

基于 PPLN 波导的全光译码器的设计与研究

申静, 林杨*

(沈阳工业大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110870)

摘要: 随着互联网的发展, 网络数据流量极速增长, 全光网(AON)概念的提出有利于解决可用带宽受限、信号传输速率较低等问题。其中, 全光逻辑信号处理为 AON 的重要组成部分。根据周期性极化钽酸锂(PPLN)波导的二阶非线性效应原理, 将产生的输出信号连续送入不同的 PPLN 波导进行叠加处理, 设计出全光 2 线-4 线译码器的波导级联结构, 通过数值计算仿真得到了波形图和眼图, 分析了全光 2 线-4 线译码器输出信号的半高全宽(FWHM)、峰值功率、延迟时间和消光比。仿真结果表明: 采用 PPLN 波导级联的方式实现了 2 线-4 线译码器在光域中的逻辑功能, 同时保证了光信号的传输质量, 为 PPLN 波导的全光信号处理提供了新的器件类型。

关键词: 光逻辑器件; 全光 2 线-4 线译码器; 波导级联; 周期性极化钽酸锂波导; 全光信号处理

中图分类号: TN911.74 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)02-0037-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.02.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design and investigation of all-optical decoder based on PPLN waveguides

SHEN Jing, LIN Yang*

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

Abstract: With the development of the internet, network data traffic is increasing rapidly, the concept of all-optical network (AON) is helpful to solve the problems of limited available bandwidth and low signal transmission rate. Among them, all-optical logic signal processing is an important part of AON. According to the principle of second order nonlinear effect of periodically poled lithium niobate (PPLN) waveguide, the output signal is successively sent to different PPLN waveguides for superposition processing, and the waveguide cascade structure of all-optical 2-4 line decoder is designed. The waveforms and eye diagrams are obtained by numerical calculation and simulation, and the full width half maximum (FWHM), peak power, delay time, extinction ratio of the output signal of all-optical 2-4 line decoder are analyzed. The results show that the logic function of 2-4 line decoder in optical domain is realized by cascading PPLN waveguides, and the transmission quality of optical signal is guaranteed, which provides a new device type for all-optical signal processing of PPLN waveguide.

Key words: optical logic devices; all-optical 2-4 line decoder; waveguide cascade; periodically poled lithium niobate waveguide; all-optical signal processing

0 引言

在高速的信息化时代, 为实现高速率、大容量的通信方式而提出的全光网(AON)概念, 已成为目前的研究热点。其中, 全光信号处理是 AON 的重要组成部分

收稿日期: 2019-07-21。

作者简介: 申静(1984-), 男, 博士, 讲师。研究方向是光纤通信中的全光信号处理, 包括全光波长变换、全光时域解复用和全光逻辑信号处理等。在全光加法器方面有较多的研究心得体会。曾在 SCI 检索发表了基于 PPLN 波导的全光逻辑信号处理方面的论文。

* 通信作者: 林杨(E-mail: 1587194657@qq.com)。



分, 在全光信号处理中全光逻辑信号处理对光信号的编码、译码和优先选择等方面有着重要意义。

周期性极化钽酸锂(PPLN)波导是一种具有效率高、损耗低、体积小和便于集成等优点的非线性光学晶体, 广泛应用于光参量振荡^[1]、全光逻辑信号处理^[2]等领域。比如申静等人利用 PPLN 波导的二阶非线性光学效应, 将光信号连续经过多个不同的 PPLN 波导进行叠加处理, 实现了全光 2 选 1 数据选择器^[3]、全光数值比较器^[4]这 2 种复杂的光逻辑器件。全光译码器是全光逻辑信号处理中必不可少的器件, 目前对于全光译码器的研究主要有: 周浩强等人基于光纤延时线

