

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0026-07

# 利用光纤参量放大器构成全光与门

桂 林<sup>1</sup> 周志彬<sup>1</sup> 邵宇丰<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 湖南师范大学物理与信息科学学院, 湖南 长沙 410081; <sup>2</sup> 湖南大学计算机与通信学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要** 利用光纤参量放大器(FOPA)中的波长转换特性完成全光与逻辑运算。以波长转换的原理为基础,从两路输入光波的四种码字组合的相位匹配关系入手,证明了 FOPA 的闲散光输出与两路输入光波的逻辑关系符合与门的逻辑。通过龙格-库塔方法数值求解非线性耦合方程组,仿真证实了 FOPA 的输出与输入光波满足全光与门的逻辑,研究了此全光与逻辑门闲散光波的输出功率随光纤长度、输入光波的功率比值以及输入光波波长位置的变化关系,为实际中优化设计全光与门提供了参考。并对 100 Gb/s 的全光与逻辑运算中所应选择的输入光波脉冲宽度的问题进行了讨论。

**关键词** 非线性光学; 光纤参量放大器; 全光信号处理; 四波混频; 全光与门; 交叉增益调制

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200835s2.0026

## All Optical AND Gate by Utilizing Fiber Optical Parametric Amplifier

Gui Lin<sup>1</sup> Zhou Zhibin<sup>1</sup> Shao Yufeng<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Physics and Information Science, Hunan Normal University, Changsha, Hunan 410081, China)  
(<sup>2</sup> School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

**Abstract** The all optical AND logical operation using the wavelength conversion in the fiber optical parametric amplifier (FOPA) is completed. The logical relation between idler output and two input optical waves in the FOPA is proved through the principle of wavelength conversion and the phase match condition for four types of code word in two input optical waves. By solving nonlinear coupled equations numerically utilizing Runge-Kutta method, the all optical AND logical relation between output and two input optical waves in the FOPA is verified numerically, then the output power of idler in this all optical AND logic gate influenced by fiber length, the power ratio of two input optical waves and the values of two input wavelengths is investigated. These results are conducive to the optimized design of all optical AND logic gate in practice. The selection for the width of input optical pulse in 100Gbit/s all optical AND logical operation is discussed.

**Key words** nonlinear optics; fiber-optic parametric amplifier; all-optical data processing; four wave mixing; all optical AND gate; cross gain modulation

## 1 引 言

近年来,随着光纤通信技术的发展,光网络系统的容量不断增大,各种功能强大的光器件不断涌现。为了增强光网络的智能,使其不仅能够传输 Tbit 级的信息,而且还能够直接对光信号进行处理,人们在全光信号处理器件的研究中倾注了大量精力。不少研究者根据光网络的需要,提出了许多全光波长转换器与全光逻辑门的实现方案,这些方案的某些指标已经达到了实用的要求。全光逻辑器件对于迫切

需要智能光信号处理的全光网络至关重要,例如光分组交换网络中的光包头识别。而全光逻辑器件的核心就是全光与门、全光或门和全光非门三种基本的全光逻辑门。如果有了便于集成、低成本、且能够快速处理一定速率、一定格式光信号的三种基本全光逻辑门,全光网络中的许多操作就可以利用一系列基本全光逻辑门的某种联结准确而快速地实现。

目前,实现全光逻辑门时主要利用光在不同材料中的二阶或三阶非线性效应。周期极化反转铌酸

**基金项目:** 湖南师范大学青年基金(10705,060612)资助课题。

**作者简介:** 桂 林(1981—),男,讲师,主要从事光通信器件、全光信号处理、光纤参量放大等方面的研究。

E-mail: guilin100@sina.com.cn

锂(PPLN)波导利用了铌酸锂晶体中较强的二阶非线性,主要包括倍频(SHG)、和频(SFG)、差频(DFG)<sup>[1]</sup>,或通过级联的二阶非线性实现全光逻辑。例如,利用级联和频与差频(SFG+DFG)实现全光“与门”和“与非门”<sup>[2,3]</sup>。半导体光放大器(SOA)和光纤型器件实现的全光逻辑,则利用了光在这些介质中的三阶非线性过程。一些研究者利用 SOA 中的交叉增益调制(XGM)和四波混频(FWM)效应实现了“与”和“同或”等全光逻辑<sup>[4,5]</sup>。

