

基于 PPLN 波导的全光数据选择器的设计与研究

申静, 秦晋*

沈阳工业大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870

摘要 在高速的光通信网络中, 现有的光网络交换能力与传输能力相比严重失衡, 建立全光网络(AON)成为解决该问题的一种有效途径。但是由于全光逻辑器件的不完善, 使得全光分组交换技术无法达到实用阶段。基于周期性极化铌酸锂(PPLN)波导的和频+差频效应(SFG+DFG), 在准相位匹配条件下, 采用波导级联的方式设计并实现了全光 2 选 1 数据选择器。通过数值计算和仿真得到波形图和眼图, 并利用脉冲宽度、消光比以及峰值功率延迟时间等参数分析数据选择器的性能。结果表明, 采用 PPLN 波导级联的方法对信号光进行处理, 不仅可以完成相应的逻辑功能, 而且可以保证信号的传输质量, 还扩展了 PPLN 波导在全光逻辑信号处理方面的能力。

关键词 光学器件; 全光信号处理; 全光数据选择器; 级联周期性极化铌酸锂波导; 准相位匹配; 和频效应; 差频效应

中图分类号 TN911.74

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.052301

Design and Investigation of All-Optical Data Selector Based on PPLN Waveguides

Shen Jing, Qin Jin

School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110870, China

Abstract In the high-speed optical communication network, the present optical network switching capability and transmission capability are seriously unbalanced. Therefore, building all-optical network (AON) is an effective way to solve the problem. However, all-optical packet switching technology has not been achieved due to immature all-optical logic devices. The all-optical 2-to-1 data selector is proposed based on sum-frequency generation SFG+DFG and difference-frequency generation (SFG+DFG) in quasi-phase-matched cascaded periodically poled lithium niobate (PPLN) waveguides. The waveforms and the eye diagrams are obtained by numerical calculation and simulation, and the performance of the data selector is analyzed by the parameters such as pulse width, extinction ratio and peak power delay time. The results show that the signal light is processed using the PPLN waveguide cascade method. It can not only complete the corresponding logic function, but also can guarantee the transmission quality of the signal, which expands the capability of PPLN waveguide on the all-optical logic signal processing.

Key words optical devices; all-optical signal processing; all-optical data selector; cascaded periodically poled lithium niobate waveguides; quasi-phase matching; sum-frequency generation; difference-frequency generation

OCIS codes 230.1150; 230.3750; 190.4360

1 引言

随着密集波分复用(DWDM)和光时分复用(OTDM)等技术的广泛应用, 光通信系统的容量也在不断提升。但是现有的光网络交换能力的发展相对滞后, 在通信节点处仍需在电域上对信号进行处

理, 无法避免的“光—电—光”转换使得系统的传输速率大大降低。为克服“电子瓶颈”, 最有效的办法是进行全光信号处理, 即建立全光网络(AON)^[1]。全光信号处理包括波长变换^[2]、解/复用^[3]、光参量振荡^[4]、光判决^[5]、光采样^[6]和倍频^[7]等, 其中全光逻辑是全光信号处理中的关键环节, 目前人们在全

收稿日期: 2017-10-12; 收到修改稿日期: 2017-11-30

基金项目: 辽宁省教育厅一般项目(L2015390)

作者简介: 申静(1984—), 男, 博士, 讲师, 主要从事全光信号处理方面的研究。E-mail: 429795043@qq.com

* 通信联系人。E-mail: 904399570@qq.com

光逻辑器件方面也取得了相应的研究成果。2017年,韦志禄等^[8]基于量子点半导体光放大器的交叉相位调制效应(QD-SOA-XPM),利用马赫-曾德尔干涉仪(MZI)进行模拟,实现了全光逻辑或门的功能,并选取Q因子和消光比作为衡量逻辑器件性能的参数。同年,杜勇等^[9]利用半导体光放大器(SOA)的简并四波混频效应提出了相位编码逻辑与门的设计方案,并通过SOA的分段模型对所提方案进行了仿真。全光逻辑器件的突破对未来的光交换、光计算、光传输等具有重要意义。

