

文章编号: 0253-2239(2006)06-0895-8

# 基于线性光放大器的全光逻辑异或门理论分析\*

邹龙方<sup>1</sup> 潘 炜<sup>1,2</sup> 罗 斌<sup>1</sup> 张伟利<sup>1</sup> 李孝峰<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 西南交通大学计算机与通信工程学院光通信与光器件研究所, 成都 610031)  
(<sup>2</sup> 电子科技大学宽带光纤传输与通信系统技术重点实验室, 成都 610054)

**摘要:** 基于速率方程建立了线性光放大器(LOA)的数值模型,模拟了线性光放大器的增益钳制特性。与对称结构马赫-曾德尔干涉仪(MZI)的传输矩阵相结合,构建了线性光放大器马赫-曾德尔干涉仪全光逻辑异或门模型,实现了两路 40Gbit/s 信号的异或运算。与传统的半导体光放大器(SOA)构成的马赫-曾德尔干涉仪型异或门进行了比较,从器件结构上对两种异或门运算结果的差异给出了解释。结果表明,线性光放大器具有平坦的增益特性,对输入信号的扰动具有不敏感性,垂直光场缩短了载流子恢复时间;线性光放大器马赫-曾德尔干涉仪结构可以实现异或运算;利用差分相位法可以解决载流子恢复时间对信号处理速度的限制,合理地选择延迟时间能获得较好的运算结果;输出信号具有眼图张开度大、消光比高、峰值啁啾小、对波长变化不敏感等优点。

**关键词:** 信息光学; 线性光放大器; 马赫-曾德尔干涉仪; 全光逻辑异或门; 差分相位法

中图分类号: TN911.74 文献标识码: A

## Theoretical Analysis on All-Optical XOR Using Linear Optical Amplifier

Zou Longfang<sup>1</sup> Pan Wei<sup>1,2</sup> Luo Bin<sup>1</sup> Zhang Weili<sup>1</sup> Li Xiaofeng<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Optical Communication and Devices, School of Computer and Communication Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)  
(<sup>2</sup> Key Laboratory of Broad-Band Fiber Transmission and Communication Network Technology, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054)

**Abstract:** The numerical model of the linear optical amplifier (LOA) is built based on the rate equations. The gain clamping characteristics of LOA are simulated. By combining the transmission matrix of the symmetrical, Mach-Zehnder interferometer (MZI), the all-optical XOR model of LOA-MZI has been constructed, and two XOR operations are realized at 40 Gbit/s. The performance of the XOR result has been analyzed and compared with the semiconductor optical amplifier (SOA)-MZI. The result differences of the two XOR gates are explained from the structural property. The theoretical results indicate that, LOA has a flat gain characteristic and improved tolerance against small signal distortions, the carrier recovery time is shorted by the vertical laser field, and all-optical XOR functionality can be achieved by using LOA-MZI. By using the differential phase scheme the high-speed operation limitation by the carrier recovery time is solved, and better results can be achieved by choosing the delay time properly. The output signals of LOA-MZI have opener eye diagram, higher extinction ratio, lower peak chirp and lower sensitivity to wavelength.

**Key words:** information optics; linear optical amplifier (LOA); Mach-Zehnder interferometer (MZI); all-optical logic XOR gate; difference phase scheme

\* 国家自然科学基金(10174057, 90201011), 教育部科学技术研究重点项目(2005-105148), 国家重点实验室开放课题(2002KF)和四川省应用基础科学研究(03JY029-048-1)资助课题。

作者简介: 邹龙方(1976~), 男, 黑龙江牡丹江人, 西南交通大学硕士研究生, 主要从事半导体光放大器、光通信、信息处理等方面的研究。E-mail: zoulongfang@xinhuanet.com

收稿日期: 2005-04-11; 收到修改稿日期: 2005-12-06

## 1 引 言

全光信号处理技术具有处理宽带宽、高速率、大容量信号的能力,在通信和计算领域将有广泛的应用。逻辑异或门(XOR)作为全光信号处理的关键器件之一,可以用于标签交换、数据编码、奇偶校验、信号再生等<sup>[1~3]</sup>。利用光纤非线性效应构成的异或门具有处理速度快的优点,例如非线性光纤环镜(NOLM)<sup>[2]</sup>、半导体光放大器-萨尼亚克(Sagnac)光纤干涉仪<sup>[4]</sup>、超快非线性干涉仪(UNI)<sup>[5]</sup>等,但由于器件尺寸较大,很难集成。半导体光放大器构成马赫-曾德尔干涉仪(SOA-MZI)结构的全光逻辑门具有尺寸小、功耗低、并且易于集成等优点,具有很好的应用前景。最近已有实验利用对称半导体光放大器马赫-曾德尔干涉仪和差分相位法成功地实现了两路信号的逻辑异或运算<sup>[6,7]</sup>。由于传统的半导体光放大器用于马赫-曾德尔干涉仪型异或门时,常工作在增益饱和区。使用差分相位法时,两路信号经过差分运算后耦合进入半导体光放大器,可能在半导体光放大器中发生严重的串扰,导致输出波形发生失真。一种新型的半导体光放大器——线性光放大器(LOA)利用有源区两侧的分布式布拉格反射镜(DBR)建立了垂直光场(VCL),对入射光形成了增益钳制,很好地解决了这一问题<sup>[8,9]</sup>。