由于光纤型器件属于光无源器件,也具有三阶非线性效应,同时存在着与 SOA 类似的 XGM 和 FWM 效应,且这些非线性效应的响应度为飞秒量级,因此它具有快速完成全光逻辑的潜力。光子晶体光纤(PCF)的出现与改进推动了光纤参量放大器(FOPA)等新型光器件的发展<sup>[6]</sup>,PCF 中较强的非线性和可控的色散特性不仅能够实现高增益、大带宽的光放大,而且可以在全光信号处理中找到应用的场合<sup>[7~11]</sup>。最近,D. M. F. Lai 等在实验中利用 FOPA 构成了全光逻辑单元,通过调节高非线性色散位移光纤(HNL-DSF)中 XGM 效应的强弱,实现了 10 Gb/s 信号光的“异或”、“或”和“非”全光逻辑,而利用其中的 FWM 效应又实现了 10 Gb/s 信号光的“与”逻辑<sup>[12]</sup>。由于 FOPA 中的 XGM 和 FWM 效应与诸多因素有关<sup>[13]</sup>,因此实现上述全光逻辑需要选择恰当的参数,D. M. F. Lai 等虽然在实验中实现了利用 FOPA 构成的全光与门,但是没有对 FOPA 的相关参数对全光逻辑门性能的影响进行详

细的理论分析。而目前国内外利用 FOPA 进行全光信号处理的研究刚起步,这方面的理论分析不多。本文给出 FOPA 构成全光“与”门的模型,从相位匹配的角度证明利用 FWM 进行波长转换的 FOPA 具有全光“与”门的特性,研究了光纤长度、输入光功率比值以及输入光波长对全光与逻辑门性能的影响,并对 100 Gb/s 的全光与逻辑门中的问题进行了讨论。

## 2 基本模型与原理分析

利用 FOPA 构成全光与门的示意图如图 1 所示,a 和 b 两路光电调制后的光信号经过耦合注入到一段 HNL-DSF 当中,可以看作逻辑门的两个输入,HNL-DSF 中发生的 FWM 效应产生闲散光,再利用光滤波器可以得到闲散光波长处的光波,光信号最终从 c 端输出,作为逻辑门的输出<sup>[12]</sup>。由于 HNL-DSF 中发生的 FWM 效应属于参变过程,可以将整个装置看作一个 FOPA。输入端的 a 和 b 可以看作抽运光和信号光,全光“与”逻辑输出信号产生的实质是,利用 FOPA 中的 FWM 进行波长转换,在 c 端输出闲散光。假设波长转换过程中抽运光、信号光和闲散光都为线偏振,且偏振方向相同,不考虑参量放大过程中的受激拉曼散射和反向回波的受激布里渊散射的影响。整个过程与单抽运光 FOPA 中的信号光放大同时进行,可以由如下一组非线性耦合方程描述<sup>[13]</sup>。

$$\frac{dA_a}{dz} = -\frac{\alpha}{2}A_a + i\gamma\{[|A_a|^2 + 2(|A_b|^2 + |A_c|^2)]A_a + 2A_bA_cA_a^* \exp(i\Delta\beta_D z)\}, \quad (1)$$

$$\frac{dA_b}{dz} = -\frac{\alpha}{2}A_b + i\gamma\{[|A_b|^2 + 2(|A_a|^2 + |A_c|^2)]A_b + A_a^2A_c^* \exp(-i\Delta\beta_D z)\}, \quad (2)$$

$$\frac{dA_c}{dz} = -\frac{\alpha}{2}A_c + i\gamma\{[|A_c|^2 + 2(|A_a|^2 + |A_b|^2)]A_c + A_a^2A_b^* \exp(-i\Delta\beta_D z)\}, \quad (3)$$

式中  $\alpha$  为光纤的损耗系数,  $A_j(t)$  ( $j = a, b, c$ ) 为抽运光(a)、信号光(b)、闲散光(c)波的复振幅,可看作随时间变化的函数。 $z$  为传输距离,  $\gamma$  为光纤的非线



图 1 FOPA 构成全光与门的原理图

Fig. 1 Principle figure of all optical AND gate constructed by FOPA

性系数。 $\lambda_0$  为光纤的零色散波长,暂不考虑  $\lambda_0$  的值随光纤的波动。 $\lambda_a$  为抽运光的波长,  $\lambda_b$  为信号光的波长,  $\lambda_c$  为闲散光的波长。整个模型没有考虑光波色散对波形的影响,这是由于 FOPA 中非线性效应较强的原因。