周期性极化铌酸锂(PPLN)波导是一种采用准相位匹配(QPM)技术的非线性光学材料^[10],具有效率高、噪声低、响应快、体积小、便于集成等特点。基于PPLN波导的全光逻辑功能主要是通过二阶非线性光学效应实现的,如倍频效应(SHG)、和频效应(SFG)、差频效应(DFG),以及它们之间的级联等。2007年,Furukawa等^[11]首次利用PPLN波导的和频+差频效应(SFG+DFG),成功实现了C波段内可调谐范围为23 nm、误码率低于 10^{-9} 的160 Gb/s归零信号的全光波长变换。目前,基于PPLN波导的全光逻辑器件也有了一些研究成果,如逻辑与^[12]、或、异或^[13]、半加器、半减器^[14-15]等。但是目前的全光逻辑器件只能完成较为单一的逻辑功能,无法满足光分组交换单元对更多、更复杂逻辑功能的需求,因此全光逻辑器件的相关研究已从基本逻辑转向了复杂组合逻辑。

数据选择器是一种组合逻辑电路,它可以在控制信号的选择下,从多路数据中选择一路数据作为输出信号。到目前为止,基于其他非线性光学材料的全光数据选择器也已有了相应的研究。Zhang等^[16]利用两个SOA仿真实现了40 Gb/s的数据选

择器,但是在偏置电流为250 mA时载流子的饱和和增益恢复时间为45 ps,载流子的缓慢恢复速率大大影响了其在更高速系统中的应用。Du等^[17]设计并实现了基于高非线性光纤(HNLF)的全光数据选择器,为获得较高的非线性系数,光纤长度需要达到1 km,这与长度仅为几厘米的PPLN波导相差甚远。因此相比于SOA和HNLF来说,PPLN波导在效率、速度、体积等方面更具优势。

本文设计了一种基于PPLN波导的和频+差频效应的全光2选1数据选择器,该选择器的传输速率为40 Gb/s。通过数值计算和仿真得到波形图和眼图,并利用脉冲宽度、消光比以及峰值功率延迟时间等参数分析数据选择器的性能。

2 基于PPLN波导的和频+差频效应的逻辑门基本原理

基于PPLN波导的全光逻辑器件主要是利用和频+差频效应实现的。输入两束速率和峰值功率均相同的二进制脉冲信号光 $A(\lambda_A)$ 和 $B(\lambda_B)$,当两束光满足和频准相位匹配条件时,在PPLN波导中会发生和频效应,生成和频光SF,波长为 $\lambda_{SF} = 1/(1/\lambda_A + 1/\lambda_B)$ 。这时连续抽运光 $P(\lambda_P)$ 同时又与新生成的和频光发生差频效应,生成波长为 $\lambda_C = 1/(1/\lambda_{SF} - 1/\lambda_P)$ 的差频输出光C。在此过程中,由于最初的和频光功率远小于信号光,所以能量总体上是由信号光向和频光进而向差频光转移的。当信号光功率减小到接近于和频光时,能量趋于平稳。因此和频+差频效应不会完全消耗信号光的能量,在输出端仍残留两路信号光的功率。在PPLN波导的输出端,利用带通滤波器(BPF)可以得到三路需要的光波,即差频输出光C和信号光A、B的和频剩余光波,如图1所示。

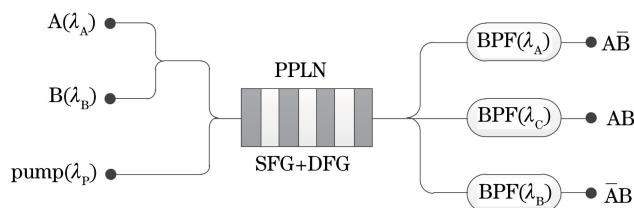


图1 基于PPLN波导的和频+差频效应的全光逻辑门的原理图

Fig. 1 Schematic of all-optical logic gates based on SFG+DFG in a PPLN waveguide

下面分别分析三种逻辑输入的情况下,在输出端的三路光波的数字逻辑:

