

新型全光逻辑与门的理论和实验研究^{*}

张新亮[†] 董建绩 王 颖 黄德修

(华中科技大学光电子工程系, 武汉 430074)

(2004 年 8 月 6 日收到, 2004 年 10 月 4 日收到修改稿)

提出一种基于级联单端半导体光放大器(SOA)中交叉增益调制效应的新型全光逻辑与门,建立了该方案的理论模型,数值模拟和实验实现了 10Gb/s 的全光逻辑与运算功能,分析了逻辑与运算结果与输入信号功率和消光比之间的关系,理论分析结果与实验结果相符合.

关键词: 半导体光放大器, 交叉增益调制, 全光逻辑与门

PACC: 4260D, 4265C, 4280S

1. 引 言

全光信号处理在高速光通信网络和光计算中有广泛应用,而全光逻辑门是光信号处理中的关键功能,可以实现全光头信号提取、全光地址识别、全光解复用以及全光开关^[1-4]等等.目前文献中报道的实现全光逻辑与门主要是采用半导体光放大器(SOA)非线性光环镜^[1]、交叉偏振^[2]和四波混频^[3]等效应来实现的,这种方案具有很多优点,但也存在一些问题,如结构复杂、难以控制、偏振和相位的随机变化对输出结果影响较大等.

本文采用一种基于级联单端 SOA 中的交叉增益调制效应来实现全光逻辑与门,对 10Gb/s 的逻辑运算进行了理论分析、数值模拟和实验研究,结果表明该方案结构简单、容易实现、工作波长范围宽、可实现转换速率高等优点.描述了实验方案和实验条件,建立了该方案的理论分析模型,给出了实验和数值计算结果.

2. 实验方案和工作原理描述

新型全光逻辑与门方案如图 1 所示,10Gb/s 误码测试仪提供信号光,信号光经掺铒光纤放大器

(EDFA1)放大后再经耦合器分成两路,其中一路信号光 A 和可调谐激光器提供的连续光(探测光)经耦合器合路后再经环形器耦合进 SOA1.在 SOA1 中可以实现基于交叉增益调制效应的波长转换,信号光携带的信息会转换到探测光上,但探测光上携带的信息与原信息反相.第一级 SOA 输出的信号经环形器输出再经过 EDFA 放大后,经带通滤波器滤出转换输出的信号(对准探测光波长).另一路信号光 B 经可调谐延时线延时后和第一级转换输出的信号一起经耦合器和环形器耦合进 SOA2,适当控制第一级转换输出的信号功率远远大于延时后的信号光功率.这样,当第一级转换输出的信号为比特“1”时,SOA2 的增益被抑制,无论信号光为“1”还是“0”,输出为“0”;而当第一级转换输出的信号为比特“0”,信号光为“1”时输出为“1”,而信号光为“0”时输出为“0”.经带通滤波器滤出的信号(对准信号光波长)就是信号光 A 和适当延时后的信号光 B 的逻辑与运算结果.输出的信号经光谱分析仪和通信信号分析仪进行分析.需要说明的是,该方案中为了改善逻辑与运算的输出结果,采用了单端耦合的 SOA^[5],理论和实验表明单端耦合 SOA 有助于提高波长转换输出的消光比^[6],而转换输出消光比的提高对改善逻辑与运算结果是有利的,在后面的理论和实验研究中会证明这一点.

^{*} 国家重大基础研究发展计划(批准号:G2000036605),国家高技术研究发展计划(批准号:2002AA312160)和国家自然科学基金(批准号:60407001)资助的课题.

