

文章编号: 1001-3806(2009)03-0314-05

## 基于半导体光放大器的新型全光逻辑与门

邵宇挺, 罗斌\*, 潘炜

(西南交通大学 信息科学与技术学院 光通信与光器件研究所, 成都 610031)

**摘要:** 为了实现基于半导体光放大器的全光逻辑与门, 采用了在半导体光放大器构成的马赫-曾德尔干涉仪的基础上, 注入外部连续光的方法。以半导体光放大器速率方程为基础, 对设计方案进行了理论分析和仿真验证, 取得了不同重复周期、不同脉冲宽度的光脉冲序列经过全光逻辑与门操作后的输出数据。结果表明, 该方案能对传输速率为10Gbit/s 或以下的信号进行正确与运算, 同时, 外光注入可以有效提高半导体光放大器信号处理速度。这一结果对基于半导体光放大器的全光逻辑的设计是有帮助的。

**关键词:** 光通信; 半导体光放大器; 交叉相位调制; 马赫-曾德尔干涉仪; 全光逻辑与门

**中图分类号:** TN929.11 **文献标识码:** A

### Novel all-optical logic AND gate based on semiconductor optical amplifier

SHAO Yu-ting, LUO Bin, PAN Wei

(Institute of Optical Communication and Devices, School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** With the aid of external optical injection, a novel all-optical logic gate based on Mach-Zehnder interferometer composed of semiconductor optical amplifier (SOA-M-ZI) was proposed. Meanwhile, by means of rate equations of the SOA, the logic AND gate was simulated and analyzed. As a result, the logic AND gate can process signals with transmission speed of 10Gbit/s or below, and the external optical injection can effectively enhance the signal processing speed of SOA. It is useful to design all-optical logic gates based on SOA.

**Key words:** optical communication; semiconductor optical amplifier; cross-phase modulation; Mach-Zehnder interferometer; all-optical logical AND gate

### 引言

随着人们对通信网络速度和容量要求的不断提高, 全光信号处理在高速光网络中广泛应用。全光逻辑门是全光信号处理的关键器件, 可以实现全光标签提取, 全光解复用, 全光地址识别等<sup>[1]</sup>。目前对全光逻辑门的研究主要集中在利用光纤和半导体光放大器的非线性效应方面<sup>[2-12]</sup>。由于光纤的非线性效应较弱, 基于光纤非线性效应的全光逻辑门<sup>[2-5]</sup>要求高功率输入开关信号或者长光纤才能达到理想的开关效率。而半导体光放大器 (semiconductor optical amplifier, SOA) 由于其低开关功率和尺寸较小易于集成的特性, 受到了越来越广泛的关注。至今国内外文献已经报道了一些基于 SOA 实现的全光逻辑门, 其中许多是逻辑

异或门<sup>[6-8]</sup>, 而实现全光逻辑与门的设计方案相对较少, 例如, ZHANG<sup>[9]</sup>利用两级 SOA 交叉增益调制实现与门, 这种方案中 SOA 载流子寿命是限制器件工作速率提高的重要因素; TSIKOS<sup>[10]</sup>利用超快速非线性干涉仪实现与门, 这种方案需要对输入光的偏振进行严格控制, 器件结构复杂, 且偏振和相位的随机变化对输出结果有较大影响。

基于半导体光放大器构成的马赫-曾德尔干涉仪 (Mach-Zehnder interferometer, M-ZI) 的全光逻辑器件具有工作速率高、尺寸小、功耗低和易于集成等优点<sup>[11]</sup>, 但是到目前为止, 国内外还没有基于 SOA-M-ZI 结构实现全光逻辑与门的文献报道。作者提出了基于 SOA-M-ZI 和外光注入的全光逻辑与门设计方案。介绍了所提方案实现全光与门的工作原理, 从 SOA 载流子速率方程出发, 给出其理论模型, 对设计方案进行数值模拟。

### 1 全光与门的设计方案和工作原理

基于 SOA-M-ZI 和外光注入的新型全光与门设计方案如图 1 所示。波长为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的光信号从  $IN_1$ ,

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20030613007)