由光纤参量放大中三个光波角频率之间的基本关系:

$$\omega_b - \omega_a = \omega_a - \omega_c, \quad (4)$$

可得三个波长满足如下条件:

$$\frac{2}{\lambda_a} = \frac{1}{\lambda_b} + \frac{1}{\lambda_c}, \quad (5)$$

$\Delta\beta_D$  为群速度色散引起的相位失配,其表达式为:

$$\Delta\beta_D = \beta_b(\omega) + \beta_c(\omega) - 2\beta_a(\omega) = \beta_{2a}\Omega^2 + \frac{1}{12}\beta_{4a}\Omega^4, \quad (6)$$

$\Omega$  是信号光角频率与抽运光角频率的差值,  $\Omega = \omega_b - \omega_a$ ,  $\beta_{2a}$  和  $\beta_{4a}$  分别是抽运光波长处的二阶色散和四阶色散,  $\beta_{4a}$  变化非常小,可以认为在所研究的整个波段为常数,  $\beta_{2a}$  与抽运光波长偏离零色散波长的值有关,若在实验中使得  $\lambda_a \approx \lambda_0$ , 则  $\beta_{2a} \approx 0$ ; 在抽运光波长与零色散波长稍有偏离时,  $\beta_{2a}$  可近似写成  $\beta_{2a} \approx \beta_3(\lambda_0)(\omega_a - \omega_0)$ ,  $\beta_3(\lambda_0)$  为零色散波长处的三阶色散<sup>[14]</sup>。仿真时取  $\beta_3(\lambda_0) = 0.05 \text{ ps}^3/\text{km}$ ,  $\beta_{4a} = -0.00042 \text{ ps}^4/\text{km}$ 。

在构成全光逻辑门的应用当中, a 和 b 输入光波是经过电光调制后携带电的比特流信息的连续激光, 调制方式为幅度调制, 经过波长转换后产生的 c 光波的幅值携带了“与”逻辑运算结果的信息。波长转换过程中, 三路携带信息的光波表达式为

$$A_j(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{jk} A_j(t - kT), \quad d_{jk} = 0, 1, \quad (7)$$

$j = a, b, c$

式中  $d_{jk}$  为某个光波的幅值在某个时刻携带的二进制数字信息。假设 a 和 b 光波速率相同, 且在相互作用的过程中时间上已经同步。T 为一个比特的时间间隔,  $T=1/R$ , R 为信号的比特速率。

由与门的性质可知, 只有当  $d_{ak}$  和  $d_{bk}$  同时为“1”时,  $d_{ck}$  才能为“1”, 其余情况下,  $d_{ck}$  必须全为“0”。 $d_{ck}$  为“1”意味着闲散光 c 的输出功率较大。而 c 光波的输出功率由 FOPA 中波长转换效率和 b 端的初始光功率决定。以下将证明 c 的输出功率最大时, a 和 b 端必须同时发送“1”码, 其余几种情况 c 端可以看作出现“0”码, 此装置最终具有“与”门的功能。

FOPA 中波长转换效率取决于整个参量过程的相位匹配情况, 改变 a 和 b 光波的波长, 即可调节色散引起的相位失配  $\Delta\beta_D$ , 调节 a 和 b 的输入功率, 非线性引起的相位失配  $\Delta\beta_{NL}$  也会随之变化, 总的相位失配为

$$\Delta\beta = \Delta\beta_D + \Delta\beta_{NL}, \quad (8)$$

它决定了波长转换的效率。若 a 和 b 的波长固定(一般在反常色散区域选择波长, 此时  $\Delta\beta_D < 0$ ), 无论 a 和 b 光波携带数字信息“0”还是“1”,  $\Delta\beta_D$  一直

保持恒定。而  $\Delta\beta_{NL}$  在 a 和 b 光波发送不同的“0”、“1”数字信息的组合时有所改变。假设 a 和 b 光波都发“1”码, 它们在  $kT \leq t < (k+1)T$  中的平均功率分别为  $P_{a1}$  和  $P_{b1}$ , a 和 b 光波都发“0”码, 该段时间内的平均功率分别为  $P_{a0}$  和  $P_{b0}$ 。一般情况下,

$$P_{a1} > P_{b1} > P_{a0} > P_{b0}, \quad (9)$$

而

$$\Delta\beta_{iNL} = 2\gamma P_i, \quad i = 0, 1, 2, 3 \quad (10)$$

$P_i$ 、 $\Delta\beta_{NL}$  和  $\Delta\beta_i$  分别为四种情况下光纤中的抽运光功率、非线性引起的相位失配和总的相位失配。i=0 对应 a 和 b 同时发“0”码的情况; i=1 对应 a 发“0”码而 b 发“1”码的情况; i=2 对应 a 发“1”码而 b 发“0”码的情况; i=3 对应 a 和 b 同时发“1”码的情况。

$$P_0 \approx P_{a0}, \quad P_1 \approx P_{b1} + P_{a0}, \quad P_2 \approx P_3 \approx P_{a1}, \quad (11)$$