在研究垂直腔激光器(VCSEL)、垂直腔半导体光放大器(VCSOA)和马赫-曾德尔干涉仪工作的基础上,本文从线性光放大器的结构特点出发,建立了基于速率方程的模型,模拟了线性光放大器的增益钳制特性。

## 2 工作原理

基于对称半导体光放大器马赫-曾德尔干涉仪和线性光放大器马赫-曾德尔干涉仪全光异或门使用相同的结构,干涉仪两臂上的器件分别选用半导体光放大器和线性光放大器,线性光放大器 LOA1 和 LOA2 对称地放置于干涉仪两臂,如图 1 所示。

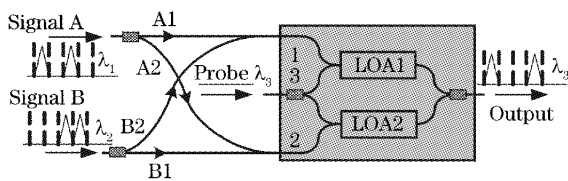


图 1 基于对称线性光放大器-马赫-曾德尔干涉仪全光逻辑异或门结构示意图

Fig. 1 Structure diagram for all-optical logic XOR gate based on symmetrical LOA-MZI

两路波长为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的信号光 A 和 B 经过异或门后,输出波长为  $\lambda_3$  的异或运算结果。

工作原理如下:波长为  $\lambda_3$  的连续探测光通过 3 dB 耦合器分解成两束光注入到干涉仪两臂。调制信号 A 和 B 分别经过 3 dB 耦合器分解成两束光 A1、A2 和 B1、B2。B2 延迟时间  $\tau$  后与 A1 耦合到端口 1,如图 2 中(c)所示;A2 延迟时间  $\tau$  后与 B1 耦合到端口 2,如图 2 中(d)所示。在线性光放大器中,当输入功率超过线性光放大器的最大线性输入功率时,有源区内载流子密度就会发生改变,根据克拉默斯-克勒尼希(Kramers-Kronig)关系,有源区的有效折射率将会发生改变,导致通过线性光放大器的探测光的强度和相位发生变化,即交叉增益调制(XGM)和交叉相位调制(XPM)。探测光的相位  $\phi$  沿光入射方向的变化为<sup>[10]</sup>

$$\frac{d\phi}{dz} = -\frac{1}{2}\Gamma\alpha g_\lambda, \quad (1)$$

式中  $\Gamma$  为模场限制因子, $\alpha$  为线宽增强因子, $g_\lambda$  为增益。探测光经过线性光放大器后就会携带上信号光的信息,如图 2 中(e)和(f)所示。

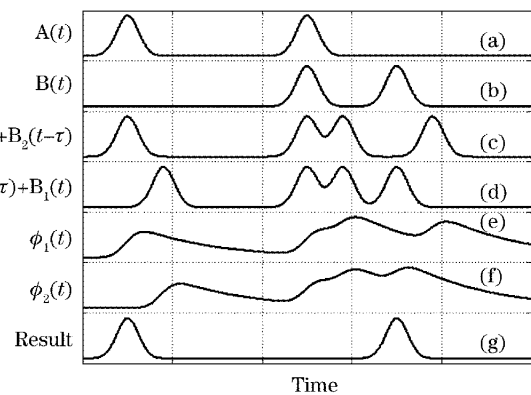


图 2 差分相位法实现逻辑异或门原理图

Fig. 2 Principle of XOR operation with differential phase scheme

两路经过相位调制的探测光在耦合器中发生干涉。当信号 A 与 B 不同时,例如 A 为“1”,B 为“0”时,如图 2 中的第一个比特周期所示, $\phi_1$  的波峰先到达,打开一个时间窗口,称为开关窗口。经过时间  $\tau$  后, $\phi_2$  的波峰到达, $\phi_1$  和  $\phi_2$  的相位差消失,窗口关闭,产生波长为  $\lambda_3$  的一个脉冲,代表信号“1”;当信号 A 与 B 相同时,例如 A、B 同为“0”或“1”时,如图 2 中的第二和第三个比特周期所示, $\phi_1$  和  $\phi_2$  的相位相同,开关窗口关闭,此时输出脉冲为“0”。由此可见,采用差分相位法实现逻辑异或门时,可以通过控制光脉冲的延迟时间,改变输出脉冲的宽度。

定义入射的探测光的光场为  $E_{in}(t)$ , 干涉仪两臂对探测光的增益分别为  $G_1(t)$  和  $G_2(t)$ , 由对称结构的马赫-曾德尔干涉仪传输矩阵可知输出光场  $E_{out}(t)$  为<sup>[11]</sup>

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_1(t) \exp[-j\phi_1(t)] & 0 \\ 0 & G_2(t) \exp[-j\phi_2(t)] \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

由此, 运算后信号的表达式为

$$P_{XOR}(t) = \frac{P_{in}(t)}{4} \{G_1(t) + G_2(t) - 2 \sqrt{G_1(t)G_2(t)} \cos[\phi_1(t) - \phi_2(t)]\}, \quad (3)$$