作者简介: 邵宇挺 (1982-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为全光逻辑器件。

\* 通讯联系人。E-mail: bluo\_swjtu@163.com

收稿日期: 2008-03-19; 收到修改稿日期: 2008-05-29

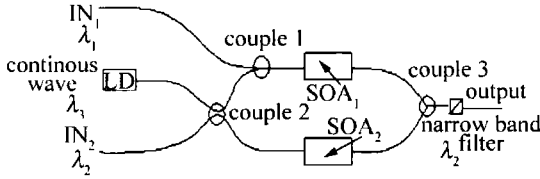


Fig. 1 The scheme of all-optical AND

IN<sub>2</sub> 口输入,全光逻辑与门运算结果从 output 口输出,波长为 λ<sub>2</sub>。该全光与门设计方案中包括 1 个连续光激光器,2 个配置相同的 SOA,1 个中心波长调谐在 λ<sub>2</sub> 的光滤波器以及 3 个 1:1 光耦合器,波长为 λ<sub>2</sub> 的光信号通过非对称型 M-ZI 干涉仪两臂的相位差为 π。在 IN<sub>2</sub> 输入为“0”的情况下,无论 IN<sub>1</sub> 输入为“0”或“1”,由于光滤波器的作用,输出信号总为“0”。在 IN<sub>2</sub> 输入为“1”的情况下,当 IN<sub>1</sub> 输入为“0”时,两个 SOA 对波长为 λ<sub>2</sub> 的光信号引起的相位差为 0,加上 M-ZI 干涉仪两臂自身引起的相位差,到达光耦合器 3 时总的相位差为 π,经过相干叠加、滤波后输出信号为“0”。当 IN<sub>1</sub> 输入为“1”时,两个 SOA 对波长为 λ<sub>2</sub> 的光信号引起的相差不再为 0,两路光信号到达光耦合器时的相位差不等于 π(理想情况下为 2π),相干叠加后输出信号为“1”。激光器向非对称型 M-ZI 干涉仪注入适当功率的连续光(波长为 λ<sub>3</sub>),减少 SOA 载流子恢复时间,提升器件工作速度,提高输出信号的消光比。

## 2 理论分析

### 2.1 载流子、光子变化方程

本文中全光逻辑与门设计方案是基于 SOA 的交叉相位调制实现的,首先引入 SOA 交叉相位调制的理论模型。在忽略自发辐射引起载流子消耗的情况下,该模型可通过以下两个方程来描述<sup>[13-14]</sup>:

$$\frac{\partial N(z,t)}{\partial t} = \frac{I}{qV} - [AN(z,t) + BN^2(z,t) + CN^3(z,t)] - \sum_w \frac{\Gamma g_w[N(z,t)]}{\hbar\omega_w S} P_w \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_w(z,t)}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial A_w(z,t)}{\partial t} = -\frac{i}{2} \beta_w \Gamma g_w(N) \times A_w(z,t) + \frac{1}{2} [\Gamma g_w(N) - \alpha] A_w(z,t) \quad (2)$$

式中,  $z$  表位置,  $t$  表时间,  $A_w(z,t)$  表示强度缓变脉冲包络,  $w$  表示入射光的序列号,以区别不同波长的入射信号,  $I$  表示 SOA 的注入电流,  $V$  表示 SOA 有源区体积,  $q$  表示单位电荷电量,  $S$  表示有源区横截面面积,  $\hbar\omega_w$  表示光子能量,  $P_w$  表示光功率,  $g_w(N)$  表示增益系数,是关于载流子浓度  $N$  的函数,  $\beta_w = -\frac{4\pi}{\lambda_w} \frac{dn}{dN}$  表示线宽增长因子,  $v_g$  表示群速度,  $\Gamma$  表示限制因子,  $\alpha$

表示材料损耗,  $\lambda$  表波长,  $A, B, C$  分别表示非辐射复合、自发辐射复合和俄歇复合。另外,如果考虑增益系数与波长的关系,可写成<sup>[14-15]</sup>:

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

式中,  $a$  为差分增益系数,  $\gamma_1, \gamma_2$  分别为 2 阶增益常数和 3 阶增益常数,  $\lambda_N = \lambda_0 - k_0(N - N_0)$  表示增益峰值波长,  $\lambda_0$  为透明载流子对应的峰值波长(透明峰值波长),  $k_0$  为波长漂移系数,  $N_0$  为透明载流子浓度。

为方便计算光信号在 SOA 传输过程中功率和相位的变化,把  $A_w(z,t)$  写成如下形式<sup>[13]</sup>:

$$A_w(z,t) = \sqrt{P_w} \exp(i\phi_w) \quad (4)$$

式中,  $P_w, \phi_w$  分别表示光脉冲的功率和相位。

将(4)式代入式(2)式得:

$$\frac{\partial P_w}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial P_w}{\partial t} = [\Gamma g_w(N) - \alpha] P_w \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi_w}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial \phi_w}{\partial t} = -\frac{1}{2} \beta_w \Gamma g_w(N) \quad (6)$$