由(9)式~(11)式可知,

$$\Delta\beta_{3NL} \approx \Delta\beta_{2NL} > \Delta\beta_{1NL} \approx \Delta\beta_{0NL}, \quad (12)$$

由(8)式、(12)式可知  $\Delta\beta_i$  (i=0, 1, 2, 3) 满足条件

$$|\Delta\beta_3| \approx |\Delta\beta_2| < |\Delta\beta_1| \approx |\Delta\beta_0|. \quad (13)$$

一般选择 a 和 b 同时发“1”码时总的相位失配  $\Delta\beta_3 \approx 0$ , 此时,  $|\Delta\beta_1|$  和  $|\Delta\beta_0|$  远大于零, 其相位匹配较 2 和 3 两种情况差。

所以 a 发“1”码时, 总的相位失配较小, 波长转换效率较高, 而 b 发“1”码时, b 端输入的初始光功率较大。假设  $\eta(\Delta\beta)$  为整个过程的波长转换效率,  $P_b(0)$  为 b 端输入的初始光功率,  $P_c(l)$  为经过 l km 光纤作用后 c 端的输出光功率。则

$$P_c(l) = P_b(0)\eta(\Delta\beta), \quad (14)$$

要想在 c 端得到最大的输出光功率, 即出现“1”码, 必须使得整个过程的波长转换效率  $\eta(\Delta\beta)$  较高, 即 a 端出现“1”码, 同时使得 b 端输入的初始光功率  $P_b(0)$  较大, 即 b 端出现“1”码。其他几种情况下, 无论是 a 发“1”码而 b 发“0”码对应的  $\eta(\Delta\beta)$  较高而  $P_b(0)$  较小的情况, 还是 a 发“0”码而 b 发“1”码对应的  $\eta(\Delta\beta)$  较低而  $P_b(0)$  较大的情况, 还是 a 和 b 同时发“0”码对应的  $\eta(\Delta\beta)$  和  $P_b(0)$  都较小的情况, c 端的输出光功率都远小于 a 和 b 同时发“1”码时 c 端输出的光功率。这些情况下, c 端的平均光功率接近零, 可以视为出现逻辑“0”。此种特性和“与”门的特性吻合, 所以利用 FOPA 中的 FWM 进行波长转换可以构成全光“与”门。表 1 为 a 和 b 发送不同码字时各个参量的数值。

表 1 a 和 b 发送不同码字时各个参量的数值  
Table 1 Value of some parameters when a and b transmit different code words

Code in a	Code in b	$\Delta\beta_{NL}$	$\Delta\beta$	Wavelength conversion efficiency	Input power in b	Output power in c
0	0	$2\gamma P_{a0}$	$ \Delta\beta_0  \gg 0$	smaller	smaller	smaller
0	1	$2\gamma(P_{b1} + P_{a0})$	$ \Delta\beta_1  \gg 0$	smaller	larger	smaller
1	0	$2\gamma P_{a1}$	$\Delta\beta_2 \approx 0$	larger	smaller	smaller
1	1	$2\gamma P_{a1}$	$\Delta\beta_3 \approx 0$	larger	larger	largest

### 3 仿真结果与分析

#### 3.1 全光与门功能的仿真实验

由于耦合方程(1)~(3)很难求解析解,为了得出 c 光波输出功率随时间变化的关系,可以将(7)式代入方程组(1)~(3),利用龙格-库塔法直接求其数值解。其结果不仅适用于小信号放大情形,而且能够得出 FOPA 工作在饱和放大区时 c 光波输出功率。c 端输出功率必须大于某个值才能认为出现了逻辑“1”,因此 FOPA 中某些参数的变化对输入输出功率关系的影响,能够反映出此全光与门的性能。恰当选择耦合方程组(1)~(3)式中的参数与初始值,编制计算机程序,可以得出 a 和 b 端的输入功率和 c 端的输出功率随时间的变化关系。

仿真时利用 300 m 长,损耗系数为 0.61 dB/km、零色散波长为 1554 nm、非线性系数为  $17 \text{ km}^{-1} \text{ w}^{-1}$

