

# 基于 PPLN 波导的单波长全光或门研究

童艳\*, 李丹, 李晶晶

沈阳城市建设学院信息与控制工程系, 辽宁 沈阳 110167

**摘要** 全光或门是全光逻辑信号处理中必不可少的一项基础技术,以往采用周期性极化铌酸锂(PPLN)波导实现的全光或门的输出光波均是混频波。本文基于 PPLN 波导的和频+差频效应(SFG+DFG),在准相位匹配条件下,通过三个 PPLN 波导的级联设计实现了单波长输出的全光或门。通过数值计算和仿真得到了信号波形和眼图,并通过计算消光比、脉冲宽度以及峰值功率的延迟时间分析了单波长全光或门的性能。结果表明,本方案能很好地实现单波长输出的全光或门,其输出光波能直接应用于光域,从而改善光逻辑器件的衔接,提高处理速度,并为研发新型全光逻辑器件提供重要基础。

**关键词** 光学器件; 全光信号处理; 单波长全光或门; 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/LOP55.092301

## All-Optical OR Gate with Single Wavelength Based on PPLN Waveguides

Tong Yan\*, Li Dan, Li Jingjing

*Department of Information and Control Engineering, Shenyang Urban Construction University,  
Shenyang, Liaoning 110167, China*

**Abstract** All-optical OR gate is a necessary basic technology in all-optical logic signal processing, and the output optical wave of the OR gate based on periodically poled lithium niobate (PPLN) waveguide in former schemes is mixing wave. In this paper, the all-optical OR gate with single wavelength which consists of three cascaded PPLN waveguides is proposed based on sum-frequency generation and difference-frequency generation (SFG + DFG) in quasi-phase-matching consideration. The signal waveforms and eye-diagrams are obtained by numerical calculation and simulation, and the performance of all-optical OR gate with single wavelength is analyzed by the parameters such as extinction ratio, pulse width and delay time of peak power. The results demonstrate that the logic function of OR gate with single wavelength can be achieved well by this configuration, so that its output optical wave can be used directly in optical domain, thus the connection of optical logical devices can be improved, the speed of processing can be increased, and the critical foundation of developing new all-optical logical devices can be provided.

**Key words** optical devices; all-optical signal processing; all-optical OR gate with single wavelength; cascaded PPLN waveguides; quasi-phase matching; sum-frequency generation (SFG); difference-frequency generation (DFG)

**OCIS codes** 230.1150; 230.3750; 190.4360

## 1 引言

当今时代对信息容量以及通信速率的需求不断增加,而目前光通信网络由于其光域信号处理能力的滞后,在网络节点处仍需将光信号转换到电域再进行信号处理,这种“光-电-光”的转换模式大大降低了系统的传输速率,因此这种无法避免的“电子瓶颈”已无

法满足需求。建立全光网是克服“电子瓶颈”的最有效的办法<sup>[1]</sup>。全光网具有容量大、速率高、组网灵活性高、支持协议多样、可靠性强等优点,是理想的通信网络<sup>[2]</sup>。而全光信号处理技术是全光网中必不可少的关键技术。全光信号处理技术包括:全光采样<sup>[3]</sup>、全光波长变换、全光逻辑信号处理<sup>[4]</sup>、全光头信号提取、全光缓存、超短光脉冲产生和全光 3R 再生<sup>[5-6]</sup>等。

收稿日期: 2018-03-23; 修回日期: 2018-04-13; 录用日期: 2018-04-17

基金项目: 沈阳城市建设学院科学研究发展基金(XKJ2018005)

\* E-mail: 179956737@qq.com

而其中的重点和难点就是全光逻辑信号处理,它是全光信号处理中的关键环节。

周期性极化铌酸锂(PPLN)波导是一种实现准相位匹配(QPM)技术的非线性光学材料<sup>[7]</sup>,由于其具有噪声低、效率高、响应迅速、体积小、集成便利等优点,在全光时域复用/解复用<sup>[8]</sup>、全光波长变换<sup>[9]</sup>、全光逻辑信号处理<sup>[10]</sup>、光开关<sup>[11]</sup>以及光参量放大/振荡<sup>[12]</sup>等领域已得到非常广泛的应用。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。

