

文章编号 1004-924X(2005)03-0339-09

基于马赫-曾德尔干涉仪的全光逻辑异或门理论研究

潘 炜^{1,2}, 邹龙方¹, 罗 斌¹, 邹喜华¹

- (1. 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, 四川 成都 610031;
2. 电子科技大学 宽带光纤传输与通信系统技术重点实验室, 四川 成都 610054)

摘要:基于半导体光放大器(SOA)和线性光放大器(LOA)构成的马赫-曾德尔干涉仪(MZI),从速率方程出发,模拟了LOA的泵浦放大和增益箝制特性,建立了SOA-MZI和LOA-MZI结构全光异或门数值模型,通过控制探测光功率和偏置电流,实现了两路40 Gbit/s信号的异或运算。并通过求解速率方程,对异或运算的结果进行了分析和比较;从器件结构上对2种异或门运算结果的差异给出了解释。结果表明:SOA和LOA中载流子恢复时间限制了信号处理速度;合理控制偏置电流和探测光功率可以提高信号处理能力;LOA具有增益箝制作用,对输入信号的扰动具有不敏感性;与SOA-MZI异或门相比,LOA-MZI异或门输出信号的消光比较高,功率较低;对于输出脉冲波形而言,LOA-MZI异或门性能优于SOA-MZI异或门。

关键词:马赫-曾德尔干涉仪;全光逻辑异或门;半导体光放大器;线性光放大器
中图分类号:TH744.3 **文献标识码:**A

Theoretical study of all optical XOR using Mach-Zehnder interferometer

PAN Wei^{1,2}, ZOU Long-fang¹, LUO Bin¹, ZOU Xi-hua¹

- (1. *Optical Communication and Devices Research Lab, School of Computer and Communication Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;*
- (2. *National Key Lab of Broad-band Fiber Transmission and Communication Network Technology, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054, China)*

Abstract: Two kinds of Mach-Zehnder interferometers (MZI) were constructed by semiconductor optical amplifier (SOA) and linear optical amplifier (LOA), respectively. Based on rate equations, the pumping amplification and gain clamped behaviors of LOA are simulated. With the control of probe beam power and bias current, all-optical XOR functionality is simulated using integrated SOA-MZI

收稿日期:2005-03-22;修订日期:2005-04-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 10174057; No. 90201011);教育部科学技术研究重点项目(No. 2005-105148);国家重点实验室开放课题(No. 2002KF);四川省应用基础科学研究(No. 03JY029-048-1)

and LOA-MZI numerical model at 40 Gbit/s. The performance of the XOR results is analyzed and compared by solving the rate equations numerically. The result differences of the XOR gates are explained from the structural properties. The theoretical results indicate that the high-speed operation is limited by the carrier recovery time in the SOA and LOA; the operation rate can be enhanced with appropriate bias current and probe beam power; LOA clamps the gain and improves tolerance against small signal distortion; the output signals of LOA-MZI have higher extinction ratio and lower power compared with SOA-MZI; LOA-MZI has better performance in output pulse shape than SOA-MZI.

Key words: Mach-Zehnder interferometer; all-optical logic XOR gate; semiconductor optical amplifier; linear optical amplifier

1 引言

快速发展的通信业务对通信网的带宽和容量都提出了更高的要求,基于电子信号处理技术的网络已难以满足需求。因此,使用全光信号处理技术的光网络将是未来网络的发展趋势。逻辑异或门(XOR)是全光信号处理的关键器件之一,它可以用于标签交换、数据编码、奇偶校验、信号再生等^[1-3]。

目前实现全光异或门的方法有多种。例如,利用非线性光纤环境(NOLM)^[2]、SOA-Sagnac 光纤干涉仪^[4]、超快非线性干涉仪(UNI)^[5]等。这些方法利用光纤的非线性效应实现异或门运算,具有数据处理速度快的优点。但是光纤的存在也使异或门结构变得复杂,难以集成。与之相比,由 SOA 构成马赫-曾德尔干涉仪(SOA-MZI)结构的异或门具有性能稳定、便于集成的优点。但是,由于 SOA 中载流子恢复时间(≈ 100 ps)较长,将导致输出脉冲的展宽,限制了信号处理速度^[6]。为了满足处理高速信号的需求,可以通过提高探测光功率,合理控制 SOA 的偏置电流,将载流子恢复时间减少到 10 ps 左右^[7]。