式中,(5)式是 SOA 中光功率随传输位置和时间变化,(6)式是相位随传输位置和时间变化。

### 2.2 外光注入对 SOA 载流子变化的影响

结合载流子速率方程,分析外部连续光注入对 SOA 载流子变化的影响。当一路信号光注入 SOA 时,不考虑载流子在 SOA 中的空间分布,载流子速率方程为:

$$\frac{\partial N(t)}{\partial t} = \frac{I}{qV} - \frac{N(t)}{\tau_c} - \frac{\Gamma g_s[N(t)]}{\hbar\omega_s S} P_s(t) \quad (7)$$

在有外光注入的情况下,载流子方程可写成:

$$\frac{\partial N(t)}{\partial t} = \frac{I}{qV} - \frac{N(t)}{\tau_c} - \frac{\Gamma g_c[N(t)]}{\hbar\omega_c S} P_c - \frac{\Gamma g_s[N(t)]}{\hbar\omega_s S} P_s(t) \quad (8)$$

式中,  $P_c, P_s(t)$  分别为连续光和信号光的输入功率,  $\tau_c = (A + BN + CN^2)^{-1}$  表示载流子寿命。为了方便讨论外光注入对载流子恢复时间的影响,暂时不考虑增益系数和波长的关系,将(3)式简化为:

$$g(N) = aN \quad (9)$$

该简化不会对讨论结果产生本质影响。将(9)式代入(8)式得:

$$\frac{\partial N(t)}{\partial t} = \frac{I}{qV} - \frac{N(t)}{\tau_c} - \frac{\Gamma a P_c}{\hbar\omega_c S} N(t) - \frac{\Gamma g_s[N(t)]}{\hbar\omega_s S} P_s(t) \quad (10)$$

式中,  $P_c$  是连续光输入功率,不随时间变化,故  $\frac{\Gamma a P_c}{\hbar\omega_c S}$  也不随时间变化。定义  $\tau' = \left( \frac{\Gamma a P_c}{\hbar\omega_c S} \right)^{-1}$ , (10)式变化为:

$$\frac{\partial N(t)}{\partial t} = \frac{I}{qV} - \frac{N(t)}{\tau} - \frac{\Gamma g_s[N(t)]}{\hbar\omega_s S} P_s(t) \quad (11)$$

式中,  $\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_c} + \frac{1}{\tau'}$ ,  $\tau$  为有效载流子寿命<sup>[16]</sup>。比较(7)式和(11)式, 由于  $\tau < \tau_c$ , 所以外部连续光注入可以减小 SOA 载流子的恢复时间。

### 3 全光与门的数值模拟

结合第2节中的理论模型, 为了计算 SOA 中载流子和光功率的关系, 将 SOA 沿长度方向平均分成若干段, 并假设在每一小段中载流子和光子均匀分布, 每小段中载流子和光子的变化关系如下:

$$\frac{\partial N_j(z,t)}{\partial t} = \frac{I}{qV} - \frac{N_j(z,t)}{\tau_c} - \sum_w \frac{\Gamma g_{w,j}[N_j(z,t)]}{\hbar\omega_w S} \bar{P}_{w,j} \quad (12)$$

式中,  $j$  表示 SOA 的段序号, 以区别不同段,  $\bar{P}_{w,j}$  表示每段中的平均光功率, 其计算方法如下:

$$\bar{P}_{w,j} = \frac{1}{\Delta L} \int_{(j-1)\Delta L}^{j\Delta L} P_{w,j-1} \times \exp[\Gamma g_w(N_j) - \alpha] z dz = \frac{G_j - 1}{\ln(G_j)} P_{w,j-1} \quad (13)$$

式中,  $G_j = \exp[\Gamma g_w(N_j) - \alpha] \Delta L$ ,  $\Delta L$  为 SOA 每段长度,  $P_{w,j-1} (j \geq 1)$  是 SOA 中第  $j-1$  段的输出光功率。

根据(5)式、(12)式、(13)式, 以及光功率  $P_{w,j-1}$ , 就可求得  $P_{w,j}, N_j$ 。实际计算时可以从  $P_{w,0} = P_{w,in}$  (输入光功率) 开始, 可以依次求出在每段 SOA 中的载流子密度以及各波长光信号功率。再利用 SOA 各段的载流子密度, 根据(6)式可以求得光脉冲通过 SOA 后的相位变化。

利用上述方法求得波长为  $\lambda_2$  的光信号经过马赫-曾德尔干涉仪两臂 SOA 后的功率和相位, 再计算它们相干叠加后的光功率, 即为全光与门的输出光功率。其计算方法如下:  $P_{out} = P_{out1} + P_{out2} +$

$$2 \sqrt{P_{out1} \times P_{out2}} \cos(\pi + \phi_1 - \phi_2) \quad (14)$$

式中,  $P_{out1}, P_{out2}$  和  $\phi_1, \phi_2$  分别表示波长为  $\lambda_2$  经过非对称型 SOA-M-ZI 两臂 SOA 到达耦合器 3 时的功率和相位,  $\pi$  是非对称 M-ZI 两臂的相位差。