目前利用PPLN波导实现的全光逻辑或门的输出光波均是混频波。Wang等<sup>[13]</sup>在2007年提出的用一个PPLN波导同时实现40 Gbit/s半加器、半减器和或门的方案,Bogoni等<sup>[14]</sup>在2008年提出的用一个PPLN波导同时实现160 Gbit/s半加器、半减器、与门和或门的方案,以及Bogoni等<sup>[15]</sup>在2009年提出的基于单个PPLN波导实现160 Gbit/s时域分插复用和全光逻辑门的实验中,或门都是用一个耦合器或者复用器将输入光波A和输出光波 $\bar{A}B$ 或者将输入光波B和输出光波 $A\bar{B}$ 复用在一起而得到,而 $\bar{A}B$ 是输入光波B的剩余光波, $A\bar{B}$ 是输入光波A的剩余光波,因此,或门的输出光波是光波A和B的混频波。Wang等<sup>[16]</sup>在2007年提出的基于PPLN波导和频效应的全光可开关逻辑或门/异或门的方案中提到,当两输入光波A和B的功率较小时,若A和B都为逻辑1,则经过和频后A和B将消耗一半的功率,而只要A和B其中一路为0,则不会发生和频,因此可使用A和B的输出光波的混频光波来实现逻辑或门。上述方案实现的逻辑或门的输出光波均为混频波,输出光波的波长不单一,是多波长混合的光波。这种输出光波只有通过光电转换器将混频波转换成电信号才能成功得到或门逻辑,而不能在光域中直接被提取或被使用,因此会影响光逻辑运算器件的衔接。此外,或门是逻辑运算中的基本逻辑门,是逻辑器件的基础,因此非单波长输出的全光逻辑或门也会给新型全光逻辑器件的研发带来一定的困难。

本文提出了一种基于PPLN波导SFG+DFG的单波长输出全光逻辑或门的方案,该方案通过三个PPLN波导级联实现了逻辑或门的单波长输出光波,该光波能直接应用于光域。文中还通过数值计算和仿真得到了信号波形和眼图,并通过计算消光比、脉冲宽度以及峰值功率的延迟时间分析了其性能。

## 2 基于PPLN波导SFG+DFG的逻辑运算基本原理

基于PPLN波导的全光逻辑运算主要是利用PPLN波导的SFG+DFG实现的。在PPLN波导的输入端同时输入两路速率和峰值功率均相同的二进制脉冲信号光 $A(\lambda_A)$ 和 $B(\lambda_B)$ 以及连续抽运光 $P(\lambda_P)$ ,当两路信号光A和B的波长满足该PPLN波导的和频准相位匹配条件时,在PPLN波导中会发生和频效应,产生和频光SF,波长为 $\lambda_{SF} = 1/(1/\lambda_A + 1/\lambda_B)$ 。生成的和频光同时又与连续抽运光发生差频效应,产生波长为 $\lambda_C = 1/(1/\lambda_{SF} - 1/\lambda_P)$ 的差频输出光C。在和频与差频过程中,由于信号光功率远大于最初的和频光功率,因此能量总体上是由信号光向和频光进而向差频光转移。当和频光功率增大到接近于信号光功率时,能量趋于平稳。因此信号光的能量在SFG+DFG中不会完全被消耗掉,在PPLN波导输出端会仍残留两路信号光的功率。可以在输出端利用带通滤波器(BPF)得到三路所需光波,即信号光A、B的和频剩余光波和差频输出光C,如图1所示。

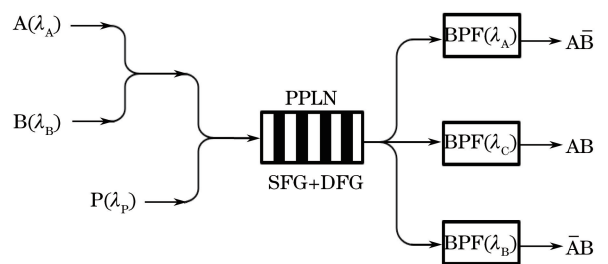


图1 基于PPLN波导SFG+DFG的全光逻辑运算原理图  
Fig. 1 Schematic diagram of all-optical logic operation based on SFG+DFG in a PPLN waveguide