由于传统的 SOA 用于异或门时,常工作在增益饱和区。在多信道情况下,可能导致严重的串扰。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箝制,很好地解决了这一问题^[8-9]。在课题组研究垂直腔激光器(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^[10-12],本文从 LOA 的结构特点出发,建立了基于速率方程的模型;模拟了 LOA 的泵浦放大和增益箝制特性;建立了 SOA-MZI 和 LOA-MZI 结构全光异或门数值模型,通过合理控制探测光功率和偏置电流,实现了两路 40 Gbit/s 信号的异或运算;讨论了调制后的探测光相位与输出信号消光比的关系;分析了探测光功率对输出脉冲宽度的影响;对两种异或门输出信号的波形、功率、消光比等方面进行了研究和比较,从器件结构和基本特性方面出发,对差异给出了解释。

2 工作原理

基于 SOA-MZI 全光异或门原理如图 1 所示。SOA₁ 和 SOA₂ 对称地放置于干涉仪两臂。连续的探测光 λ_2 通过一个 3 dB 耦合器分解成 2 束光注入到干涉仪两臂。波长为 λ_1 的两路强度调制的信号光分别注入到 SOA₁ 和 SOA₂,信号光的峰值功率高于 SOA 的最大线性输入功率。当输入功率超过 SOA 的最大线性输入功率时,SOA 有源区内载流子密度就会发生改变,根据 Kramers-Kronig 关系,有源区的有效折射

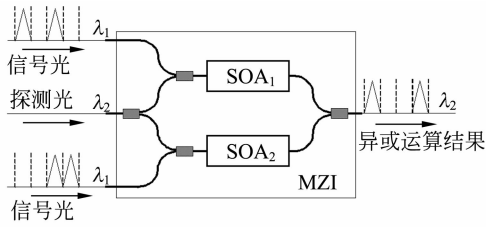


图1 基于 SOA-MZI 全光逻辑异或门结构示意图

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

率将会发生改变,导致通过 SOA 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 φ 沿光入射方向的变化为^[13]

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

式中 Γ 为模场限制因子, α 为线宽增强因子, g_{λ} 为增益。探测光经过 SOA 后就会携带上信号光的信息。两路经过相位调制的探测光在耦合器中发生干涉,将相位调制转换成振幅调制,完成两路信号的异或运算。

定义入射的光场为 $E_{in}(t)$, 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 MZI 传输矩阵可知输出光场 $E_{out}(t)$ 为^[12]

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} G_1(t)\exp[-j\varphi_1(t)] & 0 \\ 0 & G_2(t)\exp[-j\varphi_2(t)] \end{bmatrix} \times \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

由此,运算后信号的表达式为

$$P_{XOR}(t) = \frac{P_{in}}{4} \{ G_1(t) + G_2(t) - 2\sqrt{G_1(t)G_2(t)} \cos[\varphi_1(t) - \varphi_2(t)] \}, \quad (3)$$

式中 P_{in} 是输入的探测光功率。本文暂未考虑非对称结构的 MZI, 对于这种结构将另文讨论。基于 LOA-MZI 的全光异或门使用相同的结构, 仅将 MZI 干涉仪上的

SOA 替换成 LOA。

3 理论模型

3.1 SOA 模型

在半导体光放大器中,光脉冲传输方程为^[14]

$$\frac{1}{v_g} \frac{\partial E_{\lambda}(z, t)}{\partial t} + \frac{\partial E_{\lambda}(z, t)}{\partial z} = -\frac{i}{2} \alpha \Gamma g_{\lambda} E_{\lambda}(z, t) + \frac{1}{2} (\Gamma g_{\lambda} - \alpha_{in}) E_{\lambda}(z, t), \quad (4)$$

式中 $E_{\lambda}(z, t)$ 代表波长为 λ 的脉冲能量, v_g 为群速度, α 为线宽增强因子, Γ 为模场限制因子, α_{in} 为内部损耗, g_{λ} 为增益。为了能准确模拟 SOA 增益,使用下面的函数^[14]

$$g(\lambda, N) = \alpha_0 (N - N_0) - \gamma_1 (\lambda - \lambda_N)^2 + \gamma_2 (\lambda - \lambda_N)^3, \quad (5)$$