的 HNL-DSF 构成 FOPA, a 和 b 两路输入光波为 S1 和 S2,其携带电信息的速率都为 20 Gb/s,则  $T = 50 \text{ ps}$ ,仿真的时间窗口为  $-125 \sim 125 \text{ ps}$ ,显示  $5T$  时间内的波形。S1 和 S2 出现“1”码时的峰值功率分别为 100 mW 与 10 mW,波长分别为 1558.5 nm 和 1552 nm。出现“1”码时经调制后发送的波形都为高斯型,其半高全宽(FWHM)均为  $T_{FWHM} = 12 \text{ ps}$ 。 $5T$  时间内 S1 和 S2 携带的数据分别为“10001”和“01011”。从图 2(a)可知,当 S1 和 S2 的光脉冲同步且同时出现时, c 端的峰值功率为 2.46 mW,远大于其他几种情况下的功率。此时才可以认为出现了逻辑“1”,其余情况为逻辑“0”,则输出端 c 携带的数字信息为“00001”,满足条件  $d_{ck} = d_{ak} \cdot d_{bk}$ ,构成了“与”逻辑门的关系。其他参数不变,将光纤长度增加到 500 m,可以得到图 2(b)所示

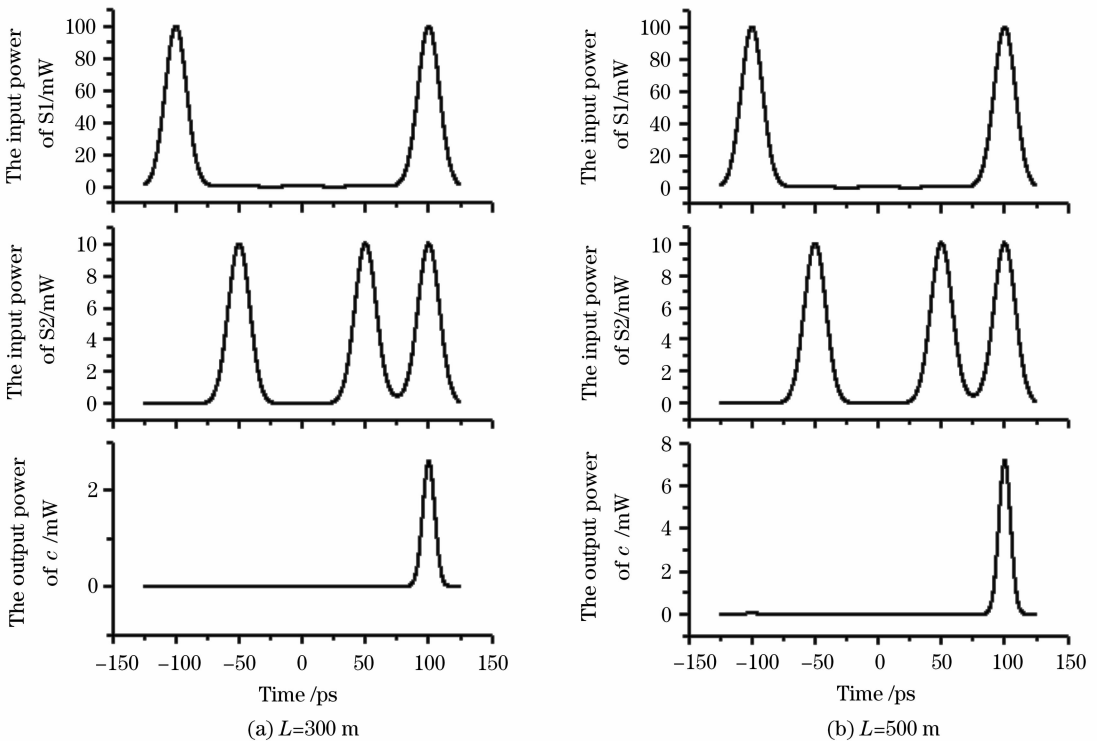


图 2 光纤长度不同时全光与门的输入端和输出端仿真结果

Fig. 2 Simulation results of input and output in all optical AND gate when selected different length of fiber

结果。此时输入输出仍然满足“与”逻辑门的关系,但光纤长度增加使 a 和 b 光波相互作用的距离增加,且此时 XGM 效应并没有起作用,所以波长转换效率增加,最终 c 端的峰值功率达到了 7 mW。在构成全光“与”逻辑门时,只有当输出光功率大于某个阈值时,才能够认为出现了逻辑“1”,而输出光功率与光纤长度密切相关,在 XGM 效应对波长转换影响较小时,输出光功率随光纤长度的增加而增大。在实际构成全光“与”门时,可以根据阈值条件选择光纤长度。