由于在某一时刻中,信号光A、B的逻辑有三种可能:均为逻辑0;一个为逻辑1,一个为逻辑0;均为逻辑1,因此下面分别针对这三种情况对图1所示PPLN波导输出端的三路光波的数字逻辑进行分析:

1) 当时隙中信号光A、B均为逻辑0时,即两路信号的光功率为0,则不会发生和频过程,也就不会产生和频光,因此也不会发生差频过程,不会产生差频光,这种情况下,两路和频剩余光波和差频输出光均为逻辑0。

2) 当时隙中信号光A、B一个为逻辑1,一个为逻辑0时,依旧不会发生SFG+DFG过程,因此差频输出光为逻辑0,两路信号光的和频剩余光波的逻辑仍与两路信号光的逻辑保持一致。

3) 当时隙中信号光 A、B 均为逻辑 1 时, 即两路信号都存在光功率, 在满足准相位匹配条件下, 会发生和频过程, 生成的和频光与连续抽运光又会发生差频过程, 因此差频输出光存在光功率, 则认为该时隙的差频输出光为逻辑 1。如果假设和频过程能充分进行, 则信号光 A、B 的能量都转移给和频光, 此时就可忽略两路信号光的和频剩余光波的功率, 认为两路和频剩余光波均为逻辑 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  $\bar{A}\bar{B}$  和  $\bar{A}B$ 。

### 3 单波长全光或门的设计方案

逻辑或门的真值表如表 1 所示。由图 1 单个 PPLN 波导输出光波的逻辑可知, 要实现单波长输出的逻辑或门, 就需要将或运算转换成只含有与和非的表达式。由逻辑运算规则可得

$$A + B = \overline{\bar{A}\bar{B}}. \quad (1)$$

表 1 逻辑或门的真值表

Table 1 Truth table for the OR logic gate

A	B	A+B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

显然单一波导无法完成(1)式中的逻辑功能, 因此本设计采用多个波导级联的方式。所谓波导级联, 就是通过光纤将前一级 PPLN 波导的输出光接入到后一级 PPLN 波导的输入端。为了能够在后一级波导中有效地进行二阶非线性过程, 需要保证参与级联的各波导的输入信号光必须具备相同的峰值功率和速率。本设计利用第一级 PPLN 波导对信号光 A 作逻辑非的运算, 原理如图 2 所示。

利用图 2 示出的逻辑非运算的基本原理, 可通过三级 PPLN 波导级联来实现本设计方案, 即基于

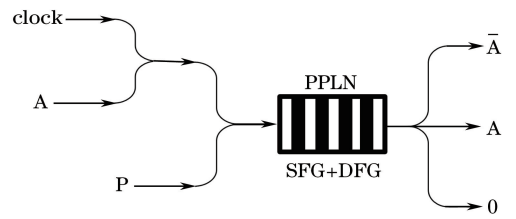


图 2 利用 PPLN 波导作全光逻辑非运算的原理图

Fig. 2 Schematic diagram of all-optical NOT

logic gate in a PPLN waveguide

PPLN 波导的单波长输出全光逻辑或门, 其原理图如图 3 所示, 为简化, 图中省略了各级连续抽运光。首先将时钟信号 clock1 与信号光 A 同时输入到第一级 PPLN 波导中, 其中时钟信号 clock1 在每个时隙都为逻辑 1, 它的峰值功率和速率与信号光 A 相同。在满足准相位匹配条件下, 时钟信号 clock1 与信号光 A 以及连续抽运光会在第一级 PPLN 波导中发生和频+差频效应, 输出的时钟信号 clock1 的和频剩余光波的逻辑为  $\bar{A}$ , 且其峰值功率和速率没有发生改变, 可作为下一级 PPLN 波导的输入信号。下面将  $\bar{A}$  和 B 一起输入到第二级 PPLN 波导中, 输出的  $\bar{A}$  的和频剩余光波的逻辑为  $\bar{A}\bar{B}$ , 且其峰值功率和速率仍没有发生改变, 还可作为下一级 PPLN 波导的输入信号。最后将  $\bar{A}\bar{B}$  和时钟信号 clock2 (在每个时隙都为逻辑 1) 一起输入到第三级 PPLN 波导中, 输出的时钟信号 clock2 的和频剩余光波的逻辑为  $\overline{\bar{A}\bar{B}}$ , 此输出光波就实现了(1)式的逻辑功能, 且实现的全光逻辑或门为单波长。