实现了光编/解码器^[5],但光纤需要在一定的作用长度下才能产生较好的非线性效应,体积较大。胡越等人利用半导体光放大器(SOA)的交叉增益效应(XGM)实现了光译码器^[6],但 SOA 的噪声及串扰较大、载流子恢复缓慢、工作速率难以提升且与光纤的耦合损耗较高,不宜在更高速的系统中使用。这两者都未能实现译码器使能端 E 的功能。PPLN 波导与以上两者相比,在体积、效率和噪声等方面更具优势,同时还可完善译码器的功能。本文利用单个 PPLN 波导和频+差频效应(SFG+DFG)的基本原理,扩展 PPLN 波导的级联结构,实现全光 2 线-4 线译码器的逻辑功能。

1 基于单个 PPLN 波导的全光逻辑运算基本原理

利用单个 PPLN 波导实现光逻辑门时为了保证 SFG+DFG 能够有效进行,要求同时输入到 PPLN 波导中的二进制脉冲信号 A、B 的传输速率、峰值功率必须相同,二者波长分别用 λ_A 、 λ_B 表示,在和频准相位匹配(QPM)条件下^[7],A 光子与 B 光子发生 SFG 产生波长为 $\lambda_{SF}=1/(1/\lambda_A+1/\lambda_B)$ 的和频光 SF,同时在输入端注入一束波长为 λ_P 的连续泵浦光 Pump(λ_P),用来与 SF 在差频准相位匹配条件下发生 DFG 产生波长为 $\lambda_C=1/(1/\lambda_{SF}-1/\lambda_P)$ 的差频输出光 C。

A、B 光子在 QPM 条件下结合产生 SF 光子,SF 光子也可通过分解产生 A、B 光子,此过程是互逆的。总体来说,A、B 结合产生的 SF 光子远远多于 SF 分解的光子,但信号光 A、B 不可能被完全消耗掉,会有一定的剩余光波。发生 DFG 的条件较为简单,只要满足和频准相位匹配即可满足差频准相位匹配。同样,SF 光子在泵浦光光子的刺激下,可分解出泵浦光光子以及 C 光子,此过程也是互逆的,但此过程中结合产生的 SF 光子个数远远小于 SF 分解出来的光子个数。DFG 通过消耗 SF 光子促使了 SFG 能够充分进行,从而减小了和频剩余光波的光功率,提高了消光比的比值,提升了逻辑器件的信号质量。能量总体上是由 2 束输入信号光传递给和频光进而传递给差频输出光的。最后输出端会包含多路光波,如和频光 SF、泵浦光、差频输出光 C 以及信号光 A、B 的和频剩余量。利用光滤波器(BPF)选择性地过滤出三者。以上过程如图 1 所示。

当信号光 A、B 都没有光功率时,不存在能量传递,无法发生 SFG 即没有 SF 产生,进而无法发生 DFG 也没有 C 产生,3 路光波的数字逻辑均为 0;当 A、B 只有一路信号存在光功率时,同样无法发生 SFG+DFG,

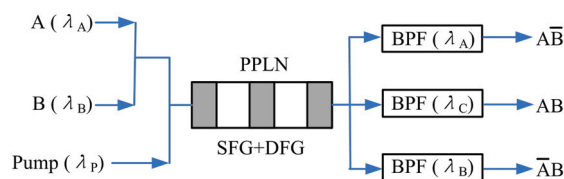


图 1 单个 PPLN 波导的全光逻辑运算原理图

没有 SF 及 C 产生。A、B 中存在光功率的一路信号为逻辑“1”,C 与另一路信号相同均为逻辑“0”;当 A、B 都有光功率时,可以在 QPM 条件下发生 SFG 产生 SF。SF 再与连续泵浦光发生 DFG 产生 C。此时,C 由于 A、B 及 SF 的能量传递,产生光功率,逻辑为“1”。若 SFG 充分产生,则 A、B 这 2 路信号的和频剩余光功率很小,逻辑为“0”。C 光子只有在 A、B 光子同时存在的情况下才可以产生,因此用逻辑“与”AB 表示。A、B 光波的和频剩余量分别用 $\overline{AB}$ 、 $\overline{AB}$ 表示。文献[8,9]利用 PPLN 波导的上述原理实现了全光全加器^[8]、全光优先编码器^[9]等复杂的全光逻辑器件。

