的电光调制效应,来改变信号光在偏振平面内的偏振方向,并能够通过不同的光路结构实现不同的逻辑功能,极大地降低了光信号在处理过程中的衰减程度。

2 基于周期性极化铌酸锂的偏振调制效应

近年来,对 PPLN 材料电光效应的研究表明,对 PPLN 材料施加横向电场能够使得每个周期内的正畴和负畴的光轴在入射光的偏振平面以内分别旋转 $+\theta$ 和 $-\theta$ 的角度。并且随着外加电场的增加,光轴旋转的角度将会连续地变化。

在这种情况下, o 光和 e 光的耦合波方程为^[6,7]

$$\begin{cases} \frac{dA_1}{dx} = -i\kappa A_2 \exp(i\Delta\beta x) \\ \frac{dA_2}{dx} = -i\kappa A_1 \exp(-i\Delta\beta x) \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $\Delta\beta = k_1 - k_2 - m \frac{2\pi}{\Lambda}$, $\kappa = -\frac{\omega}{2c} \frac{n_o^2 n_e^2 \gamma_{51} E}{\sqrt{n_o n_e}} \times$

$\frac{i(1 - \cos m\pi)}{m\pi}$ ($m = 1, 3, 5 \dots$), 这里 A_1 是 o 光的归

一化复振幅, A_2 是 e 光的归一化复振幅。 n_o 和 n_e 分别是 o 光和 e 光的折射率。 Λ 是 PPLN 的周期, γ_{51} 是 PPLN 的电光系数。 E 是横向外加电场。假设入射光为 o 光,根据初始化条件

$$\begin{cases} A_1(0) = 1 \\ A_2(0) = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

耦合波方程(1)式的解为

$$\begin{cases} A_1(x) = \exp[i(\Delta\beta/2)x] \left[\cos sx - i \frac{\Delta\beta}{2s} \sin sx \right] \\ A_2(x) = \exp[-i(\Delta\beta/2)x] (-i\kappa^*) \frac{\sin sx}{s} \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $s^2 = \kappa\kappa^* + (\Delta\beta/2)^2$ 。根据(3)式,出射 o 光和 e 光的归一化复振幅完全由横向外加电场 E 决定。

根据给出的旋转角 $\theta \approx \gamma_{51} E / [(1/n_e)^2 - (1/n_o)^2]$, PPLN 能够改变入射线偏振光在偏振平面内的偏振方向。由于每个周期都能起到一个半波片的作用,当入射线偏振光通过一系列的周期作用时,它的偏振方向会在偏振平面内连续旋转,并产生最终的旋转角 $2N\theta$,其中 N 是 PPLN 的周期数。

3 全光逻辑门实验

选择入射信号光沿 Y 轴方向的水平线偏振态和沿 Z 轴方向的垂直线偏振态来分别表示光信号 1 的逻辑 1 和逻辑 0,并以横向外加电场 E 的电平来表示电信号 2 的逻辑 1 和逻辑 0。

在图 1 所示的实验装置图中,可调式激光器(TL)输出波长为 1540.8 nm 的信号光,经过准直器(collimator)从光纤耦合到空气中,再经过起偏器(polarizer)起偏后,分别以水平偏振和垂直偏振这两种相互正交的线偏振态入射到 PPLN 中,PPLN 上横向所加电压 V 通过电光效应分别使入射信号光的偏振方向旋转 90° ^[8]。信号光通过 PPLN 作用后,其偏振方向由检偏器检测并由光功率计测量输出信号光的强度。为了衡量入射线偏振光在电光效应作用下的损耗,定义通光比 T 为

$$T = \frac{I_{out}}{I_{in}}, \quad (4)$$

式中 I_{in} 和 I_{out} 分别是入射光和出射光的强度。当入射光分别为水平和垂直偏振态时,通光比 T 随外加电场 E 的变化如图 2 所示。当通光比达到最大值时,说明入射光的偏振方向旋转了 90° 。