### 4 仿真结果与性能分析

本设计基于 PPLN 波导中的 SFG+DFG, 而这种效应符合电磁现象的一般规律, 因此可由 Maxwell 方程组得到波导中光波的传输方程, 根据 Sellmeier 方程设定不同光波的折射率<sup>[17]</sup>, 进而推导出 PPLN 波导 SFG+DFG 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 SFG+DFG 过程为例, 耦合波方程组表达式如下:

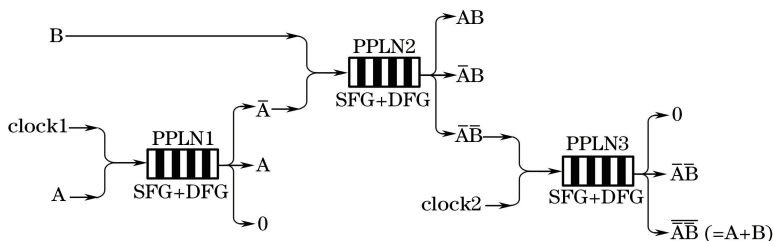


图 3 基于级联 PPLN 波导的单波长全光或门原理图

Fig. 3 Configuration of the all-optical OR gate with single wavelength based on cascaded PPLN waveguides

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \mathbf{E}_A}{\partial z} + \beta_{1A} \frac{\partial \mathbf{E}_A}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2A} \frac{\partial^2 \mathbf{E}_A}{\partial t^2} = -\frac{\alpha_A}{2} \mathbf{E}_A + i\omega_A \kappa_{\text{SFG}} \mathbf{E}_B^* \mathbf{E}_{\text{SF}} \exp(i\Delta k_{\text{SFG}} z) \\ \frac{\partial \mathbf{E}_B}{\partial z} + \beta_{1B} \frac{\partial \mathbf{E}_B}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2B} \frac{\partial^2 \mathbf{E}_B}{\partial t^2} = -\frac{\alpha_B}{2} \mathbf{E}_B + i\omega_B \kappa_{\text{SFG}} \mathbf{E}_A^* \mathbf{E}_{\text{SF}} \exp(i\Delta k_{\text{SFG}} z) \\ \frac{\partial \mathbf{E}_{\text{SF}}}{\partial z} + \beta_{1\text{SF}} \frac{\partial \mathbf{E}_{\text{SF}}}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2\text{SF}} \frac{\partial^2 \mathbf{E}_{\text{SF}}}{\partial t^2} = -\frac{\alpha_{\text{SF}}}{2} \mathbf{E}_{\text{SF}} + i\omega_{\text{SF}} \kappa_{\text{SFG}} \mathbf{E}_A \mathbf{E}_B \exp(-i\Delta k_{\text{SFG}} z) + \\ \quad i\omega_{\text{SF}} \kappa_{\text{DFG}} \mathbf{E}_P \mathbf{E}_C \exp(-i\Delta k_{\text{DFG}} z) \\ \frac{\partial \mathbf{E}_P}{\partial z} + \beta_{1P} \frac{\partial \mathbf{E}_P}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2P} \frac{\partial^2 \mathbf{E}_P}{\partial t^2} = -\frac{\alpha_P}{2} \mathbf{E}_P + i\omega_P \kappa_{\text{DFG}} \mathbf{E}_C^* \mathbf{E}_{\text{SF}} \exp(i\Delta k_{\text{DFG}} z) \\ \frac{\partial \mathbf{E}_C}{\partial z} + \beta_{1C} \frac{\partial \mathbf{E}_C}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2C} \frac{\partial^2 \mathbf{E}_C}{\partial t^2} = -\frac{\alpha_C}{2} \mathbf{E}_C + i\omega_C \kappa_{\text{DFG}} \mathbf{E}_P^* \mathbf{E}_{\text{SF}} \exp(i\Delta k_{\text{DFG}} z) \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\kappa_{\text{SFG}} = d_{\text{eff}} \sqrt{\frac{2\mu_0}{cn_A n_B n_{\text{SF}} A_{\text{eff}}}}, \quad \kappa_{\text{DFG}} = d_{\text{eff}} \sqrt{\frac{2\mu_0}{cn_P n_C n_{\text{SF}} A_{\text{eff}}}}, \quad (3)$$

$$\Delta k_{\text{SFG}} = k_{\text{SF}} - k_A - k_B - \frac{2\pi}{\Lambda}, \quad \Delta k_{\text{DFG}} = k_{\text{SF}} - k_P - k_C - \frac{2\pi}{\Lambda}, \quad (4)$$