利用上述计算方法, 对基于 SOA-M-ZI 和外光注入的全光逻辑与门进行数值模拟。计算过程中采用的参量如表 1 所示。

Table 1 The parameter for numerical simulation

active region length $L$	500 $\mu\text{m}$
active region width $W$	2 $\mu\text{m}$
active region thickness $D$	0.15 $\mu\text{m}$
material gain constant $a$	$2.5 \times 10^{-20} \text{m}^2$
nonradiative recombination coefficient $A$	$1.0 \times 10^8 \text{s}^{-1}$
bimolecular recombination coefficient $B$	$2.5 \times 10^{-17} \text{m}^3/\text{s}$
auger recombination coefficient $C$	$9.4 \times 10^{-41} \text{m}^6/\text{s}$
internal loss $\alpha$	$4000 \text{m}^{-1}$
confinement factor $\Gamma$	0.24
gain spect run coefficient1 $\gamma_1$	$7.4 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$
gain spect run coefficient2 $\gamma_2$	$3.155 \times 10^{25} \text{m}^{-4}$
wavelength shift coefficient $k_0$	$3.0 \times 10^{-32} \text{m}^4$
carrier density at transparency $N_0$	$1.1 \times 10^{24} \text{m}^{-3}$
wavelength at transparency $\lambda_0$	1550nm

图 2 和图 3 所示为在有、无外光注入情况下全光逻辑与门的工作过程。输入  $IN_1$  的波长为 1550nm, “1”时的功率为 2.5mW, 消光比为 20dB, 输入序列为