式中 α_0 为微分增益, N_0 为透明载流子密度, λ_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呈线性关系, $\lambda_N = \lambda_0 - k_0(N - N_0)$, λ_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。 γ_1 和 γ_2 为增益系数, 用于拟合增益曲线的参数, 分别用来表示增益带宽和增益的不对称性。

SOA 中载流子速率方程为

$$\frac{\partial N(z, t)}{\partial t} = \frac{I}{qV} - \frac{N(z, t)}{\tau_c} - \sum_{\lambda} \frac{\Gamma g_{\lambda} P_{\lambda}}{h\nu A_x}, \quad (6)$$

式中 I 为 SOA 的注入电流, q 为电子电量, V 为有源区体积, τ_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。 $h\nu$ 为光子能量, A_x 为有源区横截面积, P_{λ} 是波长为 λ 的光功率。

3.2 LOA 模型

与普通的 SOA 相比, LOA 在结构上相当于一个 SOA 和一个垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 在一个 InP 层上的集

成^[8,10,15],如图 2 所示。VCSEL 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)。VCSEL 工作在整个放大器的长度并且和入射光的方向垂直。VCSEL 形成的垂直光场(VCL)与入射光的光场相互作用,形成增益箝制。

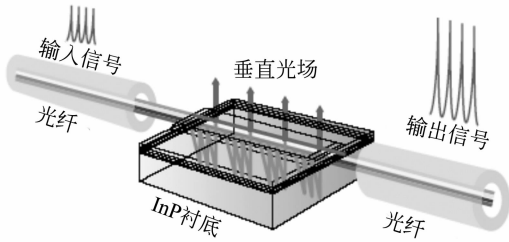


图 2 LOA 结构示意图^[8]

Fig. 2 Schematic structure of the LOA^[8]

LOA 中垂直入射光方向的 VCL 光子密度 L 可表示为^[9-11]

$$\frac{dL}{dt} = \Gamma_L \nu_g g_L L - \frac{L}{\tau_{ph}} + R_{sp,L}, \quad (7)$$

式中 Γ_L 为 VCL 限制因子

$$\Gamma_L = \frac{d}{d_L} \left(1 + \frac{\sin \eta d}{\eta d}\right) \approx 2 \frac{d}{d_L}, \quad (8)$$

其中 d 为有源区厚度, d_L 为垂直光场有效长度, η 为 VCL 传播常数, $g_L = a_0(N - N_0)$ 为 VCL 增益, VCL 激光波长的典型值为 1 550 nm。 τ_{ph} 是光子寿命, 对于 VCSEL 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

$$\frac{1}{\tau_{ph}} = \nu_g g_{th} = \nu_g \left(a_{in} + \frac{1}{d_L} \ln \frac{1}{R_L}\right), \quad (9)$$

R_L 为有源区上下两端 DBR 的反射率。与自发辐射相关的载流子复合速率 $R_{sp,L} = \beta(AN + BN^2 + CN^3)$, 这里定义自发辐射因子 β , 表征自发辐射对激光模的贡献份额。

在 SOA 的光脉冲传输方程、载流子速率方程基础上, 根据 LOA 的结构特点, 增加 VCL 的速率方程构成 LOA 模型^[9-11]。采用文献[16]提供的解法, 能很好地模拟脉冲在半导体光放大器中的传播过程。模

拟中用到的参数见表 1。

表 1 SOA 和 LOA 的典型参数

Tab. 1 Typical parameters of SOA and LOA

Symbol	Value	Explanation
L	500 μm	有源区长度
ω	1 μm	有源区宽度
d	0.2 μm	有源区厚度
d_L	4 μm	垂直光场有效长度
α_{in}	$2.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^{-1}$	内部损耗系数
N_0	$0.9 \times 10^6 \mu\text{m}^{-3}$	透明载流子密度
Γ	0.3	模场限制因子
α_0	$2.5 \times 10^{-8} \mu\text{m}^2$	微分增益
γ_1	7.4 μm^{-3}	增益系数 1
γ_2	31.55 μm^{-4}	增益系数 2
k_0	$3 \times 10^{-8} \mu\text{m}^4$	介质增益常数
A	0.1 ns^{-1}	非辐射复合系数
B	$2.5 \times 10^{-8} \mu\text{m}^3/\text{ns}$	双分子复合系数
C	$9.4 \times 10^{-14} \mu\text{m}^6/\text{ns}$	俄歇复合系数
ν_g	$7.5 \times 10^4 \mu\text{m}/\text{ns}$	群速度