### 3.2 S1 和 S2 光功率比值对全光与门输出光功率的影响

在饱和放大时,FOPA 中经过波长转换后闲散光的功率与抽运光和信号光的功率都有关。令 S1 和 S2 的波长分别为 1554 nm 和 1546 nm,它们的总功率为 110 mW,光纤长度为 500 m,其余参数与图 2 相同。取不同的 S1 和 S2 的功率比值  $\kappa$ ,得到图 3 所示的结果。观察 c 端出现逻辑“1”时输出光功率的变化,发现当  $\kappa=54:1$  时,输出光功率较小;减小  $\kappa$  值,输出光功率增大;当  $\kappa=7:4$  时,c 端的峰值功率超过 11 mW,为几种情况下的最大值;继续减小  $\kappa$  值,输出光功率反而减小。这是由于 S1 的功率较大而 S2 的功率较小时,虽然波长转换效率较高但 S2 的初始功率较小,导致 c 端的输出功率不高;而增大 S2 的功率减小 S1 的功率时,S2 的初始功率有所提高但波长转换效率下降,同样导致 c 端的输出功率不高;只有在  $\kappa$  值取最佳值时,c 端的输出光功

率才会达到最大。

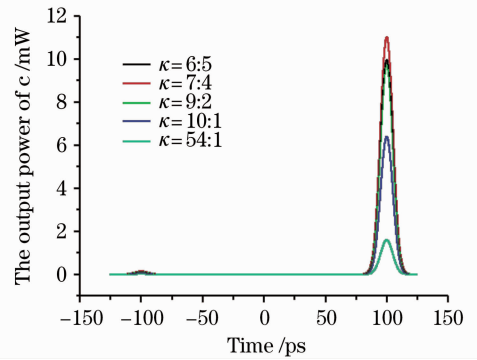


图 3 S1 与 S2 功率比不同时全光与门的输出端仿真结果  
Fig. 3 Simulation results of output in all optical AND gate when the power ratio of S1 and S2 is different

### 3.3 S1 和 S2 光波长对全光与门输出光功率的影响

FOPA 中抽运光和信号光的波长同样会对波长转换的效率产生影响,最终影响 c 端的输出光功率。图 4 为仿真得到的 S1 与 S2 的波长对全光“与”门输入端和输出端仿真结果的影响,除波长外其余参数与图 2(b) 相同。首先固定 S1 的波长为 1554 nm,将 S2 的波长取值为 1525 nm,1531 nm 和 1540 nm,得到图 4(a)。在  $\lambda_0=1531$  nm 时,c 端的输出光功率较大,这是因为此波长的相位匹配较好,波长转换效率较高。然后固定 S2 的波长为 1552 nm,将 S1 的波长取值为 1564 nm,1560 nm 和 1554 nm,得到图 4(b)。在  $\lambda_a=\lambda_0$  时,c 端的输出光功率最大,S1 的波长与  $\lambda_0$  有所偏差时,会增大色散引起的相位失配,从而降低 c 端的输出光功率。

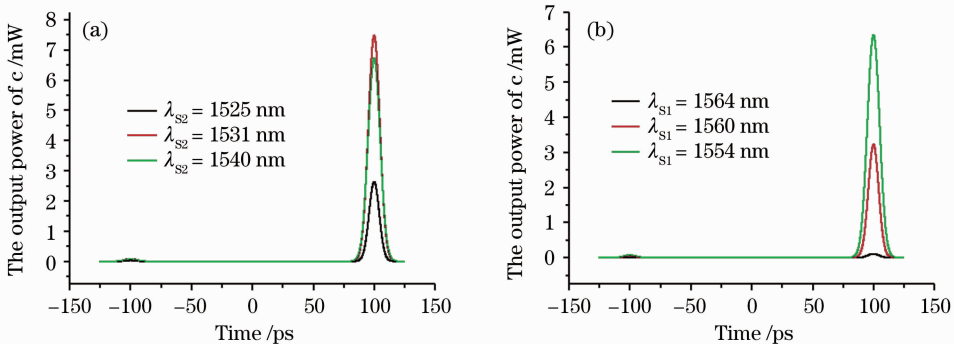


图 4 S1 与 S2 的波长对全光与门的输出端仿真结果的影响。(a)  $\lambda_{S1}=1554$  nm 改变 S2 的波长,(b)  $\lambda_{S2}=1552$  nm 改变 S1 的波长