2 全光 2 线-4 线译码器的设计方案

译码器为编码器的逆过程,是将输入信号经过编码器编排后得到的代码“翻译”过来,形成相应输出代码的逻辑器件。全光 2 线-4 线译码器采用 2 路二进制原码输入,对应有 4 路译码输出,真值表如表 1 所示。采用高电平有效的译码器,对应于每一种输入代码,输出只能有一个为 1,其余全为 0。同时,全光 2 线-4 线译码器存在一个使能端 E 具有扩展输入变量数、引入开关的功能。当输入信号发生错误时,可以用使能端 E 控制光器件中断工作。

表 1 译码器真值表

使能端 E	输入端		输出端			
	A ₁	A ₀	Y ₀	Y ₁	Y ₂	Y ₃
1	×	×	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	1	0	0
0	1	0	0	0	1	0
0	1	1	0	0	0	1

译码器在 E=1 时禁止工作,无论输入信号光为多少,输出信号光 Y₀、Y₁、Y₂、Y₃ 均为 0。译码器在 E=0 情况下正常工作,当 A₁A₀=00 时,输出信号光 Y₀=1,其余全为 0;当 A₁A₀=01 时,输出信号光 Y₁=1,其余全为 0;当 A₁A₀=10 时,输出信号光 Y₂=1,其余全为 0;当 A₁A₀=

11 时, 输出信号光 $Y_3=1$, 其余全为 0。因此, 译码器输出信号的逻辑表达式为:

$$\begin{cases} Y_0 = \overline{E} \overline{A_1} \overline{A_0} \\ Y_1 = \overline{E} \overline{A_1} A_0 \\ Y_2 = \overline{E} A_1 \overline{A_0} \\ Y_3 = \overline{E} A_1 A_0 \end{cases} \quad (1)$$

基于单个 PPLN 波导的 SFG+DFG 原理可知其能够实现的逻辑运算十分单一, 不能实现式(1)的逻辑关系, 所以需要采用波导级联的方式^[3]。在级联的过程中, 需要保证输入到同一波导中的 2 路信号光的比特率和峰值功率相同, 且这 2 路信号光的波长与此波导的准相位匹配波长相对应, 保证此波导中的二阶非线性效应能够有效进行。

本文采用波导级联方式首先是为了能够同时得到“与门”、“与非门”和“异或门”的逻辑输出信号, 并且将它们作为输入信号分别输入到相应的波导中, 进而同时得到 4 路输出信号。其次是为了保证 4 路输出光波都属于和频剩余光波的形式, 因为和频剩余光波本质上与输入光相同(比特率相同, 峰值功率相近), 将其作为光逻辑器件的输出可以保证信号的传输质量。而对比输入信号, 差频输出光的峰值功率损耗较大, 传输质量不佳, 不宜使用。

全光 2 线-4 线译码器的 PPLN 波导级联结构如图 2 所示。在 PPLN1 波导中同时注入信号光 A_1 、时钟信号 clock 与连续泵浦光 P_1 (为简化图中省略了连续泵浦光 $P_1 \sim P_7$), 在 QPM 条件下(每个 PPLN 波导的输入信号都应满足 QPM), 发生 SFG+DFG, 生成和频剩余光波 $\overline{A_1}$; 然后将 A_0 、 $\overline{A_1}$ 与连续泵浦光 P_3 输入到 PPLN3 波导中, 发生 SFG+DFG 生成和频剩余光波 $A_1 A_0$ 及 $\overline{A_1} \overline{A_0}$ 。为了能够同时得到 4 路输出信号需要将信号光 A_1 、 A_0 与连续泵浦光 P_2 输入到 PPLN2 波导中, 发生 SFG+DFG, 生成和频剩余光波 $A_1 \overline{A_0}$ 及 $\overline{A_1} A_0$ 。最后将这 4 路和频剩余光波 $\overline{A_1} \overline{A_0}$ 、 $\overline{A_1} A_0$ 、 $A_1 \overline{A_0}$ 和 $A_1 A_0$ 分别与 E 及连续泵浦光 P_5 、 P_7 、 P_6 和 P_4 输入到 PPLN5、PPLN7、