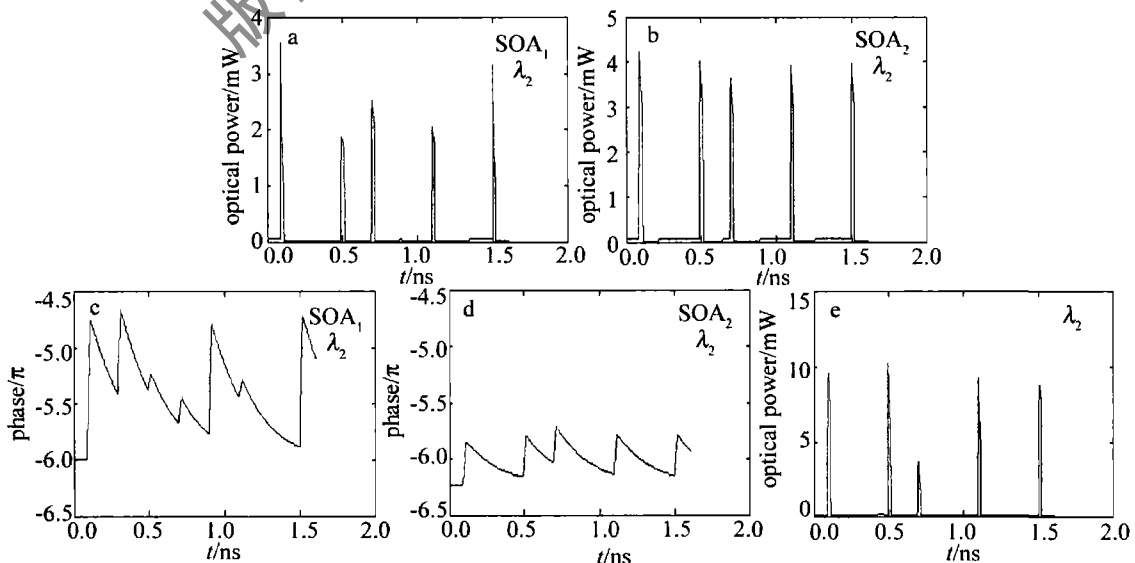


Fig. 2 The operation process of all-optical logic AND without external optical

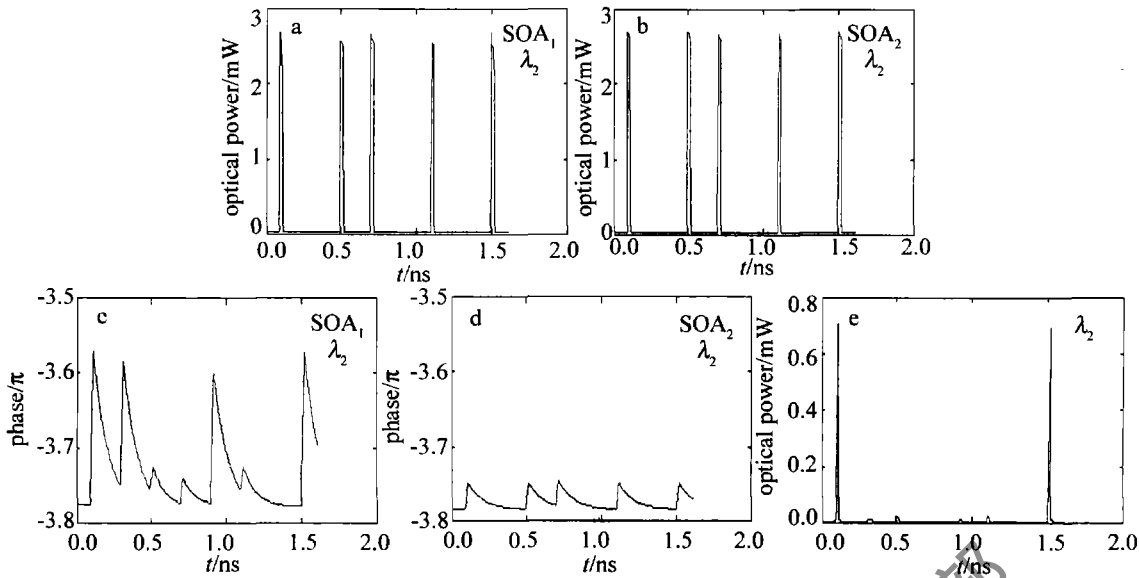


Fig. 3 The operation process of all-optical logic AND with extern optical at 4mW

“1,1,0,0,1,0,0,1”；输入  $IN_2$  的波长为 1560nm, “1”时的功率为 1mW, 消光比为 20dB, 输入序列为“1,0,1,1,0,1,0,1”；逻辑与门输出应为“1,0,0,0,0,0,0,1”。输入光信号为方波归零信号, 脉宽为 20ps, 重复周期为 200ps; 由激光器产生的连续光波长为 1558nm。

图2所示为外光注入功率为0时全光逻辑与门工作过程。从图2e可以看出, 在没有外光注入的情况下,  $IN_1$  为“0”,  $IN_2$  为“1”时, 与门存在误判现象, 输出光功率较大且不为定值。出现误判的主要原因是, 图2c和图2d中  $\lambda_2$  的光信号经过  $SOA_1$  和  $SOA_2$  时相位恢复时间较长, 在下一个信号到达时并未完全恢复。这样, 逻辑输出为“0”所要求的两臂之间的相位差没有满足, 导致输出光功率较大且不确定。

图3所示, 外光注入为 4mW 时全光逻辑与门工作过程。从图3e可以看出, 全光与门的输出结果完全正确。分析图3c和图3d, 此时经过  $SOA_1$  和  $SOA_2$  的波长为  $\lambda_2$  的光信号相位恢复时间显著减小, 在下一个信号到达时相位接近完全恢复。产生这样的结果是因为外光注入减小了载流子的恢复时间。

图4所示为有、无外光注入情况下载流子的恢复时间。在没有外光注入的情况下 SOA 载流子恢复时间如图4a所示, 载流子恢复时间约为 1ns。图4b所示为外光注入功率为 4mW 时, 载流子的恢复情况, 从图中可以看出, 此时载流子的恢复时间约为 0.1ns。比较图4a和图4b可以得出, 注入光的输入大大减小了载流子的恢复时间。该结果符合 2.2 节中的理论分析。

由于全光逻辑与门的最后输出光波长为  $\lambda_2$ , 所以当  $IN_2$  为“0”时, 无论  $IN_1$  为“0”或“1”, 输出“0”的效果较好; 而当  $IN_2$  为“1”,  $IN_1$  为“0”时, 输出“0”的效果相对较差。定义  $R$  为全光逻辑与门的消光比, 表示