通过仿真 LOA 的基本特性, 可以解释 LOA 用于逻辑异或门时与 SOA 表现出的不同。由于 LOA 是垂直表面激光场效应, 在光子转换和泵浦放大方面与 SOA 有明显的差异, 如图 3 所示。图 3 是输入信号为 -10 dB/m 时, LOA 中 VCL 的建立以及形成增益箝制的过程。当注入电流大于垂直光场的阈值电流 (≈ 100 mA) 时, VCL 光子密度增加很快, 消耗了大量载流子, 对输出信号形成了增益箝制, 表现为输出信号的功率不再随注入电流的增大而增加。相比之下, SOA 的输出功率随偏置电流的

增加在不断增加。因此,当偏置电流有微小的波动时,对 LOA 输出信号都不会产生很大的影响。

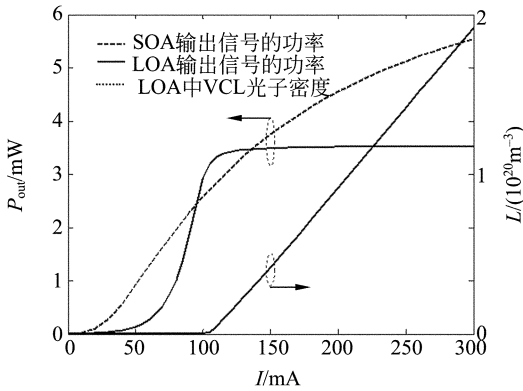


图 3 注入电流与输出功率和 VCL 光子密度的关系
Fig. 3 Output power and VCL photon density vs injection current

图 4 为输入光功率与增益之间的关系。与 SOA 相比,LOA 的增益曲线更为平坦^[8],随着 DBR 反射率的增加,增益的线性范围在增加。更有意义的是在非线性和 XGM 和 XPM 的物理过程可知,这将加深调制幅度,有利于输出信号获得较高的消光比。LOA 的增益箝制特性,还表现为对输入信号波长的不敏感性。几乎在整个 C 频段(1 525~1 565 nm),LOA 增益波动范围很小^[8]。DBR 反射率越大,LOA 对波长变化越不敏感,如图 5 所示。

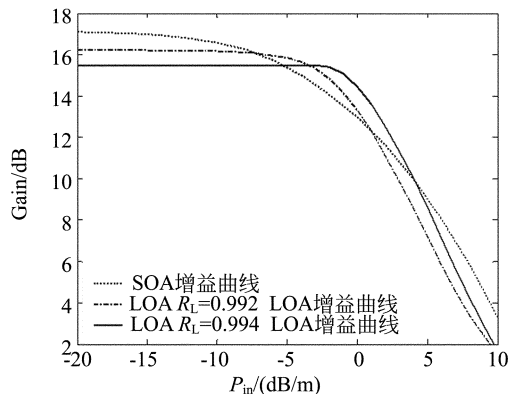


图 4 SOA 与 LOA 的光功率与增益关系
Fig. 4 Gain of SOA and LOA vs input power

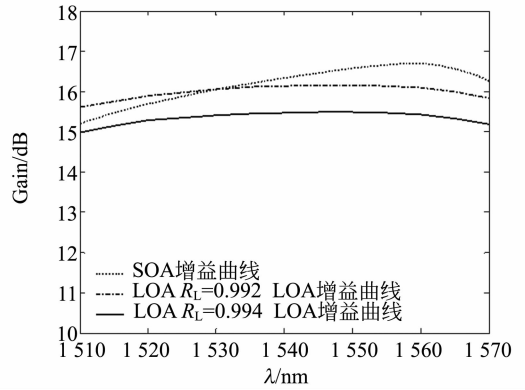


图 5 DBR 反射率为参变量的光波长与增益关系
Fig. 5 Gain of SOA and LOA vs input wavelength

由于 LOA 具有增益箝制作用,只要输入信号功率小于 LOA 的最大线性输入功率,LOA 中的载流子密度就不会发生改变,也就不会对探测光产生相位调制。所以基于 LOA 的异或门在“0”状态失真抗干扰度较高。