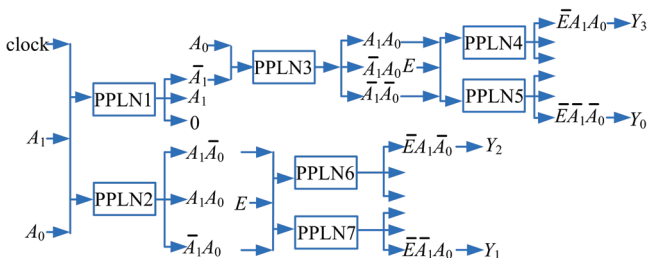


图 2 全光 2 线-4 线译码器的波导级联结构图

PPLN6 和 PPLN4 波导中, 在 QPM 条件下发生 SFG+DFG, 分别生成和频剩余光波 $\overline{E} \overline{A_1} \overline{A_0}$ 、 $\overline{E} \overline{A_1} A_0$ 、 $\overline{E} A_1 \overline{A_0}$ 和 $\overline{E} A_1 A_0$, 即输出信号 Y_0 、 Y_1 、 Y_2 和 Y_3 , 对应式(1)的 4 路输出信号。

3 仿真结果及性能

PPLN 波导所具有的非线性特性使波导中各类光子之间通过相互作用, 在 QPM 条件下发生 SFG+DFG, 产生出不同于输入光的光子, 从而生成不同频率的电磁波。这一过程符合电磁现象的一般规律, 从而得到各路光波在波导中的波动方程。然后根据 PPLN 波导的折射率与波长的经验关系^[10] 确定各路光波的折射率, 推导出 PPLN 波导中光波 A、B、SF、P 和 C 的耦合波方程组依次为式(2)~式(6)所示:

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

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

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

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

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

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

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

$$\Delta k_{\text{SFG}} = k_{\text{SF}} - k_A - k_B - \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (9)$$

$$\Delta k_{\text{DFG}} = k_{\text{SF}} - k_P - k_C - \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (10)$$

其中, E_j ($j=A, B, \text{SF}, P, C$) 分别为信号光 A、B、SF、P 和 C 的光场强度; β_{1j} 、 β_{2j} 为波矢 k_j 对频率 ω_j 的一阶、二阶导数; α_j 为所选 PPLN 波导的损耗系数; k_{SFG} 、 Δk_{SFG} 及

k_{DFG} 、 Δk_{DFG} 分别为和频及差频过程的耦合系数、相位失配因子; * 表示共轭; d_{eff} 为有效非线性系数; $\mu_0=4\pi\times 10^{-7}$ H/m; $c=3\times 10^8$ m/s; n_j 为各路光波的折射率; A_{eff} 和 Λ 分别为波导的有效作用面积和极化周期。在仿真中,应该使 SFG 和 DFG 都满足 QPM。SFG 对 QPM 的条件要求较高,在仿真中应优先使 $\Delta k_{\text{SFG}}=0$,当 SFG 满足 QPM 条件时 DFG 也基本满足 QPM 条件,即 $\Delta k_{\text{DFG}}\approx \Delta k_{\text{SFG}}=0$ 。