1) 在信号光A、B均为逻辑0的时隙(即信号没有光功率存在)中,和频+差频效应不会发生,信号光的能量并没有发生转移,不会产生和频光,差频

光也就不会生成,此时的差频输出光和两路和频剩余光波均为逻辑0。

2) 在信号光A、B一个为逻辑0、一个为逻辑1的时隙中,在信号光A、B均为逻辑1的时隙(即信号均有光功率的存在)中,和频+差频效应依旧不会

发生,差频光为逻辑 0。从能量守恒的角度来看,两路信号光的功率同样不发生变化,因此输出的两路信号光的逻辑也不会发生改变。

3) 在信号光 A、B 均为逻辑 1 的时隙中,即信号均有光功率存在,在准相位匹配条件下和频过程会顺利发生,产生的和频光与抽运光发生差频过程,这时的差频输出光有光功率存在,那么在数字逻辑的角度认为该时隙的差频光为逻辑 1。此时信号光 A、B 的能量向和频光转移,假设和频过程能够充分地进行,则两路剩余信号光的功率就可以忽略,这时输出的两路和频剩余光波认为是逻辑 0。

综上所述,差频输出光 C 所代表的数字逻辑为 AB,信号光 A、B 的和频剩余光波所代表的数字逻辑分别为 $A\bar{B}$ 和 $\bar{A}B$ 。基于以上原理可以实现全光与门、或门、异或门,进而实现全光半加器、半减器以及更复杂的逻辑器件。

3 全光数据选择器的设计方案

如图 2 所示,全光 2 选 1 数据选择器是在控制信号光 S 的作用下,选择两束信号光 D_0 、 D_1 中的一个作为输出光 Y,它的作用相当于一个单刀双掷开关。当 S 为 0 时,输出信号光 $Y=D_0$;当 S 为 1 时,输出信号光 $Y=D_1$ 。由此可以得出输出光 Y 的逻辑表达式为

$$Y = \bar{S}D_0 + SD_1. \quad (1)$$

本方案先将控制光 S 和信号光 D_0 一起输入到 PPLN 波导中,在准相位匹配条件下,会发生和频+差频效应,在输出端利用带通滤波器可以得到信号光 D_0 的剩余光波,逻辑为 $\bar{S}D_0$ 。

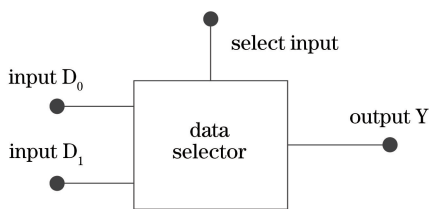


图 2 数据选择器的结构

Fig. 2 Structure of data selector

由于单个波导能够实现的逻辑功能非常有限,无法完成(1)式的组合逻辑功能,故本方案采用波导级联的方式。所谓波导级联就是通过光纤将前一级波导的输出端与后一级波导的输入端相连。这里为保证后一级波导中的二阶非线性过程能够有效进行,要求参与级联的各个 PPLN 波导的准相位匹配波长都要与其各自的和频输入光波相对应,因此参

与级联的各个波导的输入信号光必须具有相同的速率和峰值功率。采用波导级联方案主要是为了保证 $\bar{S}D_0$ 和 SD_1 能够具有相同的速率和峰值功率,以便利用光复用器能够完成“或”的运算。本方案采用第一级波导对控制光 S 作“非”运算,原理如图 3 所示。

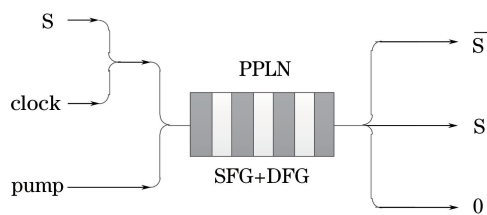


图 3 利用 PPLN 波导作逻辑“非”运算的基本原理

Fig. 3 Concept of utilizing PPLN waveguide as NOT logic gate

将控制光 S 与时钟信号一起输入到 PPLN 波导中,这里时钟信号的速率和峰值功率与 S 均相同,且在每个时隙都为逻辑 1。在准相位匹配条件下,当控制光 S 为逻辑 1 时,会发生和频+差频效应,此时时钟信号的光功率便会被大量消耗,在输出端可以近似认为是逻辑 0;当控制光 S 为逻辑 0 时,不会发生和频+差频效应,此时的时钟信号仍为逻辑 1。所以在输出端时钟信号的和频剩余光波的逻辑为 \bar{S} ,且速率和峰值功率并没有发生改变,可以作为下一级波导的输入信号。再将 \bar{S} 与信号光 D_1 输入到第二级波导中,根据之前的分析可知 D_1 的和频剩余光波的逻辑为 SD_1 。