4 数值模拟

4.1 SOA-MZI 异或门模拟

在模拟 SOA-MZI 异或门时,取信号光波长为 1 570 nm,平均功率为 0 dB/m,用 1 阶高斯脉冲模拟信号光,以两路 40 Gbit/s 信号的异或为例,研究探测光功率对输出脉冲宽度的影响,以及 SOA-MZI 和 LOA-MZI 两种异或门的差别。探测光波长为 1 550 nm。为保证精度,每个脉冲周期采样 1 000 个点。

图 6 为两路信号经过 SOA-MZI 异或运算结果,此时,输入的探测光功率为 5 dB/m,由于受载流子恢复时间的限制,输出脉冲发生了展宽。

图 7(a)和(b)分别为干涉仪两臂输出的探测光的相位。探测光相移的上升时间很短,并且仅受输入信号的脉冲宽度影响。然而,受载流子恢复时间影响,相移的下降沿比较慢,导致了输出脉冲后沿的展宽。

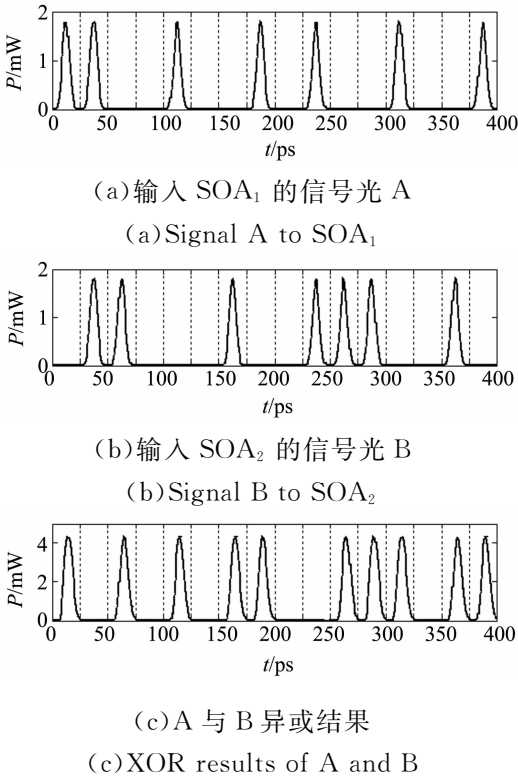


图 6 两路信号的逻辑异或运算

Fig. 6 Simulation results of all-optical logic XOR

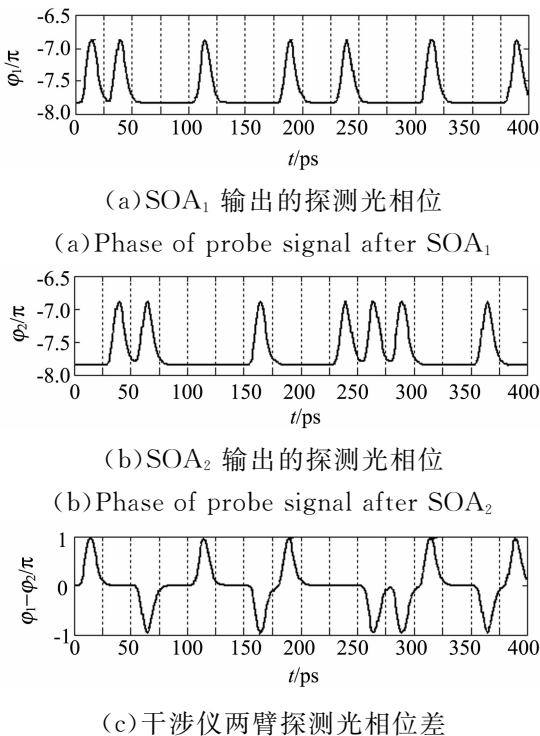


图 7 调制后的探测光相位图

Fig. 7 Phase of modulated probe signals

根据输入信号光和探测光的功率和波长,调整 SOA 的偏置电流 I ,使调制后的探测光相位 φ_1 和 φ_2 的最大值和最小值之差为 π ,如图 7(c)所示。由式(3)可知,在耦合器中发生干涉时,输出信号的消光比最大。