本方案设定每个 PPLN 波导的长度均为 30 mm, A_{eff} 均为 $50\text{ }\mu\text{m}^2$,非线性系数 d_{33} 均为 27 pm/V, $d_{\text{eff}}=d_{33}\times 2/\pi=17.2$ pm/V。输入信号光 A_1 、 A_0 、clock 和 E 的传输速率均为 40 Gb/s,峰值功率均为 1000 mW,波长分别为 1550 nm、1538 nm、1568 nm 和 1562 nm,因此 PPLN1~PPLN7 对应的准相位匹配波长分别为 1559 nm、1544 nm、1553 nm、1550 nm、1565 nm、1556 nm 和 1550 nm。设定输入到 PPLN1~PPLN7 中连续泵浦光的峰值功率均为 100 mW,波长分别为 1569 nm、1554 nm、1563 nm、1560 nm、1575 nm、1566 nm 和 1560 nm。

本文在 Matlab 环境中基于上述的数值设定,采用分布傅里叶算法和有限差分法对式(2)~式(6)进行求解。信号光 A_0 、 A_1 分别在 E 为 0、1 的 2 种情况下,取遍 2 路输入光波可能出现的全部逻辑状态。全光 2 线-4 线译码器的各信号波形如图 3 所示。图中过程信号 A_1A_0 、 $\overline{A_1A_0}$ 、 $A_1\overline{A_0}$ 和 $\overline{A_1}\overline{A_0}$ 以及输出信号 Y_0 、 Y_1 、 Y_2 和 Y_3 逻辑 1 时隙的峰值功率与输入信号的峰值功率十分接近,逻辑 0 时隙的峰值功率也比较小。仿真结果表明:基于 PPLN 波导的全光 2 线-4 线译码器方案可以实现译码器的逻辑功能。

图 3 中,信号 $\overline{A_1}\sim Y_3$ 的波形图中一些 0 bit 时隙存在一定的功率,这是由于 SFG 发生不完全,2 束输入信号光没有全部转换成和频光,存在一定的剩余量,因此图中部分 0 bit 时隙存在的微小功率无法完全消除。 $\overline{A_1A_0}$ 的第四个和第八个 0 bit 时隙的光功率明显比大多数其它 0 bit 时隙更小,这是由于信号光 $\overline{A_1A_0}$ 是由过程信号 $\overline{A_1}$ 与 A_0 发生 SFG+DFG 所产生的和频剩余光波,而 $\overline{A_1}$ 的第四个和第八个 0 bit 时隙仍存在少量的功率,因此这部分功率在与 A_0 发生 SFG+DFG 时会进一步损耗。信号 Y_0 、 Y_1 、 Y_2 和 Y_3 波形图的部分 0 bit 时隙也同理。

全光译码器的各信号眼图如图 4 所示。消光比 $R_E=10\lg(\mu_1/\mu_0)$, μ_1 与 μ_0 分别为光信号采样点逻辑 1 与逻辑 0 峰值功率的平均值。由计算结果可知,输出