[†] E-mail: xlzhang@mail.hust.edu.cn

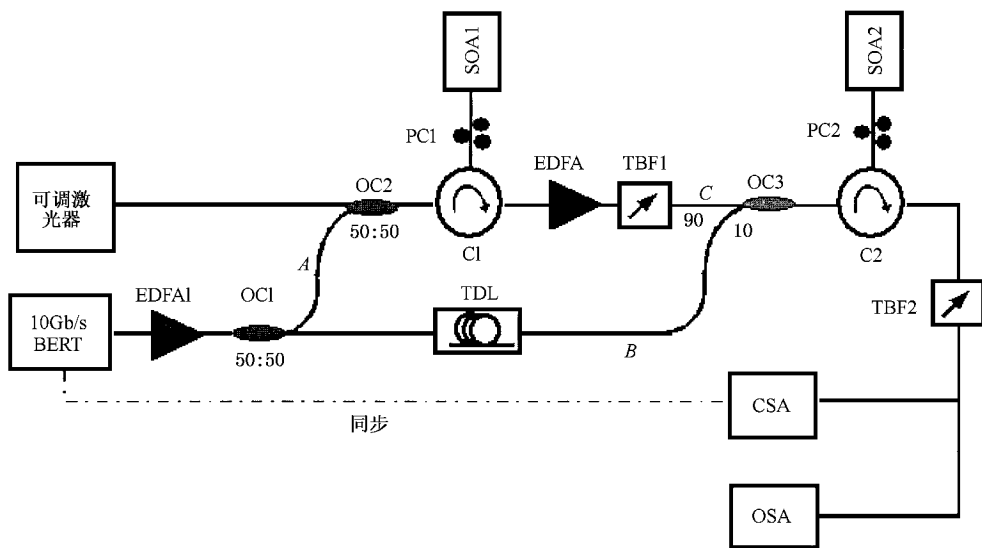


图 1 新型结构全光逻辑与门实验方案示意图

3. 理论模型

该方案的本质是基于级联的交叉增益调制型波长转换来实现全光逻辑与门,因而其理论模型与一般基于 SOA 的交叉增益调制型波长转换的理论模型类似.需要注意的是,本方案中采用的是单端耦合 SOA^[6] 对其进行动态分析要比一般 SOA^[7,8] 复杂得多.在忽略放大自发辐射引起载流子消耗的条件下,波长转换过程可用以下两个方程来描述:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{1}{eV} - R(N) - \sum_{i=s,c} \frac{\Gamma g_i(N)}{Ahc/\lambda_i} P_i^+ - \sum_{i=s,c} \frac{\Gamma g_i(N)}{Ahc/\lambda_i} P_i^- \quad (1)$$

$$\pm \frac{\partial P_i^\pm}{\partial z} = [\Gamma g_i(N) - \alpha_{int}] P_i^\pm \quad (2)$$

其中 N 是有源区中载流子浓度, I 是注入电流大小, e 是基本电荷量, V 是有源区体积, Γ 是模场限制因子, A 是横截面积, h 是普朗克常数, c 是真空中光速, 下标 $i = s, c$ 分别对应信号光和探测光, λ_i 是对应的波长, $g_i(N)$ 是对应波长的增益系数, 上标 \pm 分别对应正向和反向传播的光波, P_i^\pm 是对应的光功率, α_{int} 是有源区内部损耗系数. 其中的 $R(N)$ 是非辐射复合和自发辐射复合引起的载流子消耗, 一般可用经验公式表示为

$$R(N) = AN + BN^2 + CN^3 \quad (3)$$

式中 A, B 和 C 分别是缺陷复合、自发辐射复合和俄

歇复合系数. 另外在考虑增益谱的色散性和非对称性情况下, 增益系数可以表示为

$$g_i(N) = g_N(N - N_0) - r_2(\lambda_i - \lambda_p)^2 + r_3(\lambda_i - \lambda_p)^3 \quad (4)$$

式中 g_N 是微分增益系数, N_0 是透明载流子浓度, r_2 和 r_3 分别是与增益色散和增益谱不对称性相关的常数, λ_p 是对应特定载流子浓度的增益峰值波长, 并可表示为

$$\lambda_p = \lambda_0 - k_0(N - N_0) \quad (5)$$

其中 λ_0 是对应透明载流子浓度的增益峰值波长, k_0 是波长漂移系数.