图 8 为从输出信号中取出一个脉冲周期进行归一化处理,与输入脉冲的对比图。受载流子恢复时间的限制,脉冲后沿的展宽比较明显,即产生“拖尾”现象。随着注入的探测光功率的增加,导致有源区内光子与载流子的相互作用增强,减少了载流子恢复时间,使脉冲后沿的展宽减小。由于器件本身的限制,探测光功率增大到一定值后,对输出脉冲宽度的压缩作用已不明显。

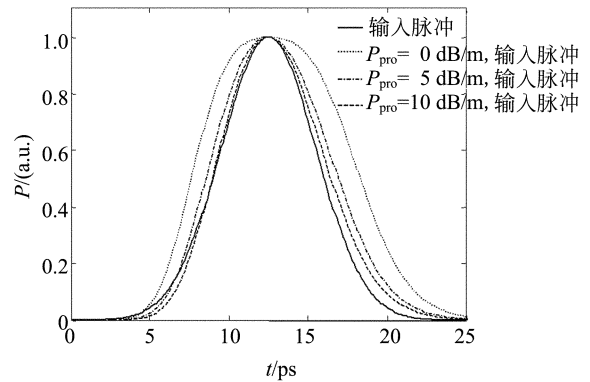


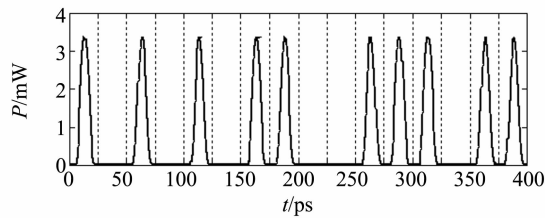
图 8 不同探测光功率下,输出的脉冲对比图

Fig. 8 Comparison of output pulse shapes for different probe signal powers

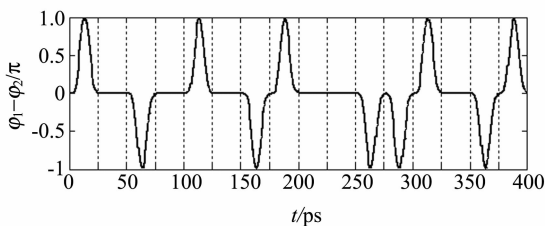
4.2 基于 LOA 和 SOA 的逻辑异或门对比

基于 LOA 和 SOA 的逻辑异或门使用相同的结构。图 9 和 10 分别为两路不同波长的信号光,分别通过两种异或门的运算结果。由于 LOA 中垂直光场消耗了部分载流子,输出光功率小于 SOA 构成的异或门的输出。也正是由于垂直光场的存在,使 LOA 的增益对一定范围内的波长具有不敏感性,如图 5 所示。所以当两路输入信号的波长不同时,LOA 对探测光的强度和相位调制幅度相同,输出的各个脉冲

强度相同。而 SOA 的增益对波长变化很敏感,干涉仪两臂上的 SOA 对探测光的强度和相位调制幅度不同。因此,异或运算后的各个脉冲强度也就不同,严重时可能导致误码。



(a) 异或结果
(a) XOR results



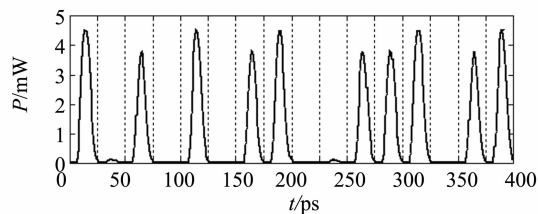
(b) 干涉仪两臂探测光相位差

(b) Difference of phase between MZI two arms

图9 输入两路信号波长不同时 LOA-MZI 输出
Fig. 9 In the case of different wavelengths of two input signals, the output of LOA-MZI