图 4 为基于 PPLN 波导的和频+差频效应的全光 2 选 1 数据选择器的设计图,为了简化图中省略了各级抽运光。抽运光并没有参与逻辑运算,而是参与了 PPLN 波导中的差频效应。差频效应对逻辑器件性能的提升起到了至关重要的作用。由能量守恒定律可知,和频效应不会使信号光的能量完全转移到新生成的和频光上,所以信号的和频剩余光波还会存在一定的光功率。但是和频光与抽运光发生差频效应可以通过对和频光能量的消耗,使和频效应得以更充分地进行,从而缩小和频剩余光波的功率。和频效应发生时,和频剩余光波的功率越小,逻辑器件的性能也就越好。这里由于控制光 S、信号光 D_0 、 D_1 均为速率和峰值功率相同的二进制脉冲信号,所以输出的 $\bar{S}D_0$ 和 SD_1 的速率和峰值功率也相等,经过光复用器作用即可实现(1)式的逻辑功能。这里的光复用器只是将两路光波耦合到一根光纤中,它们还是按照各自的波长进行传输,但并不影响逻辑功能。

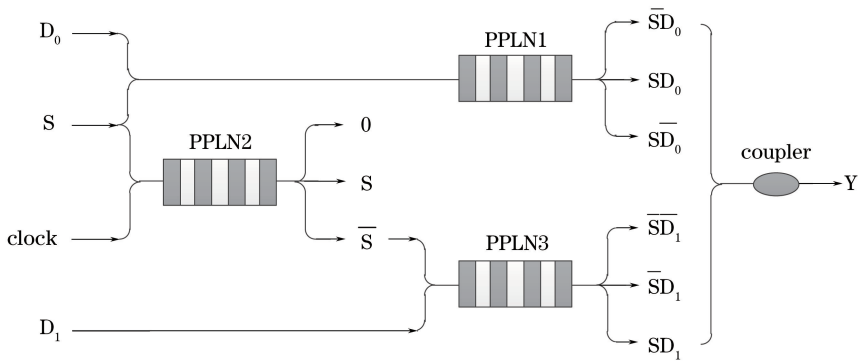


图4 基于级联 PPLN 波导的全光数据选择器的原理图

Fig. 4 Diagram of the all-optical data selector based on cascaded PPLN waveguides

4 仿真结果与性能分析

PPLN 波导中发生的二阶非线性光学现象的本质是光波场与波导中的带电粒子相互作用,在此过程中形成的非线性极化场将辐射出频率不同于初始频率的光波。由于 PPLN 波导在制作时人为地让非线性极化率发生周期性反转,光场强度不再发生周期性振荡变化,而是持续地增加,因此传输的光信号之间产生的相位失配可以有效地得到补偿, PPLN 波导中的二阶非线性过程也得以充分进行。在准相位匹配条件下, PPLN 波导中的和频+差频效应符合电磁现象的一般规律,可以由麦克斯韦方程组推导出光波在波导中的传输方程,根据 Sellmeier 方程设定不同光波的折射率^[18],进而推导出和频+差频过程在慢变振幅近似条件下的耦合波方程组。以光波 A 和 B 的和频+差频过程为例,耦合波方程组表达式如下:

参与和频过程的信号光 A、B 的光波方程分别为

$$\frac{\partial E_A}{\partial z} + \beta_{1A} \frac{\partial E_A}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2A} \frac{\partial^2 E_A}{\partial t^2} = -\frac{\alpha_A}{2} E_A + i\omega_A \kappa_{SFG} E_B^* E_{SF} \exp(i\Delta k_{SFG} z), \quad (2)$$

$$\frac{\partial E_B}{\partial z} + \beta_{1B} \frac{\partial E_B}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2B} \frac{\partial^2 E_B}{\partial t^2} = -\frac{\alpha_B}{2} E_B + i\omega_B \kappa_{SFG} E_A^* E_{SF} \exp(i\Delta k_{SFG} z), \quad (3)$$