Fig. 4 Impact of wavelength S1 and S2 on simulation results of output in all optical AND gate. (a) Varies the wavelength of S2 when  $\lambda_{S1}=1554$  nm, (b) varies the wavelength of S1 when  $\lambda_{S2}=1552$  nm

### 3.4 信号速率为 100 Gb/s 时脉冲宽度的选择

以上仿真时 S1 和 S2 的信号速率都为 20 Gb/s,人们在实验中采用的 ps 脉冲激光器,可以提供脉宽为几个皮秒的短脉冲,具有构成 100 Gb/s 全光逻辑

门光源的条件,而高速率条件下全光逻辑门的特性一直是全光逻辑门性能的重要方面。S1 和 S2 的速率均选择为 100 Gb/s,假设脉冲宽度均为  $T_{FWHM}$ ,仿真的时间窗口调整为  $-25 \sim 25$  ps,其余参数同

图 2(b)。图 5 给出了  $T_{FWHM}$  取不同值时, 全光与门输入端和输出端的仿真结果。当  $T_{FWHM} = 3$  ps 时, 仍然能够实现“与”逻辑门的功能, 如图 5(a) 所示。当  $T_{FWHM} = 5$  ps 时, 若 S1 或 S2 中连续出现“1”码, 则输出端 c 出现“1”码时对应的脉冲变宽。由于相

邻脉冲的部分重叠, 有些情况下输出端 c 出现“0”码对应的光功率增大, 例如 S1 为“1”码而 S2 为“0”码时, 输出端 c 的峰值功率接近 1 mW, 有可能造成逻辑错误。全光“与”逻辑门工作在 100 Gb/s 时要慎重选择输入信号的脉冲宽度, 防止出现逻辑错误。

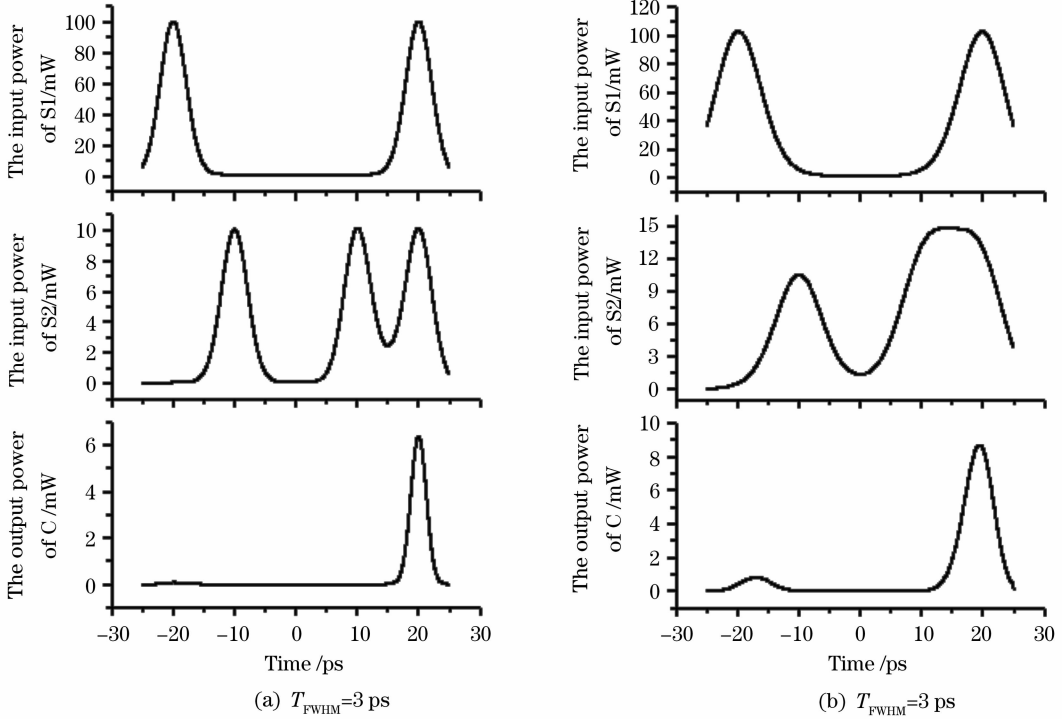


图 5 脉冲宽度不同时全光与门的输入端和输出端仿真结果

Fig. 5 Simulation results of input and output in all optical AND gate when the pulse width varies