式中  $P_{in}(t)$  是输入的探测光功率。这里暂不考虑非对称结构的马赫-曾德尔干涉仪。

### 3 线性光放大器模型

与普通的半导体光放大器相比, 线性光放大器在结构上相当于一个半导体光放大器和一个垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 在一个 InP 层上的集成<sup>[8,9,12]</sup>, 如图 3 所示。垂直腔面发射激光器在有源区的上下两侧各有一个高反射率的分布式布拉格反射镜 (DBR), 在垂直光信号的输入方向上形成激光振荡, 在垂直腔面发射激光器发生振荡的工作状态下, 增益与分布式布拉格反射镜反射率之积为常数。基于此点, 就可以做到, 当分布式布拉格反射镜的反射率为定值时, 其增益保持不变, 形成增益钳制。

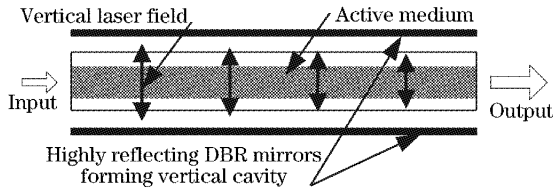


图 3 线性光放大器结构示意图<sup>[8]</sup>

Fig. 3 Schematic structure of the LOA

线性光放大器中垂直入射光方向的垂直腔激光 (VCL) 光子密度  $\rho$  表示为<sup>[9,13,14]</sup>

$$\frac{d\rho}{dt} = \Gamma_L v_g g_L \rho - \frac{\rho}{\tau_{ph}} + R_{sp,L}, \quad (4)$$

式中  $\Gamma_L$  为垂直腔激光限制因子

$$\Gamma_L = \frac{d}{d_L} \left(1 + \frac{\sin \eta d}{\eta d}\right) \approx 2 \frac{d}{d_L}, \quad (5)$$

其中  $d$  为有源区厚度,  $d_L$  为垂直光场有效长度,  $\eta$  为垂直腔激光传播常数,  $v_g$  为群速度,  $g_L = \alpha_0 (N - N_0)$  为垂直腔激光增益,  $\alpha_0$  为微分增益,  $N$  为载流子密度,  $N_0$  为透明载流子密度, 垂直腔激光激光波长的典型值为 1550 nm,  $\tau_{ph}$  是光子寿命, 对于垂直腔面发射激光器这种结构, 横向场模限制因子近似为 1, 器件的阈值增益为  $g_{th}$ , 则

$$\frac{1}{\tau_{ph}} = v_g g_{th} = v_g \left(\alpha_{in} + \frac{1}{d_L} \ln \frac{1}{R_L}\right), \quad (6)$$

$\alpha_{in}$  为内部损耗,  $R_L$  为有源区上下两端分布式布拉格反射镜的反射率。与自发辐射相关的载流子复合速率  $R_{sp,L} = \beta_A AN + \beta_B BN^2 + \beta_C CN^3$ , 这里定义自发辐射因子  $\beta_i (i=A, B, C)$ , 它表征自发辐射对激射模的贡献份额。

光脉冲传输方程为<sup>[15,16]</sup>

$$\frac{1}{v_g} \frac{\partial E_i(z,t)}{\partial t} + \frac{\partial E_i(z,t)}{\partial z} = -\frac{j}{2} \alpha \Gamma g_i E_i(z,t) + \frac{1}{2} (\Gamma g_i - \alpha_{in}) E_i(z,t), \quad (7)$$

式中  $E_i(z,t)$  为输入脉冲能量,  $i=1,2,3$  分别代表输入的两路信号光和探测光,  $g_i$  为增益。为了能准确模拟线性光放大器增益, 使用下面的函数<sup>[17]</sup>

$$g_i(\lambda_i, N) = \alpha_0 (N - N_0) - \gamma_1 (\lambda_1 - \lambda_N)^2 + \gamma_2 (\lambda_i - \lambda_N)^3, \quad (8)$$

式中  $\lambda_N$  是载流子密度为  $N$  时的峰值增益波长, 假定它和载流子密度成线性关系,  $\lambda_N = \lambda_0 - k_0 (N - N_0)$ ,  $\lambda_0$  是  $N = N_0$  时的峰值增益波长,  $k_0$  用于表示增益峰值波长随载流子密度的漂移,  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  为增益系数, 用于拟合增益曲线的参量, 分别用来表示增益带宽和增益的不对称性。

线性光放大器中载流子速率方程为

$$\frac{\partial N(z,t)}{\partial t} = \frac{1}{qV} \frac{N(z,t)}{\tau_c} - \sum_{i=1,2,3} \frac{\Gamma g_i P_i}{h\nu A_x} - v_g g_L \rho, \quad (9)$$

等式右边第一项为注入电流  $I$  提供的载流子,  $q$  为电子电量,  $V$  为有源区体积; 第二项为自发辐射消耗的载流子,  $\tau_c$  为自发辐射载流子寿命, 且  $\tau_c = (A + BN + CN^2)^{-1}$ , 其中  $A, B, C$  分别为非辐射、双分子和俄歇复合系数; 第三项为放大输入的两路信号光和探测光消耗的载流子,  $h\nu$  为光子能量,  $A_x$  为有源区横截面积,  $P_i = |E_i|^2$  是波长为  $\lambda$  的光功率; 最后一项为垂直光场消耗的载流子。