式中： $\mathbf{E}_A$ 、 $\mathbf{E}_B$ 、 $\mathbf{E}_{\text{SF}}$ 、 $\mathbf{E}_P$  和  $\mathbf{E}_C$  分别对应为信号光 A 与 B、和频光 SF、抽运光 P 和差频输出光 C 的光场强度； $\alpha_j$  ( $j=A, B, \text{SF}, P, C$ ) 为所选取 PPLN 波导的损耗系数； $\beta_{1j}$ 、 $\beta_{2j}$  分别是波矢大小  $k_j$  对频率  $\omega_j$  的一阶导数和二阶导数； $\kappa_{\text{SFG}}$ 、 $\kappa_{\text{DFG}}$  分别为和频与差频过程的耦合系数； $d_{\text{eff}}$  为波导的有效非线性系数； $\mu_0$  为磁导率； $c$  为光波在真空中的传输速率； $n_j$  为不同光波在波导中的折射率； $A_{\text{eff}}$  为有效作用面积； $\Delta k_{\text{SFG}}$ 、 $\Delta k_{\text{DFG}}$  分别为和频与差频过程中的相位失配； $\Lambda$  为 PPLN 波导的极化周期。

仿真基于 MATLAB 软件计算完成，针对(2)式的耦合方程组，采用分步傅里叶算法和有限差分法进行求解。其中 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 ( $d_{\text{eff}} = d_{33} \times 2/\pi$ ) 为 17.2 pm/V。波导长度为 30 mm，有效作用面积为  $50 \mu\text{m}^2$ 。输入信号光 A、B、clock1 和 clock2 信号均是脉冲宽度为 2.5 ps、速率为 40 Gbit/s、峰值功率为 1 W 的高斯脉冲序列信号，四路光波的波长分别为 1550, 1538, 1562, 1568 nm。因此，PPLN1、PPLN2、PPLN3 的准相位匹配波长分别为 1556, 1550, 1565 nm。输入到 PPLN1、PPLN2、PPLN3 的抽运光波长分别为 1567, 1561, 1555 nm。信号光 A、B 和抽运光的峰值功率分别为 1000 mW,  $1000 \times \lambda_A/\lambda_B$ , 100 mW。不考虑各波导接头的插入损耗，而且认为各波导参与和频的两束光波无相对时间差。

单波长输出全光逻辑或门的各路信号的波形如图 4 所示，其中称  $\bar{A}$  和  $\bar{A}\bar{B}$  为过程信号。由图可见，

基于 PPLN 波导级联结构的单波长输出全光逻辑或门得到了很好的实现。逻辑为  $\bar{A}\bar{B}$  的输出信号光是经过了三个 PPLN 波导的级联而得到的结果，与输出光  $\bar{A}$  只通过一个波导传输的质量差别不大。由于和频过程的不充分性，参与和频过程的时钟信

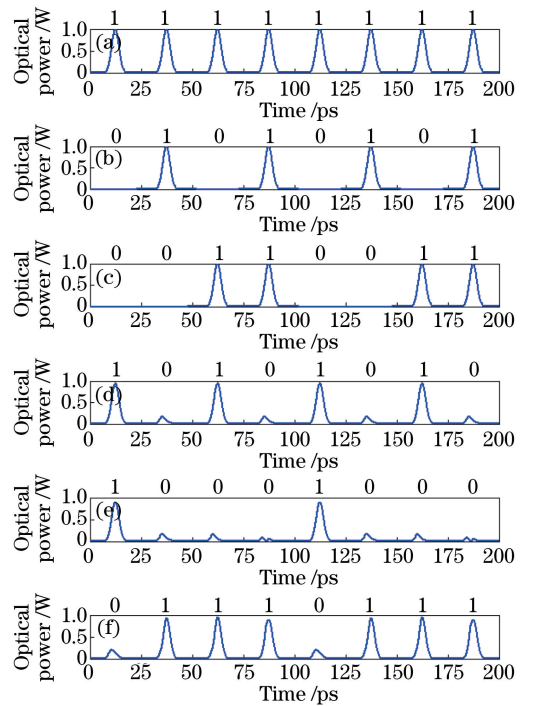


图 4 单波长全光或门的各路信号波形图。

(a) Clock1(2); (b) A; (c) B; (d)  $\bar{A}$ ; (e)  $\bar{A}\bar{B}$ ; (f)  $\bar{A}\bar{B}$

Fig. 4 Input and output waveforms for the all-optical OR gate with single wavelength.