为了准确模拟载流子沿 SOA 有源区长度方向的分布, 可以采用分段模型来进行数值模拟. 如图 2 所示, 端面反射率为 R_1 和 R_2 的 SOA 被均匀分成 M 段, 每一段中载流子浓度可以认为是均匀的, 并且将反射端面等效到有源区之外, 忽略有源区不同分段之间载流子浓度变化引起折射率改变导致的反射. 由于采用的是单端耦合 SOA, 因此输出信号也是从反射率为 R_1 的前端面输出.

根据前面的理论模型, 有源区第 j 小段 ($j = 1, \dots, M$) 的载流子浓度 N_j 和输出光功率 $P_{i,j+1}^+$ 和 $P_{i,j}^-$ 可由以下几个方程得到:

$$\frac{\partial N_j}{\partial t} = \frac{1}{eV} - R(N_j) - \sum_{i=s,c} \frac{\Gamma g_i(N_j)}{Ahc/\lambda_i} P_{i,j}^+ - \sum_{i=s,c} \frac{\Gamma g_i(N_j)}{Ahc/\lambda_i} P_{i,j+1}^- \quad (6)$$

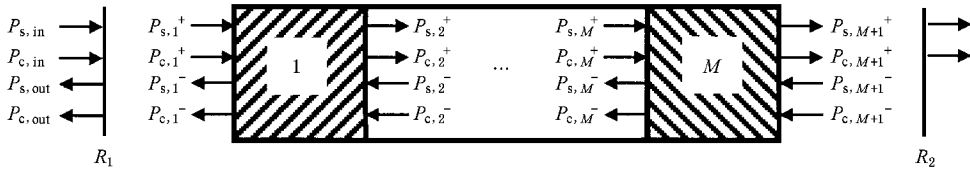


图 2 SOA 分段模型示意图

$$P_{i,j+1}^+ = P_{i,j}^+ \exp[(\Gamma g_i(N_j) - \alpha_{int})\Delta z], \quad (7)$$

$$P_{i,j}^- = P_{i,j+1}^- \exp[(\Gamma g_i(N_j) - \alpha_{int})\Delta z], \quad (8)$$

其中 $\Delta z = L/M$ 是每一段的长度. 另外求解以上方程的边界条件可表示为

$$P_{i,M+1}^- = P_{i,M+1}^+ \cdot R_2, \quad (9)$$

$$P_{i,out}^- = P_{i,l}^- \cdot (1 - R_1), \quad (10)$$

$$P_{i,l}^+ = P_{i,in}^+ \cdot (1 - R_1) + P_{i,l}^-. \quad (11)$$

求解以上方程组需要用打靶法求出有源区各段内部载流子浓度分布的初始值,再基于该初值结合龙格库塔方法算出输入光功率变化引起的有源区载流子浓度的变化,载流子浓度求出后就可以算出随时间变化的输出光功率. 第一级转换输出的光信号和延时后的光信号一起进入第二个 SOA 中,采用相同的方法决定第二个 SOA 中的载流子浓度分布,就可以决定最终输出的光信号功率.

4. 结果与分析

4.1. 实验结果

基于图 1 所示的实验方案,对不规则的比特流“1110110010001110”(信号 A)及延时一位后的比特流“0111011001000111”(信号 B)的逻辑与运算结果如图 3 所示. 图中最上面的波形对应信号 A,中间的波形对应信号 B,最下面的波形对应 A 和 B 的逻辑与运算结果. 此时进入第一级 SOA 的两路光功率分别为 -1.2dBm 和 -11.6dBm ,进入第二级 SOA 的两路光功率分别为 -12dBm 和 2dBm .