通过求解横向垂直光场方程(4)、纵向光脉冲传输方程(7)和载流子速率方程(9), 模拟出光信号在线性光放大器中的传输特性, 能解释线性光放大器

用于异或门时与半导体光放大器表现出的不同特性。模拟中使用的参量见表 1。图 4(a)为输入光功率与增益之间的关系。与半导体光放大器相比,线性光放大器的增益曲线更为平坦。线性光放大器的增益钳制特性还表现为对输入信号波长变化的不敏感性,几乎在整个 C 频段(1525~1565 nm),线性光放大器增益波动范围很小,如图 4(b)所示。在模拟输入信号对放大器中载流子密度影响时,一束光在 1 ns 时输入,2 ns 时停止。图 4(c)和图 4(d)分别对输入信号为小信号(强度为 -10 dBm)和大信号(强度为 5 dBm)时,线性光放大器和半导体光放大器中载流子变化对比图。由图 4(c)中可以得出,当输入信号功率小于线性光放大器和半导体光放大器

的最大线性输入功率时,由于线性光放大器具有增益钳制作用,有源区的载流子密度只在一个小的范围内波动,而半导体光放大器中的载流子密度变化较大。因此线性光放大器用于异或门时,不仅能抑制两路信号之间发生串扰,而且当输入信号“0”有微小的波动时,对输出也不会产生大的影响,对“0”状态失真抗干扰度较高。图 4(d)则反映了当输入信号功率大于线性光放大器和半导体光放大器的最大线性输入功率时,线性光放大器比半导体光放大器中载流子恢复时间短,在模拟异或运算过程中发现,这对提高输出信号的消光比有重要意义。以上结论与文献[8,9]的理论和实验结果一致。

表 1 线性光放大器的典型参量  
Table 1 Typical parameters of LOA

Symbol	Value	Explanation
$L / \mu\text{m}$	500	Active region length
$w / \mu\text{m}$	1	Active region width
$d / \mu\text{m}$	0.2	Active region thickness
$d_L / \mu\text{m}$	4	Effective cavity length of the VCL
$\alpha_m / \mu\text{m}^{-1}$	$2.5 \times 10^{-3}$	Material loss
$N_0 / \mu\text{m}^{-3}$	$0.9 \times 10^6$	Carrier density at transparency
$\Gamma$	0.3	Confinement factor
$\alpha_0 / \mu\text{m}^2$	$2.5 \times 10^{-8}$	Material gain constant
$\gamma_1 / \mu\text{m}^{-3}$	7.4	Gain spectrum coefficient 1
$\gamma_2 / \mu\text{m}^{-4}$	31.55	Gain spectrum coefficient 2
$k_0 / \mu\text{m}^4$	$3 \times 10^{-8}$	Material gain constant
$A / \text{ns}^{-1}$	0.1	Nonradiative recombination coefficient
$B / (\mu\text{m}^3 / \text{ns})$	$2.5 \times 10^{-8}$	Bimolecular recombination coefficient
$C / (\mu\text{m}^6 / \text{ns})$	$9.4 \times 10^{-14}$	Auger recombination coefficient
$\beta$	$10^{-4}$	Spontaneous emission coupling coefficient
$v_g / (\mu\text{m} / \text{ns})$	$7.5 \times 10^4$	Group velocity

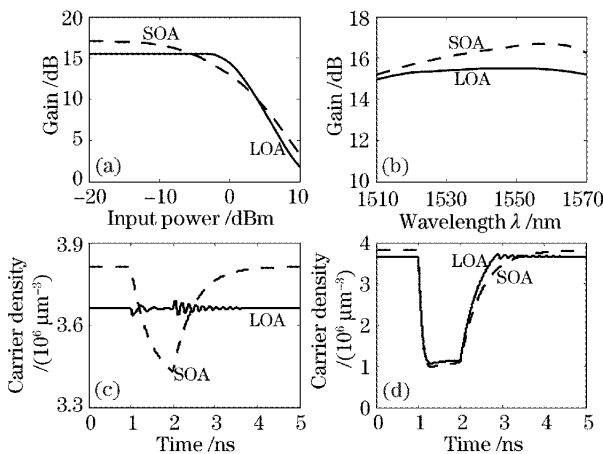


图 4 线性光放大器与半导体光放大器的增益和载流子密度对比

Fig. 4 Gain and carrier density of SOA and LOA

## 4 模拟结果与讨论

在模拟异或运算时,两路 40 Gbit/s 信号光的波长分别为 1560 nm 和 1540 nm,消光比为 10 dB,平均功率为 3 dBm,用双曲正割脉冲模拟信号光,信号的半峰全宽(FWHM)为 5 ps。探测光波长为 1550 nm。

### 4.1 基于线性光放大器马赫-曾德尔干涉仪的异或运算

图 5(a)和图 5(b)为两路信号波形,图 5(c)和图 5(d)为经过差分运算的两路信号, $\tau$  取 10ps。图 6(b)为使用差分法,基于线性光放大器马赫-曾德尔干涉仪异或门运算结果。输出信号的消光比为 12.9 dB。图 7 为  $\tau$  取不同值时,对 300~350 ps 这一时间段的输出脉冲进行归一化处理,波形对比图。由图中可以直接观察到,输出脉冲宽度与延迟