(a) Clock1(2); (b) A; (c) B; (d)  $\bar{A}$ ; (e)  $\bar{A}\bar{B}$ ; (f)  $\bar{A}\bar{B}$

号 clock1 和信号光 A 的能量不会完全转移到和频光上,因此时钟信号 clock1 的和频剩余光波  $\bar{A}$  在 0 bit 时隙还会残留一些光功率。同样道理,光波  $\bar{A}$  的和频剩余光波  $\bar{A}\bar{B}$  以及时钟信号 clock2 的和频剩余光波  $\bar{A}\bar{B}$  在 0 bit 时隙都会残留一些光功率。即便如此,输出光  $\bar{A}\bar{B}$  的 1 bit 光功率还是远大于 0 bit 的光功率,因此对或门的逻辑功能并无影响。

单波长输出全光逻辑或门的各路信号的眼图如图 5 所示。消光比 ( $R_E$ ) 的定义为  $R_E = 10\lg(\mu_1/\mu_0)$ ,

其中  $\mu_1$  和  $\mu_0$  为在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。根据前面的分析,由于输出光  $\bar{A}\bar{B}$  的 0 bit 光功率比其过程信号的 0 bit 光功率要高,因此输出光  $\bar{A}\bar{B}$  的消光比为 6.3 dB,要比其过程信号稍低一些, $\bar{A}$ 、 $\bar{A}\bar{B}$  的消光比分别为 7.8 dB 和 8.9 dB。由于输出光  $\bar{A}\bar{B}$  是时钟信号 clock2 的和频剩余光波,故其脉冲宽度没有发生变化,峰值功率也无延迟。

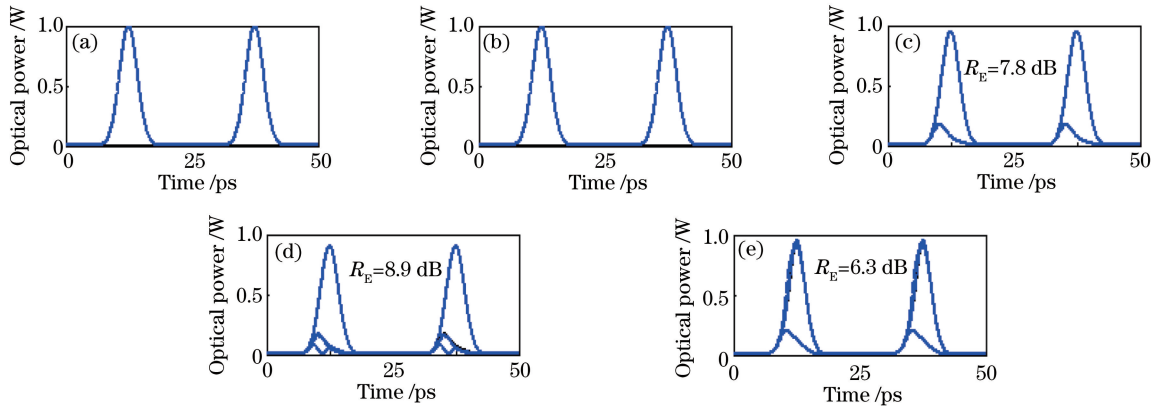


图 5 单波长全光或门的各路信号眼图。(a) A; (b) B; (c)  $\bar{A}$ ; (d)  $\bar{A}\bar{B}$ ; (e)  $\bar{A}\bar{B}$

Fig. 5 Eye diagrams for the all-optical OR gate with single wavelength. (a) A; (b) B; (c)  $\bar{A}$ ; (d)  $\bar{A}\bar{B}$ ; (e)  $\bar{A}\bar{B}$