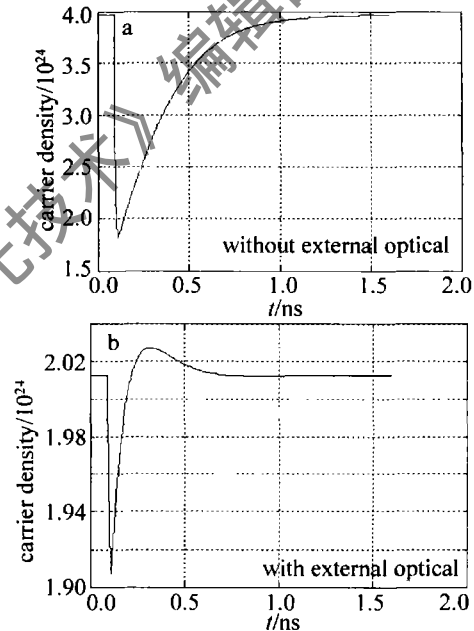


Fig. 4 Carrier recovery time of SOA with or without external optical

$IN_2$  为“1”,  $IN_1$  分别为“1”和“0”时的输出功率之比;  $G$  为全光逻辑与门的增益, 表示  $IN_2$  为“1”,  $IN_1$  为“1”时逻辑与门的输出功率与  $IN_1$  的输入功率之比。图5所示为各输入光功率变化对  $R$  和  $G$  的影响。从图5a可以看出, 外光注入功率变化对  $R$  和  $G$  影响较大, 注入功率越小  $R$  越小而  $G$  越大, 为获得器件较好的工作性能应选择适当的功率值。信号光  $P_1$  的功率对  $G$  影响较大, 这是由于  $P_1$  功率较小时,  $SOA_1$  对波长为  $\lambda_2$  的光信号引起的相位变化较小, 交叉相位调制效果不明显; 而当  $P_1$  功率过大时,  $SOA$  深度饱和, 无法进一步改变波长为  $\lambda_2$  的信号光的相位。从图5b可以看出  $P_1$  功率在 2.5mW ~ 3.5mW 时, 器件有较好的工作性能。从图5c可以看出,  $P_2$  的功率变化对  $R$  和  $G$  有较弱的影响,  $P_2$  的功率越小  $G$  和  $R$  越大。因此,  $P_2$  的功