和频光 SF 的方程为

$$\frac{\partial E_{SF}}{\partial z} + \beta_{1SF} \frac{\partial E_{SF}}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2SF} \frac{\partial^2 E_{SF}}{\partial t^2} = -\frac{\alpha_{SF}}{2} E_{SF} + i\omega_{SF} \kappa_{SFG} E_A E_B \exp(-i\Delta k_{SFG} z) + i\omega_{SF} \kappa_{DFG} E_P E_C \exp(-i\Delta k_{DFG} z), \quad (4)$$

差频过程中的连续抽运光 P 与差频输出光 C 的光波方程分别为

$$\frac{\partial E_P}{\partial z} + \beta_{1P} \frac{\partial E_P}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2P} \frac{\partial^2 E_P}{\partial t^2} = -\frac{\alpha_P}{2} E_P + i\omega_P \kappa_{DFG} E_C^* E_{SF} \exp(i\Delta k_{DFG} z), \quad (5)$$

$$\frac{\partial E_C}{\partial z} + \beta_{1C} \frac{\partial E_C}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2C} \frac{\partial^2 E_C}{\partial t^2} = -\frac{\alpha_C}{2} E_C + i\omega_C \kappa_{DFG} E_P^* E_{SF} \exp(i\Delta k_{DFG} z), \quad (6)$$

式中 E_A 、 E_B 、 E_{SF} 、 E_P 和 E_C 分别是信号光 A、信号光 B、和频光 SF、抽运光 P 和差频输出光 C 的光场强度,信号光功率为光场强度的平方,* 代表共轭; α_j ($j=A, B, SF, P, C$) 表示损耗系数; β_{1j} 、 β_{2j} 分别为波矢 k_j 对频率 ω_j 的一阶和二阶导数; κ_{SFG} 为和频耦合系数, κ_{DFG} 为差频耦合系数; Δk_{SFG} 、 Δk_{DFG} 分别表示和频效应、差频效应中的相位失配量。

κ_{SFG} 、 κ_{DFG} 的表达式分别为

$$\kappa_{SFG} = d_{\text{eff}} \sqrt{\frac{2\mu_0}{c n_A n_B n_{SF} A_{\text{eff}}}}, \quad (7)$$

$$\kappa_{DFG} = d_{\text{eff}} \sqrt{\frac{2\mu_0}{c n_P n_C n_{SF} A_{\text{eff}}}}, \quad (8)$$

式中 d_{eff} 为有效非线性系数, μ_0 为磁导率, c 为光波在真空中的传输速率, n_j ($j=A, B, SF, P, C$) 为不同光波在波导中的折射率, A_{eff} 为波导的有效作用面积。

Δk_{SFG} 、 Δk_{DFG} 的表达式分别为

$$\Delta k_{SFG} = k_{SF} - k_A - k_B - k_m = 2\pi \left(\frac{n_{SF}}{\lambda_{SF}} - \frac{n_A}{\lambda_A} - \frac{n_B}{\lambda_B} - \frac{1}{\Lambda} \right), \quad (9)$$

$$\Delta k_{DFG} = k_{SF} - k_P - k_C - k_m = 2\pi \left(\frac{n_{SF}}{\lambda_{SF}} - \frac{n_P}{\lambda_P} - \frac{n_C}{\lambda_C} - \frac{1}{\Lambda} \right), \quad (10)$$

式中 Λ 为 PPLN 波导的周期, k_j ($j=A, B, SF, P, C$) 为传播常数。为提高转换效率,应尽可能使和频效应和差频效应都满足相位匹配条件。但是由于和

频效应对相位匹配要求十分敏感,而差频效应的要求相对较低,故在实际的通信系统中,应尽量满足和频准相位匹配条件,即 $\Delta k_{\text{SFG}} = 0$ 。本设计旨在完成 $1.55 \mu\text{m}$ 波段信号光的逻辑功能,如将抽运光也设定在此波段,那么 $n_A/\lambda_A + n_B/\lambda_B$ 与 $n_P/\lambda_P + n_C/\lambda_C$ 近似相等,也就是说当满足和频准相位匹配条件时,差频效应的相位失配也不会太大,即 $\Delta k_{\text{DFG}} \approx \Delta k_{\text{SFG}} = 0$ 。这也是基于和频+差频效应的全光逻辑器件具有很高转换效率的原因。