此种方案中第一级转换输出的信号进入第二个 SOA 之前,其功率需要合理地放大,如果放大的功率不够,逻辑与运算的输出结果不是很完善. 为了描述逻辑与运算的输出信号质量,引入一个参数 R ,定义为 $R = P_{01}/P_{11}$,其中 P_{01} 是信号 A 为比特“0”而信号 B 为比特“1”的逻辑与运算输出功率, P_{11} 是信号 A 为比特“1”而信号 B 也为比特“1”的逻辑与运算输

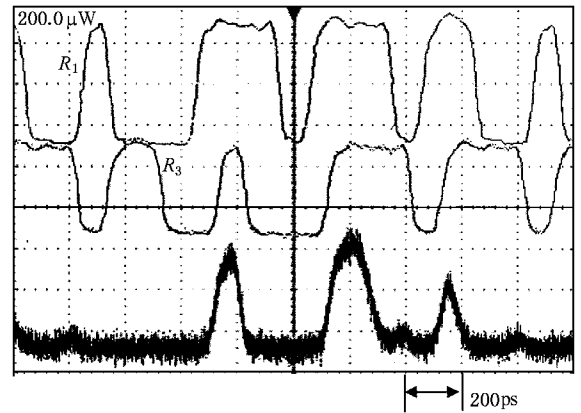


图 3 10Gb/s 全光逻辑与门运算实验结果

输出功率. 理想情况下, P_{01} 应该为 0,但如果第一级转换输出(信号 C)的光功率或者消光比不够大, P_{01} 会不为 0,此时即代表逻辑与运算的输出结果不完善. 图 4 所示为实验测得的不同第一级转换输出功率条件下参数 R 的大小. 此时对应的信号 B 的功率为 -12dBm ,信号 A 的比特流为“1110”,信号 B 的比特流为“1101”,图中小方框对应的是不完善的逻辑与运算结果,对应的信号 C 的功率为 -0.4dBm . 图 4 可以看出,信号 C 的功率越大,逻辑与的输出结果

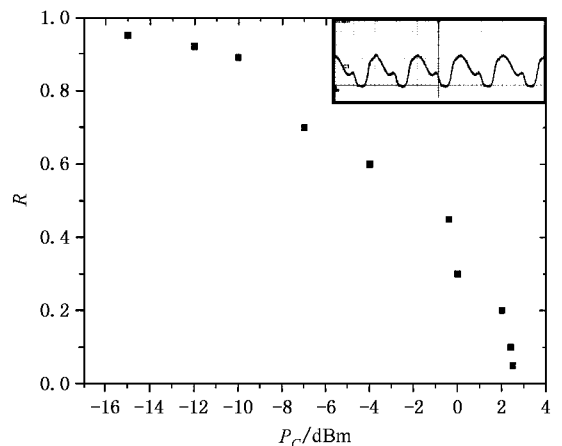


图 4 逻辑与输出信号质量与信号 C 的功率之间的关系

质量越好.但需要指出的是,信号 C 的功率越大,逻辑与运算结果输出功率越小,可见输出功率与输出质量之间存在一定的矛盾.

4.2. 数值分析

为了进一步验证以上实验结果,利用第 3 节提出的理论模型对新型全光逻辑与门的工作过程进行数值模拟,并数值计算表征逻辑与输出性能的参数 R 与工作条件之间的关系.计算中采用的参数如表 1 所示,单端 SOA 前端面反射率设为 0,后端面反射率设为 1%.

图 5 所示为基于上节提到的理论模型对全光逻辑与门工作过程的数值模拟结果.图 5(a)为 10Gb/s 的比特序列“1100”的波形,图 5(b)为信号 A 延迟一

个比特位之后得到的信号 B 的波形,比特序列为“0110”,图 5(c)为第一级波长转换输出结果,可见该输出结果刚好是信号 A 的反相,图 5(d)是第二级 SOA 输出的结果,可见该输出信号刚好是信号 A 与信号 B 的逻辑与运算结果.由于采用了单端耦合 SOA,第一级转换输出信号消光比和第二级逻辑与输出信号消光比都大于 10dB.