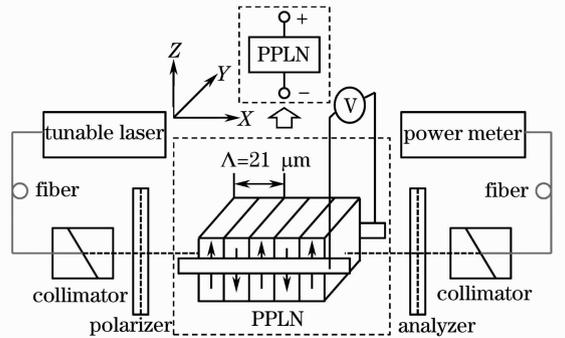


图 1 基于偏振的全光逻辑门实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for all-optical polarization-based logic gate

实验中,选择合适的外加电场使水平和垂直偏振的入射信号光分别旋转 90° ,实验结果如表 1 所示。实验结果显示,本方案能够通过 PPLN 中的电光效应成功地使信号光在相互正交的两种线偏振态之间互相转换,即入射光信号在逻辑 1 和逻辑 0 之间互相转换。因此通过控制外加电场的施加,本方案能实现可控逻辑非(Controlled-NOT)的功能。同时,通光比在信号处理过程中分别为 88.4% 和 96.0%,表明信号光强度在处理过程中的损耗较小。

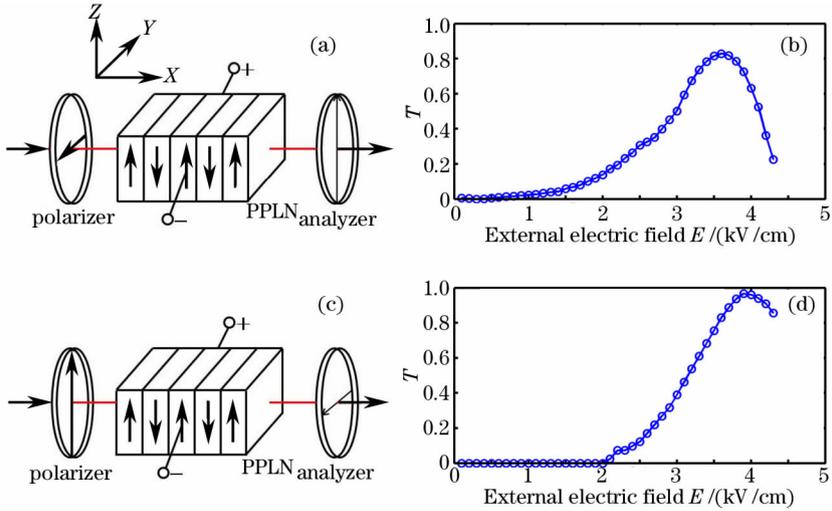


图 2 (a) (b)水平偏振和(c) (d)垂直偏振入射光的通光比

Fig. 2 (a) (b) Measurement of the transmission ratio T of the incident light with horizontal and (c) (d) vertical polarization states

表 1 实验测量结果

Table 1 Measured result of the experiment

Electric field $E / (\text{kV} / \text{cm})$	Input polarization	Input intensity $/ \mu\text{W}$	Output polarization	Output intensity $/ \mu\text{W}$	$T / \%$
3.14	\rightarrow	120	\uparrow	106.02	88.4
2.71	\uparrow	500	\rightarrow	480.08	96.0

为了实现异或门(XOR),选择光信号 1 和电信号 2 的逻辑表示,如表 2 所示。根据上述实验结果,本装置能实现异或门(XOR)的逻辑功能,如表 3 所示。为了实现同或门(XNOR),互换光信号 1 和电信号 2 的逻辑表示,如表 2 所示。同样根据实验结果,本装置能实现同或门(XNOR)的逻辑功能,如表 3 所示。通过前置级联可控非门,还能够实现光信