本研究利用 MATLAB 软件,采用分步傅里叶算法和有限差分法对耦合波方程组进行求解。其中 PPLN 波导的长度为 30 mm ,有效作用面积 $A_{\text{eff}} = 50 \mu\text{m}^2$ 。控制光 S、信号光 D_0 、 D_1 和时钟信号 clock 均是速率为 40 Gb/s 、峰值功率为 1000 mW 的二进制归零码脉冲序列,波长分别为 $1538, 1562, 1550, 1568 \text{ nm}$ 。输入到 PPLN1~PPLN3 波导的抽运光波长分别为 $1561, 1555, 1567 \text{ nm}$ 。PPLN 波导的非线性系数 d_{33} 为 27 pm/V ,由此可得有效非线性系数 ($d_{\text{eff}} = 2d_{33}/\pi$) 为 17.2 pm/V 。控制光 S、信号光 D_0 、信号光 D_1 和抽运光的峰值功率分别为 1000 mW 、 $(\lambda_S/\lambda_{D_1}) \times 1000 \text{ mW}$ 、 $(\lambda_S/\lambda_{D_2}) \times 1000 \text{ mW}$ 、 100 mW 。

全光数据选择器各路信号的波形如图 5 所示。控制光 S 和信号光 D_0 、 D_1 的取值遍历了 8 种逻辑

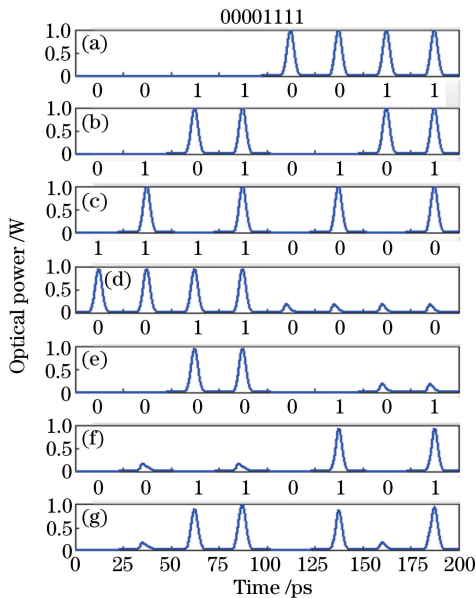


图 5 全光数据选择器的各路信号波形图。

(a) S; (b) D_0 ; (c) D_1 ; (d) \bar{S} ; (e) $\bar{S}D_0$; (f) SD_1 ; (g) Y
Fig. 5 Waveforms of various signal of the all-optical data selector. (a) S; (b) D_0 ; (c) D_1 ; (d) \bar{S} ; (e) $\bar{S}D_0$; (f) SD_1 ; (g) Y

组合以确保测试出所有的情况。经计算发现基于 PPLN 波导的全光数据选择器的二进制逻辑功能已经得到很好的实现,而且过程信号 SD_1 是经过两个 PPLN 波导级联得到的结果,与 $\bar{S}D_0$ 只通过一个波导传输的质量几乎没有差别,这进一步证明了级联 PPLN 波导在处理较为复杂逻辑功能的同时并不会影响信号的传输质量。图 5(d)~(g)中均可以明显看到在一些 0 bit 时隙里仍有很小的光功率存在,这是由于和频过程的不充分所造成的。根据能量守恒定律,在和频过程中信号光的功率虽然在逐渐减小,但不会低于和频光,也就是说能量并不会完全转移到和频光上,更不可能完全被消耗。这与选取的光波参数无关,也与波导长度无关。但是与此同时和频光与抽运光发生的差频过程可以提升能量的转移效率,使得信号光功率尽可能减小。图 5(g)为最终输出光 Y 的波形图,可以看出在第二和第七时隙中仍存有少量光功率,但也已经远小于 1 bit 的功率,可以忽略。值得注意的是,输出光 Y 的 1 bit 功率的大小并不完全一致,这是由于光复用器也将 0 bit 时隙的残留功率叠加到 1 bit 时隙的功率上所造成的,但并不影响逻辑功能。