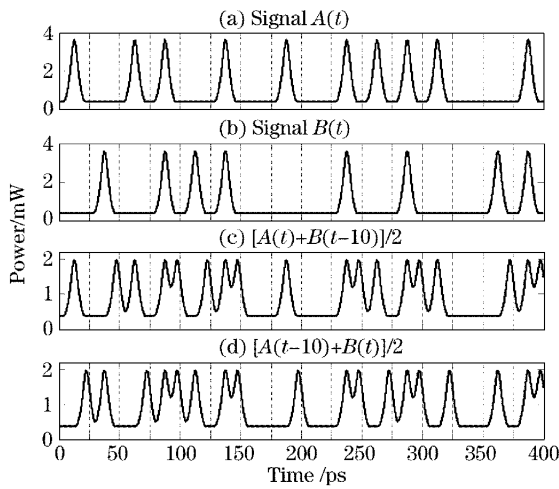


图 5 两路信号的差分运算

Fig. 5 Differential operation of two input signals

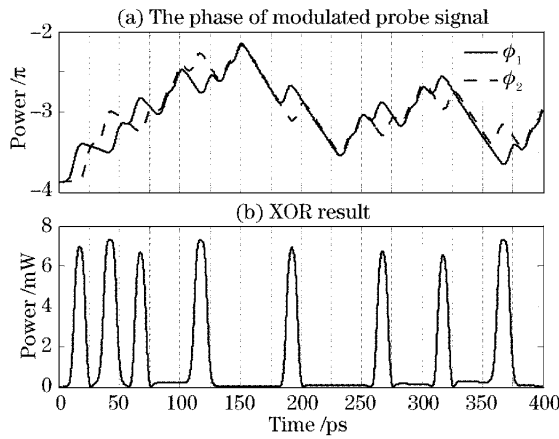


图 6 使用差分相位法,线性光放大器马赫-曾德尔干涉仪异或门运算

Fig. 6 XOR operation using LOA-MZI and differential phase scheme

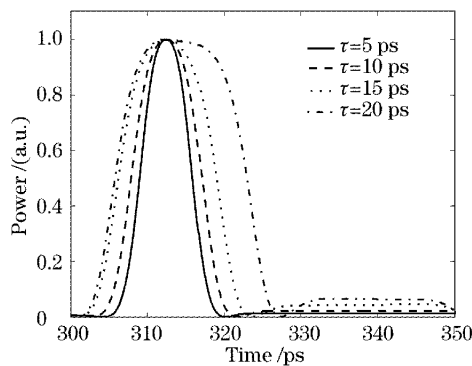


图 7 延迟时间与输出脉冲宽度关系

Fig. 7 Relationship between the output pulse width and the delay time

时间有直接关系。延迟时间较长时,  $\phi_1$  和  $\phi_2$  波峰间隔时间较长, 相当于开关窗口打开时间长, 输出脉冲

较宽。选取 300~350 ps 是由于该时间段输出脉冲消光比最小, 有代表意义。在此段时间“1”连续耦合进入线性光放大器, 见图 5(c) 和图 5(d), 消耗了大量载流子, 导致输出脉冲峰值功率较小。在开关窗口关闭之后, 受输入信号波形和载流子恢复时间的影响,  $\phi_1$  和  $\phi_2$  之间存在相位差, 见图 6(a), 导致开关窗口重新打开, 出现一个小的脉冲, 降低了输出信号的消光比, 而且  $\tau$  越大这种现象越明显, 见图 7。由以上分析可以得出, 使用差分相位法时,  $\tau$  的选取对输出信号的脉冲宽度和消光比影响非常大。并且在模拟中发现, 与延迟时间相比, 输入信号的消光比对输出信号的消光比影响不大。虽然增大输入信号的消光比, 探测光的相位调制幅度将加深, 调制后相位的波峰和波谷之间的差值变大, 但是输出信号的消光比主要取决于延迟时间形成的  $\phi_1$  和  $\phi_2$  之间的相位差。

图 8 为延迟时间相同, 输入信号的半峰全宽分别为 3 ps、5 ps、7 ps 时, 对输出脉冲进行归一化处理, 脉冲宽度对比图。由图中可以观察到输出脉冲宽度几乎不受输入脉冲宽度的影响。

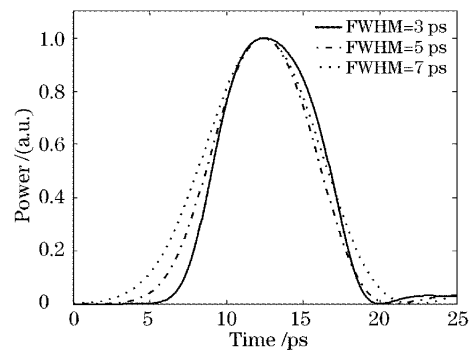


图 8 输入脉冲宽度与输出脉冲宽度关系

Fig. 8 Relationship between the output pulse width and the input pulse width

图 9 为在相同条件下, 基于半导体光放大器的马赫-曾德尔干涉仪异或门运算结果, 输出信号的消光比为 10.5 dB, 小于线性光放大器马赫-曾德尔干涉仪输出信号的消光比。由图 4 对线性光放大器增益和载流子的特性描述出发, 可以解释图 6(a) 和图 9(a) 中探测光相位所表现出的差异, 进而对输出信号的差异给出合理的解释。线性光放大器的垂直光场钳制了载流子的波动范围, 载流子恢复较快, 表现为探测光相位在一定范围内波动。并且相位变化几乎呈线性, 如图 6(a) 中 150~250 ps 时间段所示。图 10 为延迟时间取不同值时, 对 300~350 ps 这一时间段的输出脉冲进行归一化处理对比图。与线性