号 1 在异或门和同或门的信号表示之间的相互转换,从而能够方便地实现异或门和同或门逻辑功能之间的相互转换。通过采用不同的光路结构,本方案还能实现多种不同的逻辑功能^[7,8]。考虑到光信号 1 在处理过程中始终处于光域,不需要经过光-电-光的转换,本方案可以认为是全光的。

表 2 逻辑信号的物理表示

Table 2 Physical representation of logic signals

	XOR		XNOR	
	Logic 0	Logic 1	Logic 0	Logic 1
Signal 1	\rightarrow	\uparrow	\uparrow	\rightarrow
Signal 2	0	V	V	0
Output	\rightarrow	\uparrow	\uparrow	\rightarrow

表 3 异或门(XOR)和同或门(XNOR)真值表

Table 3 Truth table of XOR and XNOR gate

		Experiment				XOR				XNOR			
Signal 1	\rightarrow	\rightarrow	\uparrow	\uparrow	0	0	1	1	1	1	0	0	
Signal 2	0	V	0	V	0	1	0	1	1	0	1	0	
Output	\rightarrow	\uparrow	\uparrow	\rightarrow	0	1	1	0	1	0	0	1	

4 结 论

通过利用 PPLN 中的电光效应,实现了基于偏

振的二进制全光逻辑门,如可控非门、异或门和同或门。通过对光信号的偏振编码,信号光的强度不携

带任何信息。同时基于 PPLN 的电光偏振调制效应,信号光的强度损耗在处理过程中非常小,本系统更适合应用于多重级联系统,以完成更复杂的布尔逻辑运算。与之前同样基于偏振的二进制全光逻辑门实现方案相比,如利用铁电液晶材料^[5]和硅基薄膜材料^[10]的方案,本方案能通过外加电场精确控制线偏振态的旋转角^[8],并具有平行处理,便于集成和超快响应的优点。

参 考 文 献

- 1 Jian Wang, Junqiang Sun, Qizhen Sun. Single-PPLN-based simultaneous half-adder, half-subtractor, and OR logic gate: proposal and simulation [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(4): 1690~1699
- 2 G. Berrettini, A. Simi, A. Malacarne *et al.*. Ultrafast integrable and reconfigurable XNOR, and, NOR, and not photonic logic gate[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(5~8): 917~919
- 3 H. J. S. Dorren, A. K. Mishra, Z. G. Li *et al.*. All-optical logic based on ultrafast gain and index dynamics in a semiconductor optical amplifier[J]. *IEEE J. Sel. Topics in Quant. Electron.*, 2004, **10**(5): 1079~1092
- 4 K. R. Parameswaran, M. Fujimura, M. H. Chou *et al.*. Low-power all-optical gate based on sum frequency mixing in APE waveguides in PPLN[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(6): 654~656
- 5 M. A. Handschy, K. M. Johnson, W. T. Cathey *et al.*. Polarization-based optical parallel logic gate utilizing ferroelectric liquid crystals[J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(8): 611~613
- 6 Yanqing Lu, Zhiling Wan, Quan Wang *et al.*. Electro-optic effect of periodically poled optical superlattice LiNbO₃ and its applications[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(23): 3719~3721
- 7 Xianfeng Chen, Jianhong Shi, Yuping Chen *et al.*. Electro-optic Solc-type wavelength filter in periodically poled lithium niobate [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(21): 2115~2117
- 8 Kun Liu, Jianhong Shi, Xianfeng Chen. Linear polarization-state generator with high precision in periodically poled lithium niobate [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**(10): 1106
- 9 Y. A. Zaghoul, A. R. M. Zaghoul. Complete all-optical processing polarization-based binary logic gates and optical processors[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(21): 9879~9895
- 10 Y. A. Zaghoul, A. R. M. Zaghoul. Unforced polarization-based optical implementation of binary logic[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(16): 7252~7269

栏目编辑: 马 沂