图 6 为全光数据选择器各路信号的眼图。消光比的定义为 $R_E = 10\lg(\mu_1/\mu_0)$,其中 μ_1 和 μ_0 为在

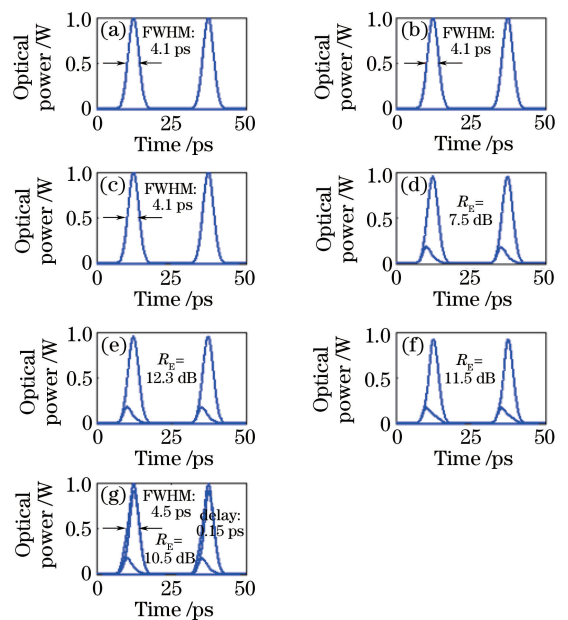


图 6 全光数据选择器的各路信号眼图。

(a) S; (b) D_0 ; (c) D_1 ; (d) \bar{S} ; (e) $\bar{S}D_0$; (f) SD_1 ; (g) Y
Fig. 6 Eye diagrams of various signal of the all-optical data selector. (a) S; (b) D_0 ; (c) D_1 ; (d) \bar{S} ; (e) $\bar{S}D_0$; (f) SD_1 ; (g) Y

眼图采样点上光信号分别为逻辑 1 和逻辑 0 时的平均功率。过程信号 \bar{S} 由于是时钟信号的和频剩余光波,所以它在每个时隙中都有光功率存在,消光比为 7.5 dB,要比 \bar{SD}_0 、 SD_1 以及 Y 低一些,而这三路信号光的消光比分别为 12.3, 11.5, 10.5 dB。由于过程信号 \bar{SD}_0 和 SD_1 在本质上分别是信号光 D_0 和 D_1 的和频剩余光波,所以脉冲宽度并没有发生改变。由于光复用器的作用,输出光 Y 是由 \bar{SD}_0 和 SD_1 加和得到,所以 Y 的脉冲宽度稍有增大,半峰全宽 (FWHM) 为 4.5 ps,且峰值功率延迟了 0.15 ps,但输出信号质量较好。

5 结 论

在基于单个波导的全光逻辑门的理论上,利用 PPLN 波导的和频+差频效应,采用多个波导级联的方式,设计并实现了 40 Gb/s 的全光 2 选 1 数据选择器。首先对数据选择器的功能进行分析,得到输出信号 Y 的逻辑表达式。然后采用分步傅里叶算法和有限差分法计算出了基于 PPLN 波导的全光数据选择器的波形图和眼图,结果表明理论推导和数值仿真的结果相吻合。最后通过分析该数值比较器输入输出信号波形的消光比、脉冲宽度、峰值功率延迟时间等参数,验证了该方案不仅可以在光域内完成 2 选 1 数据选择器的逻辑功能,而且可以保证信号光的传输质量。