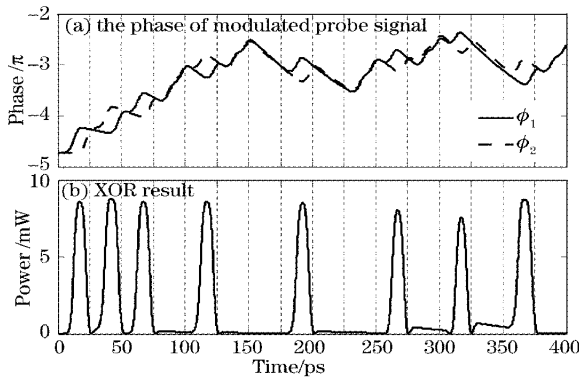


图 9 使用差分相位法, 半导体光放大器马赫-曾德尔干涉仪异或门运算

Fig. 9 XOR operation using SOA-MZI and differential phase scheme

光放大器-马赫-曾德尔干涉仪相同, 输出脉冲宽度与延迟时间有关。但是由于两种半导体光放大器对探测光相位调制的差异, 在 325~350ps 时间段, 半导体光放大器-马赫-曾德尔干涉仪输出的  $\phi_1$  和  $\phi_2$  相位差较大, 开关窗口打开幅度大, 降低了输出信号的消光比。

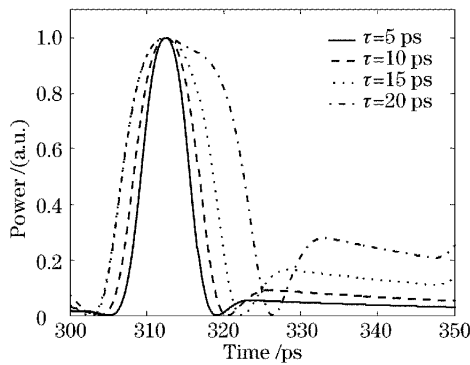


图 10 延迟时间与脉冲宽度关系

Fig. 10 Relationship between the output pulse width and the delay time

#### 4.2 半导体光放大器-马赫-曾德尔干涉仪与线性光放大器-马赫-曾德尔干涉仪输出信号性能比较

图 11 和图 12 分别为两种异或门输出信号的眼图, 当延迟小于 15 ps 时, 线性光放大器-马赫-曾德尔干涉仪异或门输出信号的眼图张开度较大, 并且每个脉冲峰值功率基本相同。当延迟大于 15 ps 时, 两种异或门的性能都有所下降, 眼图张开度减小, 脉冲峰值功率差异变大。

图 13 为延迟时间与输出信号的平均功率和消光比关系。由图中可以得出, 延迟时间较大时, 可以获得高的输出功率, 但信号的消光比小。线性光放大器-马赫-曾德尔干涉仪型异或门输出信号的消光