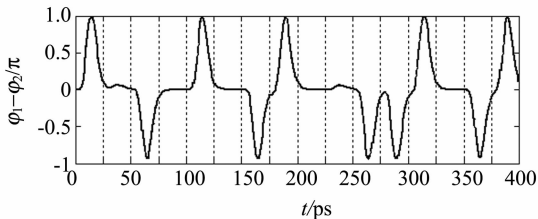
图 11 为从 LOA 和 SOA 的输出信号中取出一个脉冲周期进行归一化处理,与输入脉冲的对比图。LOA 中垂直光场起到了“蓄水池”的作用,加速了有源区内光子与载流子的相互作用,虽然输出脉冲比输入脉冲略有展宽,但与 SOA 相比,输出脉冲后沿的“拖尾”现象消失,这对于高速信号处理是非常有益的。

图 12 为输入不同强度的探测光时,两种异或门输出信号的消光比和功率对比图。由前文分析可知,在非线性区域 LOA 比 SOA 增益曲线的斜率更大,因此,LOA-MZI 比 SOA-MZI 异或门输出信号的消光



(a) 异或结果

(a) XOR results



(b) 干涉仪两臂探测光相位差

(b) Difference of phase between MZI two arms

图10 输入两路信号波长不同时 SOA-MZI 输出
Fig. 10 In the case of different wavelengths of two input signals, the output of SOA-MZI

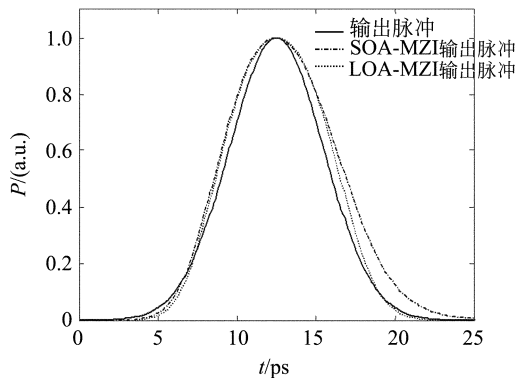


图 11 输出脉冲(基于 LOA 和 SOA 的逻辑异或门)与输入脉冲对比图

Fig. 11 Comparison of pulse shapes between input and output (using LOA and SOA)

比高。当探测光功率小于 6 dB/m 时,LOA 中垂直光场消耗了部分载流子,导致 LOA-MZI 输出功率较小。但是当探测光功率大于 6 dB/m 时,由于 SOA 芯片解理面剩余

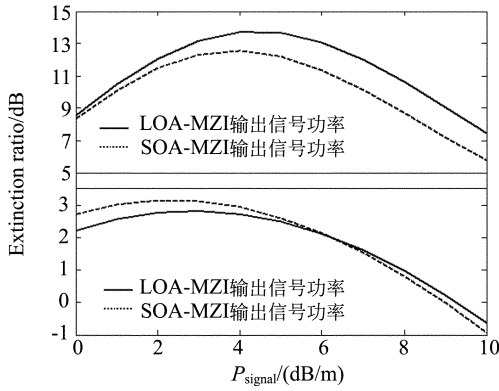


图 12 探测光功率与输出信号消光比和功率关系
Fig. 12 Output extinction ratio and power vs probe signal power

反射率的存在,SOA 的激射限制了有效偏置电流的增加,而 LOA 中垂直表面激光场效应限制了激射。此时,LOA-MZI 比 SOA-MZI 输出信号的功率大。过大的探测信号功率将使放大器处于深度饱和状态,消耗了大量载流子,削弱了光子与载流子的相互作用,导致输出信号的消光比和功率减小。对于模拟使用的参数,探测光功率在 4 dB/m 左右时,输出信号具有较高

的消光比和输出功率。

5 结 论

基于速率方程,建立了 SOA-MZI 和 LOA-MZI 全光异或门数值模型,实现了两路 40 Gbit/s 信号的逻辑异或运算。数值模拟结果表明:由于半导体光放大器中载流子恢复时间的限制,输出脉冲发生展宽,脉冲后沿展宽比较明显;通过提高探测光功率和增大偏置电流可以减少载流子的恢复时间、减小输出脉冲展宽;合理控制偏置电流和探测光功率可以提高输出信号的消光比。LOA 中 DBR 形成的垂直光场具有增益箝制作用,LOA 与 SOA 在光子转换效率和泵浦放大方面的差异,使 LOA 用于 MZI 型异或门时性能优于 SOA,表现为:对输入信号“0”状态失真具有不敏感性;当输入的两路信号光波长不同时,输出的各个脉冲强度仍保持相同;LOA 比 SOA 载流子恢复时间短,输出脉冲“拖尾”现象不明显;输出信号的消光比较高。