## 5 结 论

在基于 PPLN 波导的 SFG+DFG 全光逻辑信号处理的理论基础上,提出了单波长输出全光逻辑或门的设计方案,该方案是利用三个 PPLN 波导的级联来实现的。首先对或门的逻辑功能进行分析,得到只含有与和非逻辑运算的表达式。然后利用三个波导级联的方式实现单波长输出逻辑或门的逻辑功能。最后通过数值仿真得到基于 PPLN 波导的单波长输出全光逻辑或门的各路信号的波形图和眼图,计算并分析了消光比、脉冲宽度以及峰值功率的延迟时间等指标。分析结果表明,本方案能够实现或门的逻辑功能,并保证了输出信号质量,且输出光波为单波长,因此该或门输出光波不必转换到电域而能在光域直接被使用,可改善光逻辑器件的衔接,提高处理速度,并为研发新型全光逻辑器件提供实验基础。

## 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 Communications, 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 S W. All-optical fiber communication network [M]. Beijing: Science Press, 2004: 8-20.

杨淑雯. 全光光纤通信网[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 8-20.

[3] 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.

[4] Kaur S, Kaler R S, Kamal T S. All-optical binary full adder using logic operations based on the nonlinear properties of a semiconductor optical amplifier[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2015, 19(3): 222-227.

[5] Jiang S L, Wu B J, Sun F, *et al.* Reshaping characteristics of multilevel all-optical amplitude regenerators[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(5): 052303.

- 蒋尚龙, 武保剑, 孙凡, 等. 多电平全光幅度再生器的整形特性[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(5): 052303.
- [6] Yin Y, Yu Z H. Performance optimization of all-optical clock recovery based on F-P cavity by using chirped grating filter[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(11): 110602.
- 殷宇, 余震虹. 啁啾光栅对基于 F-P 腔全光时钟恢复性能的优化[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11): 110602.
- [7] Liu T. Investigation of quasi-phase matching technology its applications [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009: 9-10.
- 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: 9-10.
- [8] Shen J, Yu S, Gu W Y, *et al.* Optimum design for 160-Gb/s all-optical time-domain demultiplexing based on cascaded second-order nonlinearities of SHG and DFG[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, 45(6): 694-699.
- [9] Cui J. Research on conversion characteristics of aperiodically poled LiNbO<sub>3</sub> based all-optical wavelength conversion [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- 崔洁. 基于非均匀周期结构 PPLN 晶体的全光波长转换器的特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [10] Tang Y B, Chen Y P, Jiang H W, *et al.* Proposal for simultaneous all-optical AND, NOR, XNOR logic gates using QPM cascading nonlinear effects in two PPLNs[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(6): 061901.
- [11] Wang J R, Duan Z L, Zhou Z X. Analysis of all-optical switching in PPLN waveguide with phase-mismatched condition [J]. *World Sci-Tech R&D*, 2009, 31(6): 1082-1084.
- 王锦仁, 段兆丽, 周忠祥. 准相位匹配 PPLN 波导全光开关特性研究[J]. 世界科技研究与发展, 2009, 31(6): 1082-1084.
- [12] Wei X B, Peng Y F, Wang W M, *et al.* High-power MgO:PPLN optical parametric oscillator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(5): 1447-1450.
- 魏星斌, 彭跃峰, 王卫民, 等. 高功率 MgO:PPLN 光参变振荡器[J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1447-1450.
- [13] Wang J, Sun J Q, Sun Q Z. Single-PPLN-based simultaneous half-adder, half-subtractor, and OR logic gate: proposal and simulation [J]. *Optics Express*, 2007, 15(4): 1690-1699.
- [14] Bogoni A, Wu X 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[C]//34th European Conference on Optical Communication, 21-25 Sept., 2008, Brussels, Belgium. New York: IEEE, 2008: 1-2.
- [15] Bogoni A, Wu X X, Fazal I, *et al.* 160 Gb/s time-domain channel extraction/insertion and all-optical logic operations exploiting a single PPLN waveguide [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(19): 4221-4227.
- [16] Wang J, Sun J Q, Sun Q Z. Proposal for all-optical switchable OR/XOR logic gates using sum-frequency generation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(8): 541-543.
- [17] 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.