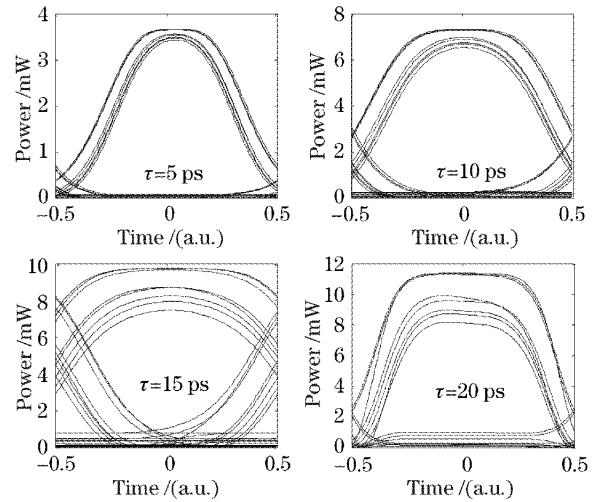


图 11 线性光放大器马赫-曾德尔干涉仪输出信号眼图

Fig. 11 Eye diagram of XOR results using LOA-MZI with different delay time

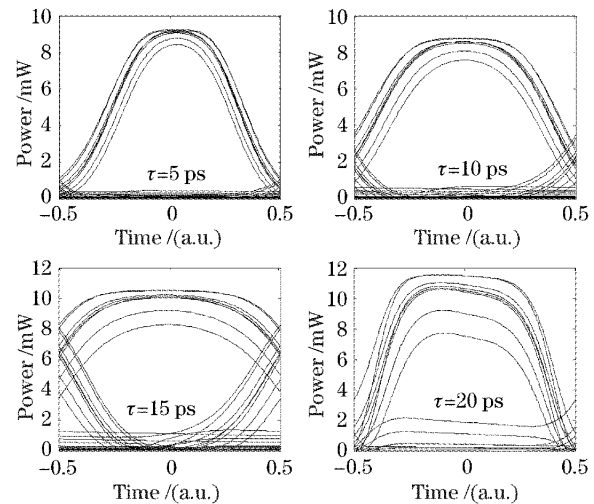


图 12 半导体光放大器-马赫-曾德尔干涉仪输出信号眼图

Fig. 12 Eye diagram of XOR results using SOA-MZI with different delay time

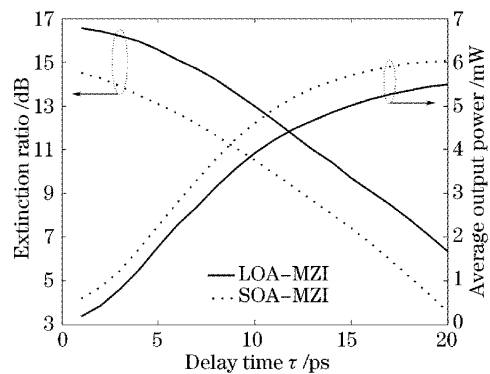


图 13 延迟时间与信号消光比和平均功率关系

Fig. 13 Extinction ratio and average output power as a function of delay time for SOA-MZI and LOA-MZI

比高于半导体光放大器-马赫-曾德尔干涉仪,但是由于线性光放大器中垂直光场消耗了部分载流子,增益较小,输出信号功率较低。

图 14 为延迟时间与输出信号的峰值啁啾关系。由马赫-曾德尔干涉仪工作原理可知,输出信号的啁啾仅与有源区载流子密度变化有关,即使输入一个有啁啾的信号,输出信号的啁啾也不会受其影响,具有啁啾的独立性。由图中可以观察到,与半导体光放大器相比,线性光放大器中垂直光场限制了载流子的波动,因此输出信号峰值啁啾较小。对两种异或门来说,输出信号的负啁啾比正啁啾大,这是由于信号为双曲正割波形,上升与下降沿均比较陡峭,而载流子恢复时间呈指数变化所致。延迟时间在 8~16 ps 时,峰值啁啾基本保持不变。延迟时间大于 16 ps 时,峰值啁啾增长很快。综合输出信号的平均功率、消光比、峰值啁啾这三项指标,对于 40 Gbit/s 信号的异或运算,延迟时间应选在 8~12 ps 范围内。

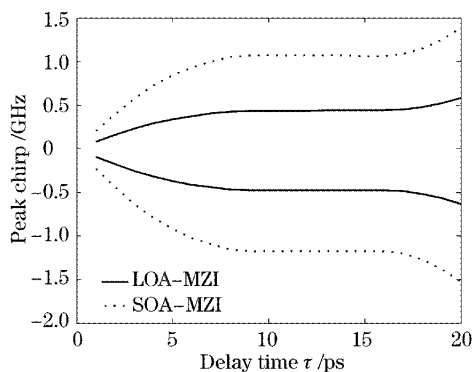


图 14 延迟时间与信号峰值啁啾关系

Fig. 14 Peak chirp as a function of delay time for SOA-MZI and LOA-MZI

图 15 和图 16 分别为输入信号光和探测光波长

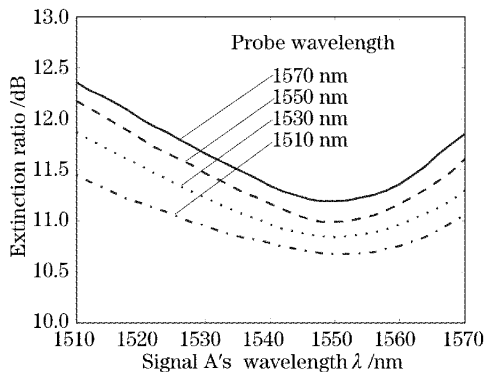


图 15 波长与线性光放大器马赫-曾德尔干涉仪输出信号消光比关系

Fig. 15 Extinction ratio of LOA-MZI as a function of the wavelength

对线性光放大器马赫-曾德尔干涉仪和半导体光放大器马赫-曾德尔干涉仪输出信号的消光比影响,输入信号光 B 的波长为 1550 nm。由图中可以得出,当输入的两路信号光波长相同时,信号在半导体光放大器中发生串扰,降低了输出信号的消光比。但是由于线性光放大器中垂直光场的存在,串扰对消光比的影响比半导体光放大器要小,与文献[8,9]的理论和实验结果相一致。两路信号波长差异较大时,降低了串扰,输出信号的消光比高。探测光波长较长时,异或运算结果具有较高的消光比。通过两图的对比可以得出,线性光放大器马赫-曾德尔干涉仪异或门对输入信号光和探测光波长的敏感程度小。