参考文献:

- [1] FJELDE T, KLOCH A, WOLFSON D, *et al.* Novel scheme for simple label swapping employing XOR logic in an integrated interferometric wavelength converter [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, 13 (7): 750-752.
- [2] HALL K L, RAUSCHENBACH K A. All-optical bit pattern generation and matching [J]. *Electronics Letters*, 1996, 32 (13): 1214-1215.
- [3] POUSTIE A J, BLOW K J, MANNING R J, *et al.* All-optical pseudorandom number generator [J]. *Optics Communications*, 1999, 159 (4): 208-214.
- [4] HOUBAVLIS T, ZOIROS K, VLACHOS K, *et al.* All-optical XOR in a semiconductor optical amplifier-assisted fiber Sagnac gate [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, 11 (3): 334-336.
- [5] ROBINSON B S, HAMILTON S A, SAVAGE S J. 40 Gbit/s all-optical XOR using a fiber-based folded ultrafast nonlinear interferometer [C]. Conference on Optical Fiber Communication, Technical Digest Series, 2002: 561-563.
- [6] FJELDE T, WOLFSON D, KLOCH A, *et al.* Demonstration of 20 Gbit/s all optical logic XOR in integrated SOA-based interferometric wavelength converter [J]. *Electronics Letters*, 2000, 36 (22): 1863-1864.

- [7] MANMING R J, DAVIES D A O, COTTER D, *et al.* Enhanced recovery rates in semiconductor laser amplifiers using optical pumping [J]. *Electronics Letters*, 1994, 30 (10): 787-788.
- [8] FRANCIS D, DIJAILI S P, WALKER J D. A single-chip linear optical amplifier [C]. *Conference on Optical Fiber Communication, Technical Digest Series*, 2001.
- [9] OKSANEN J, TULKKI J. On crosstalk and noise in an optical amplifier with gain clamping by vertical laser field [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21 (9): 1914-1919.
- [10] 潘炜, 张晓霞, 罗斌, 等. VCSELs 高阶分岔及混沌行为的参数控制 [J]. *电子学报*, 2004, 32 (11): 1789-1792.
PAN W, ZHANG X X, LUO B, *et al.* Study of parameter for higher order bifurcation and chaos behavior of VCSELs [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32 (11): 1789-1792. (in Chinese)
- [11] 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.
PAN W, ZHANG X X, LUO B, *et al.* Theoretical study of bistable and logic characteristics in vertical cavity semiconductor optical amplifier [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26 (2): 357-362. (in Chinese)
- [12] 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.
ZOU X H, PAN W, LUO B, *et al.* Effects of tilt angle on the performances of OADM using fiber Bragg grating [J]. *Optoelectronics · Laser*, 2004, 15 (8): 910-913. (in Chinese)
- [13] AGRAWAL G P, OLSSON N A. Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifiers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1989, 25 (11): 2297-2306.
- [14] YE Y B, ZHENG X P, ZHANG H Y. Study on the dynamic range of input power for wavelength converter based on cross-phase modulation in SOA [J]. *Optics Communications*, 2001, 200: 349-354.
- [15] 孙艳芳, 金珍花, 宁永强, 等. 高功率底发射 VCSELs 的制作与特性研究 [J]. *光学精密工程*, 2004, 12 (5): 449-453.
SUN Y F, JIN Z H, NING Y Q, *et al.* Fabrication and experimental characterization of high power bottom-emitting VCSELs [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12 (5): 449-453. (in Chinese)
- [16] 李均, 黄德修, 孙军强, 等. 光脉冲在半导体光放大器中传输的计算机模拟 [J]. *光学精密工程*, 2003, 11(1): 68-74.
LI J, HUANG D X, SUN J Q, *et al.* Computer simulation of optical pulses propagation in semiconductor optical amplifiers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(1): 68-74. (in Chinese)

作者简介:潘 炜(1959—),男,湖南人,西南交通大学教授、博士生导师,通信工程系主任,主要研究方向为量子理论、半导体微腔激光器、光信息处理;
邹龙方(1976—),男,黑龙江人,西南交通大学硕士研究生,主要研究方向为半导体光放大器、光信息处理。zoulongfang@xinhuanet.com