表 1 计算采用的参数值

SOA 的长度 L/m	5.0×10^{-4}	损耗系数 α_{int}/m^{-1}	2000
SOA 的宽度 w/m	2.0×10^{-6}	光场限制因子 Γ	0.3
SOA 的厚度 d/m	0.15×10^{-6}	增益常数 r_2/m^{-3}	7.4×10^{18}
微分增益系数 g_N/m^2	4.5×10^{-20}	增益常数 r_3/m^{-4}	3.155×10^{25}
复合系数 c_1/s^{-1}	2.5×10^8	波长漂移系数 k_0/m^4	3.0×10^{-32}
复合系数 $c_2/m^3 \cdot s^{-1}$	3.0×10^{-16}	透明载流子浓度 N_{tp}/m^{-3}	0.9×10^{24}
复合系数 $c_3/m^6 \cdot s^{-1}$	9.4×10^{-41}	透明波长 λ_{tp}/m	1.605×10^{-6}

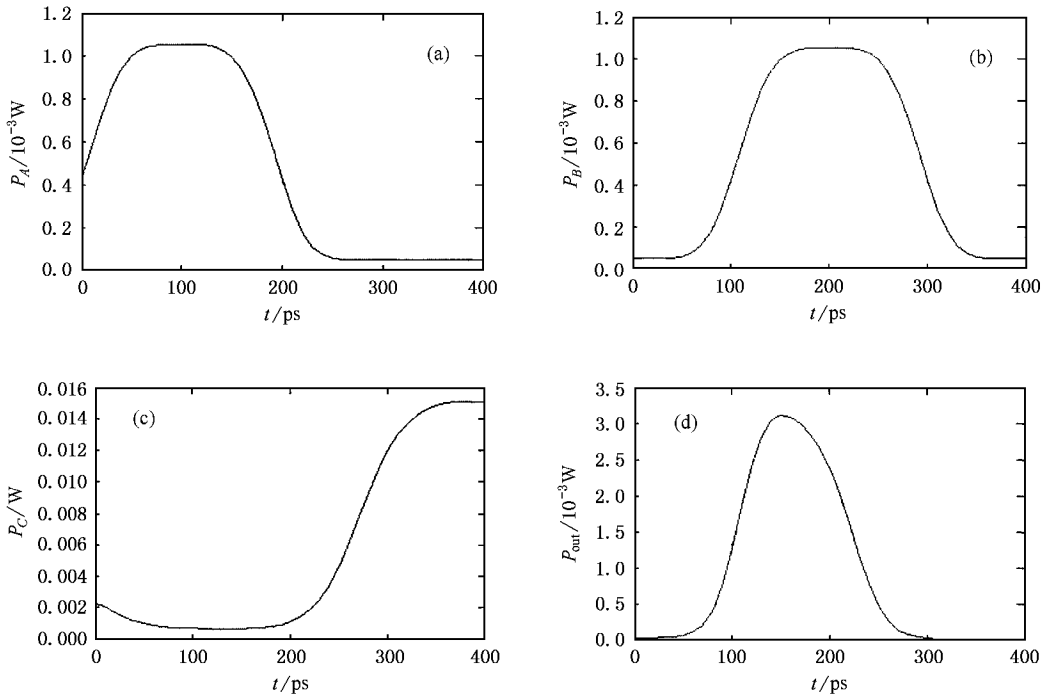


图 5 新型全光逻辑与门工作过程的数值模拟.(a)信号 A 的波形 (b)信号 B 的波形 (c)第一级转换输出波形 (d)信号 A 与 B 的逻辑与运算结果

图 6 所示为计算得到描述逻辑与输出质量的参数 R 与第一级转换输出的光功率(信道 C 光功率)之间的关系.可见数值计算的结果与前面实验测试的结果基本符合.由于实际采用放大器的结构参数很难准确确定,计算的结果与测试的结果还是存在一定的偏差.图中实线对应的是输入抽运光消光比为 13dB 时的结果,虚线对应的是输入抽运光消光比为 10dB 时的结果,可见输入的消光比对运算输出的信号质量也有较大的影响,输入信号的消光比越高,

逻辑与的运算输出质量越好.实际上输入信号消光比越高,第一级转换输出的消光比也越高,这样进入第二级 SOA 的信号“0”和“1”功率相差越大,即“1”信号时 SOA 饱和的越深,因而逻辑与的输出信号质量越好.本方案中由于采用了单端 SOA,第一级转换输出的消光比得以提高,才使得能实现任意格式的逻辑与运算功能.