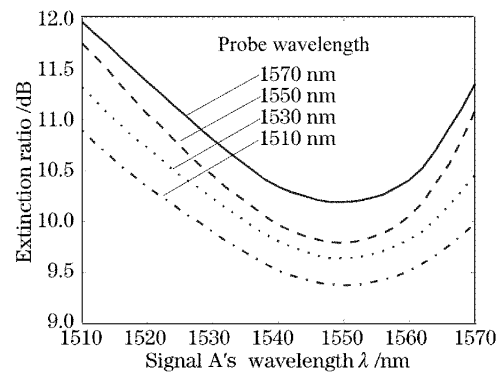


图 16 波长与半导体光放大器马赫-曾德尔干涉仪输出信号消光比关系

Fig. 16 Extinction ratio of SOA-MZI as a function of the wavelength

## 5 结 论

基于速率方程,建立了线性光放大器马赫-曾德尔干涉仪全光异或门数值模型,用差分相位法实现了两路 40 Gbit/s 信号的异或运算。对模型修改并除去垂直光场后,可用于分析对称半导体光放大器马赫-曾德尔干涉仪异或门。数值模拟结果表明:使用差分相位法能克服半导体光放大器中载流子恢复时间对高速信号处理的限制;延迟时间的取值对输出信号的性能有较大的影响。延迟时间较短时,输出信号脉冲窄、功率低,消光比大、峰值啁啾小;输出信号的脉冲宽度与输入信号的脉冲宽度关系不大;线性光放大器中分布式布拉格反射镜形成的垂直光场具有增益钳制作用,线性光放大器用于马赫-曾德尔干涉仪型异或门时性能优于半导体光放大器,表现为:对输入信号“0”状态失真具有不敏感性;能避免两路信号在线性光放大器发生串扰;输出信号消光比高、峰值啁啾小、对输入信号光波长变化不敏

感。缺点是输出信号的功率小。

### 参 考 文 献

- 1 T. Fjelde, A. Kloch, D. Wolfson *et al.*. Novel scheme for simple label swapping employing XOR logic in an integrated interferometric wavelength converter [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(7): 750~752
- 2 K. L. Hall, K. A. Rauschenbach. All-optical bit pattern generation and matching[J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(13): 1214~1215
- 3 A. J. Poustie, K. J. Blow, R. J. Manning *et al.*. All-optical pseudorandom number generator[J]. *Opt. Commun.*, 1999, **159**(4): 208~214
- 4 T. Houbavlis, K. Zoiros, K. Vlachos *et al.*. All-optical XOR in a semiconductor optical amplifier-assisted fiber Sagnac gate[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(3): 334~336
- 5 B. S. Robinson, S. A. Hamilton, S. J. Savage. 40 Gbit/s all-optical XOR using a fiber-based folded ultrafast nonlinear interferometer[C]. *Conference on Optical Fiber Communication, Technical Digest Series*, 2002, **70**: 561~563
- 6 T. Fjelde, D. Wolfson, A. Kloch *et al.*. Demonstration of 20 Gbit/s all optical logic XOR in integrated SOA-based interferometric wavelength converter[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(22): 1863~1864
- 7 R. P. Webb, R. J. Manning, G. D. Maxwell *et al.*. 40 Gbit/s all-optical XOR gate based on hybrid-integrated Mach-Zehnder interferometer[J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(1): 79~81
- 8 D. A. Francis, S. P. DiJaili, J. D. Walker. A single-chip linear optical amplifier [C]. *Conference on Optical Fiber Communication, Technical Digest Series*, 2001, **54**(4): PD13-1~PD13-3
- 9 J. Oksanen, J. Tulkki. On crosstalk and noise in an optical amplifier with gain clamping by vertical laser field [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(9): 1914~1919
- 10 G. P. Agrawal, N. A. Olsson. Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifiers [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1989, **25**(11): 2297~2306
- 11 Zou Xihua, Pan Wei, Luo Bin *et al.*. Effects of tilt angle on the performances of OADM using fiber Bragg gratings [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(8): 910~913 (in Chinese)  
邹喜华,潘 炜,罗 斌等. 倾角对光纤 Bragg 光栅型 OADM 性能的影响[J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(8): 910~913
- 12 Xiaofeng Li, Wei Pan, Bin Luo *et al.*. Theoretical study on controlling nonlinear behaviors of a coupled-cavity VCSEL by external optical injection[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(5): 278~281
- 13 Zhang Weili, Pan Wei, Luo Bin *et al.*. Theoretical analysis on dynamics and bifurcations characteristics of VCSELs with phase conjugate optical feedback[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(5): 632~636 (in Chinese)  
张伟利,潘 炜,罗 斌等. 相位共轭反馈下垂直腔面发射激光器动态分岔特性的理论研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(5): 632~636
- 14 Pan Wei, Zhang Xiaoxia, Luo Bin *et al.*. Theoretical study of bistable and logic characteristics in vertical cavity semiconductor optical amplifier[J]. *Chin. J. Semiconductors*, 2005, **26**(2): 357~362 (in Chinese)  
潘 炜,张晓霞,罗 斌等. 垂直腔半导体光放大器双稳及逻辑特性的理论研究[J]. *半导体学报*, 2005, **26**(2): 357~362
- 15 Yabin Ye, Xiaoping Zhang, Hanyi Zhang. Study on the dynamic range of input power for wavelength converter based on cross-phase modulation in SOAs [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **200**: 349~354
- 16 Zhang Weili, Pan Wei, Luo Bin *et al.*. The influence of non-instantaneous phase conjugate optical feedback on the dynamics of semiconductor laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1219~1224 (in Chinese)  
张伟利,潘 炜,罗 斌等. 非即变相位共轭反馈对半导体激光器动态特性的影响[J]. *光学学报*, 2005, **25**(9): 1219~1224
- 17 Pan Wei, Zhang Xiaoxia, Luo Bin *et al.*. Effect of wavelength dependence of reflectivity at AR-coating facets on tuning range of external-cavity semiconductor lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8): 975~979 (in Chinese)  
潘 炜,张晓霞,罗 斌等. 端面反射率的波长特性对外腔半导体激光器调谐范围的影响[J]. *光学学报*, 2001, **21**(8): 975~979