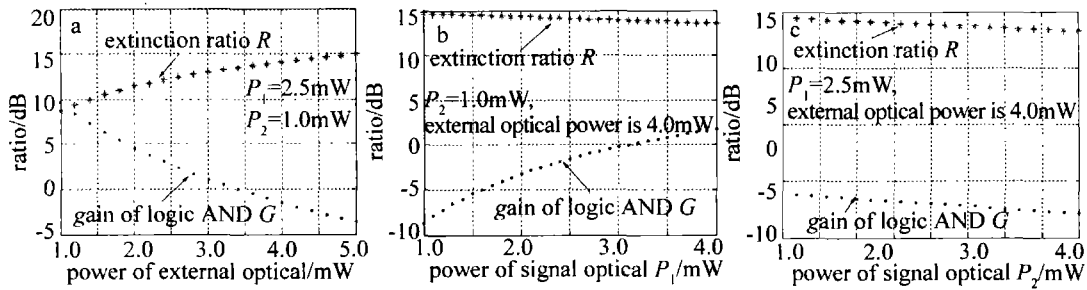


Fig. 5 The effect of input optical power on the output optical

率应尽量取较小值。

图 6a ~ 图 6c 所示为不同重复周期(脉冲宽度都为 20ps)对输出光效果的影响,从图 6a 中可以看出当

重复周期为 100ps 时,输出光消光比显著下降至约为 3dB,造成这种结果的主要原因是重复周期下降时,两脉冲间的时间间隔减小,载流子恢复的比例下降。而

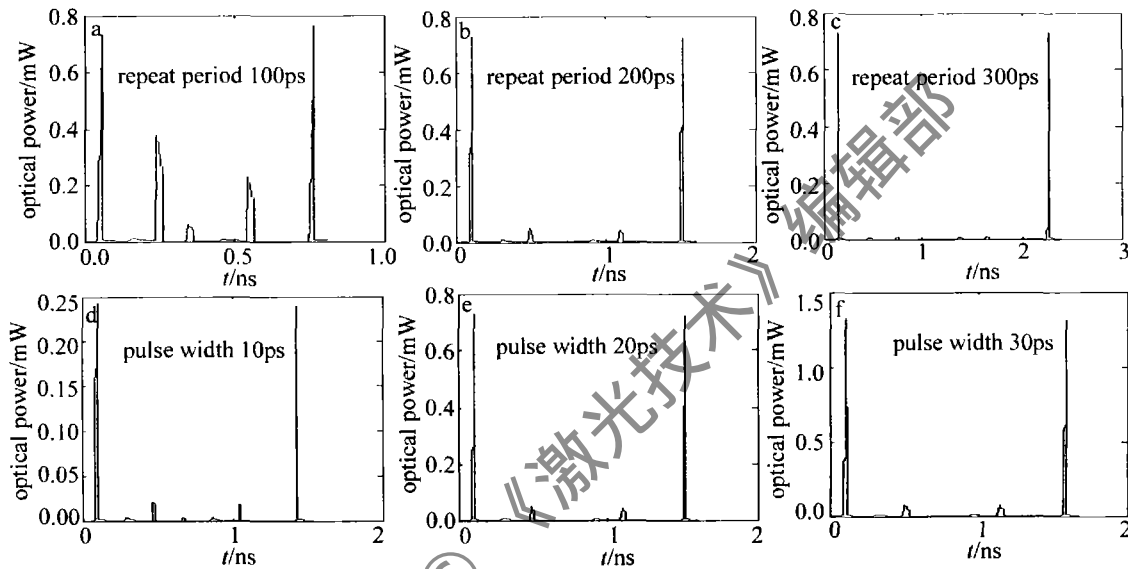


Fig. 6 The logic AND output with different repeat period and pulse width

反之当重复周期为 300ps 时,输出光消光比有明显提高,说明载流子恢复的比例增加。图 6d ~ 图 6f 所示为不同脉冲宽度(脉冲间间隔都为 180ps)对输出光效果的影响,从图中可以看出脉冲宽度变化对输出光的消光比影响不大。由此,脉冲间时间间隔大于 80ps 的信号适用于该全光逻辑与门,若信号脉冲宽度为 20ps,则传输速率为不大于 10Gbit/s 的信号适用于该全光逻辑与门。

### 4 结论

设计实现了基于 SOA-M-ZI 和外光注入的全光逻辑与门,并在输入信号为脉宽 20ps、重复周期 200ps 的光脉冲序列的情况下对该全光逻辑与门进行了详细分析,结果表明,外光和光功率  $P_1$  较大、光功率  $P_2$  较小时,全光逻辑与门具有较好的工作性能。同时对具有不同重复周期、不同脉冲宽度的光脉冲序列进入该全光逻辑与门的情况进行了数值模拟,从模拟结果可以得出,该全光逻辑与门适用于对传输速率为不大于 10Gbit/s 的信号进行处理。此外,全光逻辑与门的信号处理速度主要受限于 SOA 的载流子恢复时间,通过

采用载流子恢复时间较短的 SOA,该全光逻辑与门能在更高的传输速率下工作。

### 参考文献

- [1] STUBKJAEER K E. Semiconductor optical amplifier-based all-optical gates for high-speed optical processing [J]. IEEE Selected Topics J Q E, 2000, 6(6): 1428-1435.
- [2] DORAN N J, WOOD D. Nonlinear-optical loop mirror [J]. Opt Lett, 1998, 13(1): 56-58.
- [3] WHITAKER N A, AVRAMOPOULOS H J, FRNCH P M M, et al. All-optical arbitrary demultiplexing at 2.5 Gbit/s with tolerance to timing jitter [J]. Opt Lett, 1991, 16(23): 1838-1840.
- [4] HALL K L, RAUSCHENBACH K A. All-optical bit pattern generation and matching [J]. Electron Lett, 1996, 32(13): 1214-1215.
- [5] UCHIYAMA K, TAKARA H, MORIOKA T, et al. 100Gbit/s multiple-channel output all-optical demultiplexing based on TDM-WDM conversion in a nonlinear optical loop mirror [J]. Electron Lett, 1996, 32(21): 1989-1991.
- [6] ZOIROS K, HOUBAVLIS T, MACHOS K, et al. 10GHz boolean XOR with semiconductor optical amplifier fiber Sagnac gate [C]//Lasers and Electro-Optics, 1999, CLEO'99. Baltimore: CLEO, 1999: 397-397.
- [7] WANG Q, ZHU G H, CHEN H M, et al. Study of all-optical XOR using Mach-Zehnder interferometer and differential scheme [J]. IEEE J Q E, 2004, 40(6): 703-710.

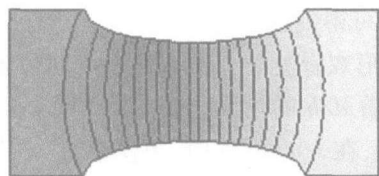


Fig. 7 Field pattern of dominant mode in ellipse ridged waveguide

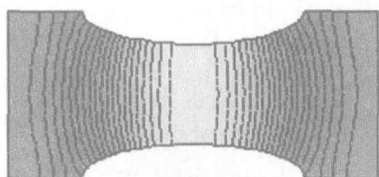


Fig. 8 Field pattern of first higher-order mode in ellipse ridged waveguide  
 越大。可见在脊状波导边部的电场密度较脊背之上大,坡印亭矢量也大,并且两边的电场密度对称分布并且相等。因此,波的主要能量是在脊背传输;随着脊  $d/b$  越小,即脊高越高,脊两侧电场密度越小,能量越集中脊背传输。(2)第1高次模的电场被劈分为对称的两部分,同样下陷部分比较稀疏,等值线稀疏的地方表示场强较小;被下陷部分分开的地方的两侧比较密集,等值线密的地方表示场强较大。