## 4 结 论

以 FOPA 中波长转换的特性为基础, 从两路输入光波的各种码字组合的相位匹配关系入手, 证明了 FOPA 的闲散光输出与两路输入光波的逻辑关系符合与门逻辑。通过求耦合方程组的数值解, 仿真验证了 FOPA 的输出与输入光波满足全光与门逻辑。同时得到了输出闲散光波的功率与光纤长度、输入光波功率比值以及输入光波波长位置之间的关系, 并对 100 Gb/s 全光逻辑运算中的问题进行了讨论。结果表明, 利用 FOPA 构成的全光与门能够表现出正确的“与”逻辑关系, 但与门的输出功率受到诸多参数的影响, 在实际应用时必定要优化这些参数, 使得输出端出现逻辑“1”时所对应的光功率较大。目前, 利用 FOPA 进行逻辑运算的研究还处于起步阶段, 由于普通  $\text{SiO}_2$  材料的非线性较弱, 构成全光与门时必须使用很长的光纤, 给实际应用带来了困难。随着高非线性光纤技术的发展, FOPA 构成的全光与门的效率可能会有较大提高。例如,

掺氧化铋( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ )非线性光纤的出现极大地提高了光纤的非线性系数, 它应用在全光逻辑运算中, 可能会大幅度提高 FOPA 构成的全光与门的效率。

## 参 考 文 献

- 1 C. Langrock, Saurabh Kumar, J. E. McGeehan *et al.*. All-optical signal processing using  $\chi^{(2)}$  nonlinearities in guided-wave devices[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(7): 2579~2592
- 2 Y. L. Lee, B. A. Yu, T. J. Eom *et al.*. All-optical AND and NAND gates based on cascaded second-order nonlinear processes in a Ti-diffused periodically poled LiNbO<sub>3</sub> waveguide[J]. *Opt. Exp.*, 2006, **14**(7): 2776~2782
- 3 J. Wang, J. Q. Sun, X. I. Zhang *et al.*. PPLN-based all-optical three-input 20/40 Gb/s AND gate for NRZ/RZ signals and XOR gate for NRZ-DPSK/RZ-DPSK signals[C]. *OFC/NFOEC*, 2008
- 4 Xinliang Zhang, Ying Wang, Junqiang Sun *et al.*. All-optical AND gate at 10 Gbit/s based on cascaded single-port-coupled SOAs[J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**(3): 361~366
- 5 S. Kumar, A. E. Willner. Simultaneous four-wave mixing and cross-gain modulation for implementing an all-optical XNOR logic gate using a single SOA[J]. *Opt. Exp.*, 2006, **14**(12): 5092~5097
- 6 Thomas Torounidis, Peter A. Andrekson, Bengt-Erik Olsson.

- Fiber-optical parametric amplifier with 70-dB gain [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(10): 1194~1196
- 7 Zh. H. Zhu, W. M. Ye, J. R. Ji *et al.*. High-contrast light-by-light switching and AND gate based on nonlinear photonic crystals[J]. *Opt. Exp.*, 2006, **14**(5): 1783~1788
- 8 M. D. Pelusi, F. Luan, E. Magi *et al.*. High bit rate all-optical signal processing in a fiber photonic wire[J]. *Opt. Exp.*, 2008, **16**(15): 11506~11512
- 9 J. Li, J. Hansryd, P. O. Hedekvist *et al.*. 300-Gb/s eye-diagram measurement by optical sampling using fiber-based parametric amplification [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(9): 987~989
- 10 J. Hansryd, P. A. Andrekson. O-TDM demultiplexer with 40-dB gain based on a fiber optical parametric amplifier[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(7): 584~586
- 11 D. M. F. Lai, E. N. Lin, K. K. Y. Wong. All-optical half-adder by using a single-stage optical parametric amplifier [C]. *ECOC*, 2007
- 12 D. M. F. Lai, C. H. Kwok, T. I. Yuk *et al.*. Picosecond all-optical logic gates (XOR, OR, NOT, and AND) in a fiber optical parametric amplifier[C]. *OFC/NFOEC*, 2008
- 13 Gui L, Wen S C. Study of the properties of gain and bandwidth of fiber optical parametric amplifier in the saturation amplification regime[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 1050~1054  
桂 林, 文双春. 饱和放大情形下光纤参量放大器的增益和带宽特性研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(6): 1050~1054
- 14 Marhic M E, Kagi N, Chiang T K *et al.*. Broadband fiber optical parametric amplifiers[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(8): 573~575