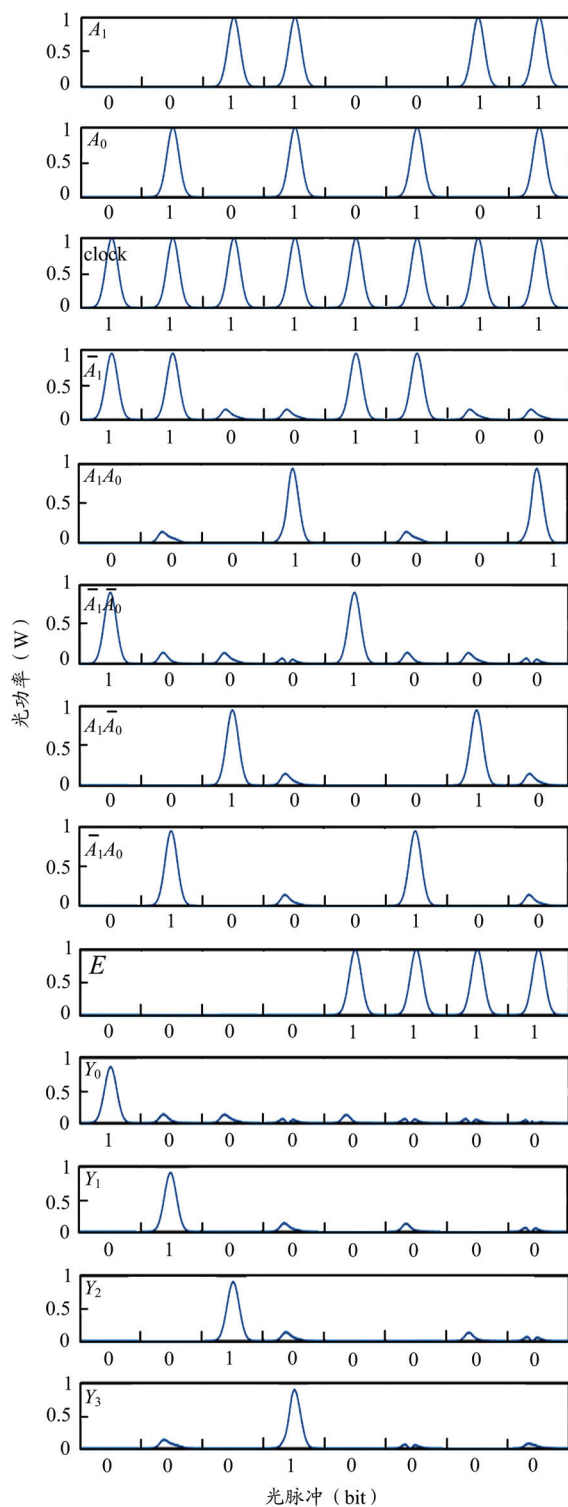


图 3 全光 2 线-4 线译码器的各路信号波形图

信号 Y_0 、 Y_1 、 Y_2 和 Y_3 的 R_E 值分别为 10.1、9.02、8.9、9.7。

由于 4 路输入信号光的 FWHM、峰值功率相同,所以下列子图中仅显示输入信号光 A_1 的眼图。由眼图可知输出信号 Y_0 、 Y_1 、 Y_2 和 Y_3 的 FWHM 分别为 4.1 ps、