### 3 结论

作者采用有限元方法研究了圆形、椭圆形脊波导的传输特性,计算了脊在中心位置且脊的尺寸连续变化时的归一化截止波长、单模带宽以及场图,并给出了相应的比较结果和结论<sup>[11]</sup>,通过对圆形、椭圆形脊波导的截止波长和单模带宽的计算,可以看出:在  $d/b$  较小的情况下可以获得更高的单模带宽;在主模场分布中,在两脊间场强最大,向两侧逐渐减小。通过这些研究表明:可以扩大脊波导传输特性的调节范围,这对以后变形双脊波导的应用和研究提供有价值的参考,这对实际的微波和毫米波工程的发展研究提供了有价值

的理论依据,并且用有限元方法计算圆形、椭圆形脊波导的传输特性问题,编程简单、计算量小,一般微机就能解决实际工程问题。

### 参 考 文 献

- [1] LU M, LEONARD P J. Dependence of ridge position on the cutoff wavelength of the dominant mode in single ridge waveguides [J]. Microwave and Optical Technology Letter, 2002, 55(34): 374-377.
- [2] McKAY M, HELSZAJN J. Voltage-current definition of impedance of single-ridge waveguide [J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1999, 9(2): 66-68.
- [3] QIU D, KLYMYSHYN D M, PRAMANICK P. Ridged waveguide structures with improved fundamental mode cutoff wavelength and bandwidth characteristics [J]. International Journal of RF Microwave Computer-Aided Engineering, 2002, 12(2): 190-197.
- [4] LU M, LEONARD P J. Design of trapezoidal-ridge waveguide by finite-element method [J]. Microwave Antennas and Propagation Proceedings, 2004, 151(3): 205-211.
- [5] ZHU M Z, LIANG Ch H. A MoM calculation of the lowest cutoff frequencies of uniform waveguides by conformal mapping [J]. Journal of Xidian University, 2006, 33(5): 709-711 (in Chinese).
- [6] BU A T. Method & its new development [J]. Journal of Xidian University, 2001, 28(1): 3-5 (in Chinese).
- [7] DENG S F, YANG X Q, CHENG Y Zh. Ridged waveguides eigenvalue analysis based on finite element method [J]. Electronic Warfare Technology, 2005, 20(1): 43-46 (in Chinese).
- [8] ZHANG X J, SONG W M. Characteristic calculation of unsymmetrical ridged waveguide [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 22(5): 825-828 (in Chinese).
- [9] JARVIS D A, RAO T C. Design of double-ridged rectangular waveguide of arbitrary aspect ratio and ridge height [J]. IEEE Proceedings-Microwaves Antennas and Propagation, 2000, 147(1): 31-34.
- [10] RONG Y, ZAKI K A. Characteristics of generalized rectangular and circular ridge waveguides [J]. Microwave Theory and Techniques, 2000, 48(2): 258-265.
- [11] LI Y, LU M, CHEN X Q. Research of the cutoff characteristic of the dominant mode in ridge-trough waveguides [J]. Laser Technology, 2007, 31(4): 442-444 (in Chinese).

(上接第 318 页)

- [8] BINTJAS C, KALYVAS M, THEOPHILOPOULOS G, et al. 20Gbit/s all-optical XOR with UNI gate [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(7): 834-836.
- [9] ZHANG X L, DONG J J, WANG Y, et al. Experimental and theoretical investigation on novel all-optical logic and gates [J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(5): 2066-2071 (in Chinese).
- [10] TSIOKOS D, KEHAYAS E, VYRSOKINOS K, et al. 10Gbit/s all-optical half-adder with interferometric SOA Gates [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(1): 284-286.
- [11] ZOU L F, PAN W, LUO B, et al. Theoretical analysis on all optical XOR using linear optical amplifier [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 54(5): 2066-2071 (in Chinese).
- [12] CHENG Zh J, YU Ch X. All optical wavelength conversion in semiconductor optical amplifier(SOA) [J]. Laser Technology, 2000, 24(3): 158-162 (in Chinese).
- [13] AGRAWAL G P, OLSSON N A. Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifiers [J]. IEEE J Q E, 1989, 25(11): 2297-2306.
- [14] DONG J J, ZHANG X L, WANG Y, et al. Extinction ratio characteristics of wavelength converters based on single-port-coupled SOA [J]. Laser Technology, 2005, 29(1): 14-17 (in Chinese).
- [15] YE Y B, ZHENG X P, ZHANG H Y, et al. Study on the dynamic range of input power for wavelength converter based on cross-phase modulation in SOAs [J]. Opt Commun, 2001, 200(1/6): 349-354.
- [16] ZHANG L, KANG I, BHARDWAJ A, et al. Reduced recovery time semiconductor optical amplifier using p-type-doped multiple quantum wells [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(22): 2323-2325.