参 考 文 献

- [1] Hu W J, Gui H Y, Huang B X. All optical networks key technologies and development prospects [J]. Study on Optical Communication, 2005(2): 23-29.
胡文娟, 桂厚义, 黄本雄. 全光网的关键技术及其发展前景[J]. 光通信研究, 2005(2): 23-29.
- [2] Yang W H, Wang H L, Wang Z X, *et al.* Wavelength conversion efficiency of quantum dot semiconductor optical amplifier [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4): 0406005.
杨文华, 王海龙, 王兆祥, 等. 量子点半导体光放大器的波长转换效率[J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0406005.
- [3] Yang Y F, Lou C Y, Zhao X F, *et al.* Demultiplexing from 160 Gb/s to 10 Gb/s using nonlinear optical loop mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(3): 611-616.
杨彦甫, 娄采云, 赵晓凡, 等. 利用非线性光线环境 160 Gb/s 到 10 Gb/s 解时分复用[J]. 光学学报, 2009, 29(3): 611-616.
- [4] Xie X B, Li S G, Zhu X L, *et al.* Characteristics of single resonant nanosecond pulse optical parametric oscillator with output wavelength of 2.05 μm [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 1208002.
谢小兵, 李世光, 朱小磊, 等. 2.05 μm 单谐振纳秒脉冲光参量振荡器特性研究[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1208002.
- [5] Fukuchi Y, Minamide D, Yamamoto M. All-optical decision gate circuits using cascaded periodically poled lithium niobate devices[R]. International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices, 2015: 83-84.
- [6] Fan X L, Fu S N, Tang M, *et al.* Optimization of light sampling coupler in all-optical multiple-input multiple-output signal processing [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4): 0406004.
范鑫磊, 付松年, 唐明, 等. 全光多输入多输出信号处理中光采样耦合器的优化[J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0406004.
- [7] Jiang J, Zhang J D, Wang K, *et al.* Theoretical study on broadband frequency doubling in a periodically poled lithium niobate crystal[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 041901.
蒋健, 张建东, 王凯, 等. 非周期极化铌酸锂晶体带宽倍频的理论研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 041901.
- [8] Wei Z L, Wang H L, Wang Z X, *et al.* Research of all-optical logic OR gate based on QD-SOA-XPM[J]. Communications Technology, 2017, 50(4): 630-635.
韦志禄, 王海龙, 王兆祥, 等. 基于 QD-SOA-XPM 全光逻辑或门的研究[J]. 通信技术, 2017, 50(4): 630-635.
- [9] Du Y, Wang J, Zhao Z H, *et al.* Research of all-optical logic AND gate based on phase encoding[J]. Information & Communications, 2017, 178(10): 113-114.
杜勇, 王静, 赵忠华, 等. 相位编码全光 AND 逻辑门的研究[J]. 信息通信, 2017, 178(10): 113-114.
- [10] Liu T. Investigation of quasi-phase matching technology and its applications [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009.
刘涛. 准相位匹配技术及其应用研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2009.
- [11] Furukawa H, Nirmalathas A, Wada N, *et al.* Tunable all-optical wavelength conversion of 160 Gb/s RZ optical signals by cascaded SFG-DFG

- generation in PPLN waveguide [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(6): 384-386.
- [12] Wang J, Sun J, Sun Q, *et al.* PPLN-based flexible optical logic AND gate [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(3): 211-213.
- [13] Wang J, Sun J. All-optical logic XOR gate for high-speed CSRZ-DPSK signals based on cSFG/DFG in PPLN waveguide [J]. Electronics Letters, 2010, 46(4): 288-290.
- [14] Wang J, Sun J, Sun Q. Single-PPLN-based simultaneous half-adder, half-subtractor, and OR logic gate: proposal and simulation [J]. Optics Express, 2007, 15(4): 1690-1699.
- [15] Bogoni A, Wu X, Fazal I, *et al.* All-optical 160 Gb/s half-addition half-subtraction and AND/OR function exploiting pump depletion and nonlinearities in a PPLN waveguide [J]. Brussels: 34th European Conference on Optical Communication, 2008, doi: 10.1109/ECOC.2008.4729575.
- [16] Zhang Y, Lei L, Dong J, *et al.* 40 Gb/s 2-to-1 photonic data selector via XGM and FWM in two SOAs [J]. Electronics Letters, 2011, 47(14): 811-812.
- [17] Du Y, Zhang G P, Wu Y H, *et al.* Proposal and investigation of photonic data selector based on cross-phase modulation in highly nonlinear fiber [J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(1): 40-46.
- [18] Jundt D H. Temperature-dependent Sellmeier equation for the index of refraction, n_e , in congruent lithium niobate [J]. Optics Letters, 1997, 22(20): 1553-1555.