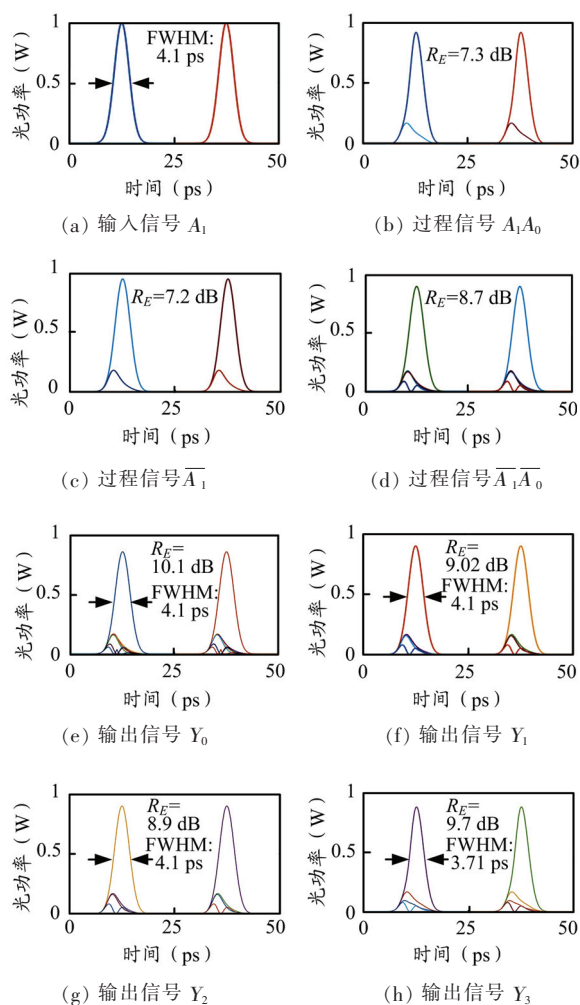


图4 全光2线-4线译码器各信号的眼图

4.1 ps、4.1 ps 和 3.71 ps。 Y_0 、 $\overline{A_1 A_0}$ 、 $\overline{A_1}$ 依次为 $\overline{A_1 A_0}$ 、 $\overline{A_1}$ 和 clock 的和频剩余光波, 所以眼图中这 4 种信号的 FWHM 都为 4.1 ps。 Y_1 与 Y_2 同理。输入信号光 clock 的和频剩余光波的每一时隙都有光功率, 而其它信号则与之不同, 所以 $\overline{A_1}$ 的 0 bit 时隙在与 A_0 发生 SFG+DFG 时会对 A_0 有更多的消耗, 所以 A_0 的和频剩余光波 $A_1 A_0$ 相对于输入信号来说脉冲发生了收缩, FWHM 为 3.71 ps。同时输出信号 Y_3 为 $A_1 A_0$ 的和频剩余光波, 它的 FWHM 与 $A_1 A_0$ 相同也为 3.71 ps。由于本

方案采用高电平有效, 对于任意一种输入状态 4 路输出信号中只有 1 路输出信号为逻辑 1, 不存在延迟。由计算结果可以看出, 本方案在实现了全光 2 线-4 线译码器逻辑功能的基础上, 保证了输出信号的质量。

4 结束语

针对译码器的工作原理, 本文提出了采用 PPLN 波导级联的方法设计出全光 2 线-4 线译码器的波导级联结构。在 Matlab 中运用分布傅里叶算法和有限差分法计算信号的耦合波方程并进行仿真, 得到了全光译码器的波形图和眼图。再将全光译码器输出信号的 R_E 值、峰值功率、FWHM 和延迟时间进行分析, 证明了本方案可在保证光信号传输质量的基础上实现传输速率为 40 Gb/s 的全光 2 线-4 线译码器的逻辑功能, 为 PPLN 波导的全光信号处理提供了新的器件类型。

参考文献:

- [1] 邢爽, 于永吉, 王宇恒, 等. 基于多周期 MgO:PPLN 的内腔宽调谐连续中红外光参量振荡器[J]. 光子学报, 2018, 47(6): 1-9.
- [2] 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): 1-4.
- [3] 申静, 秦晋. 基于 PPLN 波导的全光数据选择器的设计与研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 1-7.
- [4] 申静, 秦晋. 基于 PPLN 波导的全光数值比较器的设计[J]. 光通信研究, 2018(1): 43-47.
- [5] 周浩强, 刘国驷, 马君显. 光纤延迟线编/解码器的研究[J]. 光通信技术, 2000(1): 50-53.
- [6] 胡越, 李培丽. 基于 SOA 中 XGM 效应的全光译码器的研究[J]. 光通信研究, 2011(2): 33-35, 56.
- [7] 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.
- [8] 申静. 基于 PPLN 波导的全光数字信号处理研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2012.
- [9] 童艳, 李晶晶, 李丹. 基于 PPLN 波导的全光 4 线-2 线优先编码器[J]. 光电子·激光, 2019, 30(2): 117-122.
- [10] JUNDT D H. Temperature-dependent Sellmeier equation for the index of refraction, n_e , in congruent lithium niobate [J]. Optics Letters, 1997, 22(2): 1553-1555.

2020 年《光通信技术》月刊征订启事

邮发代号: 48-126

定 价: 16 元/册; 192 元/年

订 阅: 全国各地邮局

为增强读者的阅读舒适感, 从 2019 年起, 《光通信技术》全刊采用铜板纸彩色印刷。