以上理论和实验研究都验证了采用级联的单端耦合 SOA 中的交叉增益调制效应可以实现全光逻辑

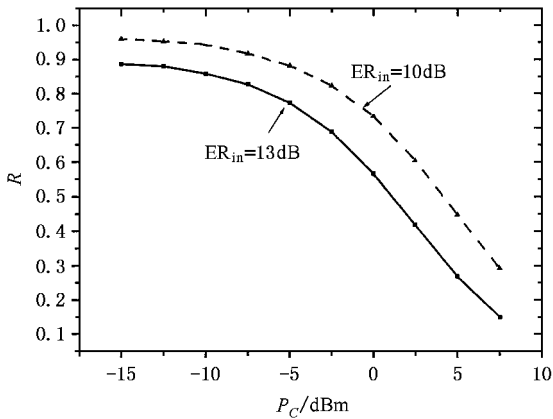


图 6 不同输入消光比条件下参数 R 与信道 C 功率之间关系

辑与运算功能,并表明逻辑与运算输出信号质量与第一级转换输出信号功率密切相关.由于是基于交叉增益调制效应,该方案与交叉增益调制型波长转换具有相同的特点^[8],如结构简单容易实现、转换效率高、工作波长范围宽等优点.另外交叉增益调制型

波长转换最高工作速率可达 100Gb/s ^[9],合理选择工作条件,该方案也有望实现 100Gb/s 的全光逻辑与门.

5. 结 论

全光逻辑与门是全光信号处理中的关键功能,是目前研究的热点.本文提出一种基于级联半导体光放大器中交叉增益调制效应的新型全光逻辑与门,建立了适合该方案的理论分析模型,对 10Gb/s 的全光逻辑与运算进行了实验研究和数值模拟,并从理论和实验两个方面研究了不同条件下逻辑与运算输出性能与工作条件之间的关系.研究表明,该方案能够实现任意格式的全光逻辑与运算功能,第二级半导体光放大器的输入信号功率和消光比对逻辑与运算的输出性能起决定性的作用,采用单端 SOA 有助于输出性能的改善.

- [1] Poustie A J et al 1998 *Opt. Commun.* **156** (11) 22
 [2] Soto H et al 2002 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14** 498
 [3] Nesses D et al 1995 *Proceeding of OFC* Optical Society of America, Washington, D. C. 1995) Paper TuD2
 [4] Wang Y et al 2004 *Chin. Phys.* **13** 882
 [5] Zhang X L et al 2004 *Optics Express* **12** 361

- [6] Zhang X L et al 2001 *Chin. Phys.* **10** 124
 [7] Xu F et al 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2165 [in Chinese] 徐帆等 2004 *物理学报* **53** 1256]
 [8] Durhuus T et al 1996 *IEEE J. Lightwave Technol.* **14** 942
 [9] Ellis A D et al 1998 *Electron. Lett.* **34** 1958

Experimental and theoretical investigation on novel all-optical logic AND gates^{*}

Zhang Xin-Liang Dong Jian-Ji Wang Ying Huang De-Xiu

(*Department of Optoelectronic Engineering , Huazhong University of Science and Technology , Wuhan 430074 , China*)

(Received 6 August 2004 ; revised manuscript received 4 October 2004)

Abstract

A novel scheme based on cross-gain modulation in cascaded single-port-coupled semiconductor optical amplifier(SOA) is studied theoretically and experimentally. Theoretical model for the single-port-coupled SOA is established for theoretical simulation and performance evaluation. The 10Gb/s all-optical logic AND operation has been demonstrated theoretically and experimentally. A parameter is exploited to evaluate the output performance. Results show that the output performance is tightly related to input power and input extinction ratio. Theoretical calculation results are in agreement with the experimental results.

Keywords : single-port-coupled SOA , cross-gain modulation , all-optical logical AND gate

PACC : 4260D , 4265C , 4280S

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. G2000036605), the National High Technology Development Program of China (Grant No. 2002AA312160) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60407001).