

논문 2006-43SD-1-3

병렬 SOA-MZI 구조들을 이용한 XOR, NOR, OR, 그리고 NAND 기능들을 가진 전광 복합 논리 게이트들

(All-Optical Composite Logic Gates with XOR, NOR, OR, and NAND Functions using Parallel SOA-MZI Structures)

김 주 엽*, 한 상 국*

(Joo-Youp Kim and Sang-Kook Han)

요 약

병렬 SOA-MZI 구조들을 이용하여 XOR, NOR, OR, 그리고 NAND 기능들을 가진 전광 복합 논리 게이트들을 제안하고 10Gbps에서 실험적으로 구현했다. 제안된 구조는 높은 소광 비를 가지며 복합적인 논리 기능들을 동시에 수행할 수 있다.

Abstract

We have proposed and experimentally demonstrated the all-optical composite logic gates with XOR, NOR, OR, and NAND functions using SOA-MZI structures to make it possible to simultaneously perform various logical functions. The proposed scheme is robust and feasible for high speed all-optical logic operation with high ER.

Keywords: All-optical logic gate, SOA-MZI, XOR, NOR, NAND

I. 서 론

초고속 광통신 네트워크를 구성할 때, 전광 논리 데이터 처리장치는 스위칭, 신호 재생, 어드레싱, 헤더 인식, 데이터 인코딩과 암호화, 그리고 패턴 매칭 등의 네트워크 기능들을 구현하는데 있어서 필수적이다^[1]. 그 장치를 구현하기 위하여, SOA (semiconductor optical amplifier)의 비선형 현상들을 이용하는 다양한 형태의 전광 논리 소자들이 보고되었다. 그 중에서 XPM (cross phase modulation) 현상을 이용하는 SOA-MZI (SOA - Mach-Zehnder interferometer) 구조는 저 전력 소모, 단순성, 집적성, 안정성을 가지고 있을 뿐 아니라 높은 소광 비와 함께 신호 재생을 할 수 있으며 낮은 chirp을 가지고 있기 때문에 상용화시기에 가장 적합

하다고 볼 수 있다^[2]. SOA의 XGM (cross gain modulation) 현상을 이용한 전광 NOR 게이트는 이미 널리 알려져 있지만 SOA-MZI 구조를 이용하는 전광 XOR와 AND 게이트들은 최근에 보고되었다^{[3][4]}. 그러나 SOA-MZI 구조를 이용하는 전광 NAND 게이트는 아직 보고된 적이 전혀 없다. 모든 논리 동작들은 NOR와 NAND 게이트들의 논리 조합들을 이용하여 수행할 수 있기 때문에 미래의 초고속 광통신 네트워크에서는 XOR, NOR, 그리고 NAND 기능들을 가지고 집적된 전광 논리 게이트들이 필수적으로 사용될 것이다.

본고에서는 XPM 현상을 이용하는 SOA-MZI 구조들을 병렬 형태로 적용하여 XOR, NOR, OR, 그리고 NAND 기능을 가진 전광 복합 논리 게이트들을 구성하고 10Gbps에서 실험적으로 검증하였다. 그리고 그 구조들에 맞게 제안한 수식들을 이용하여 SOA-MZI들 내에서 요구되는 최적의 광 이득 및 위상 차이를 검출 및 적용시켜 출력 광 신호들이 최대 소광 비를 갖도록 만든다.

* 학생회원 ** 정회원, 연세대학교 전기전자공학과
(Dep. of Electrical and Electronic Eng., Yonsei Univ.)
접수일자: 2005년11월11일 수정완료일: 2005년12월26일

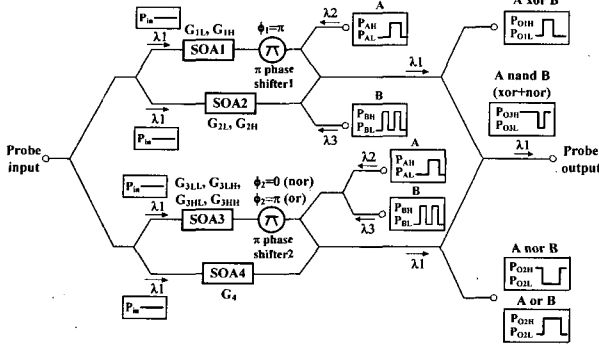


그림 1. XOR, NOR, OR, 그리고 NAND 기능을 가진 전광 복합 논리 게이트들의 구성도
Fig. 1. Schematic diagram of all-optical composite logic gates with XOR, NOR, OR, and NAND functions.

II. 동작 원리

제안된 전광 복합 논리 게이트들이 그림 1에서 보여진다. 그림 1에서 위쪽 MZI는 XOR 기능을 수행하고 아래쪽 MZI는 NOR와 OR 기능들을 수행하게 되는데, XOR와 NOR 게이트들의 출력이 합해져서 NAND 기능을 구현한다. P_{in} 은 병렬로 구성된 두 개의 SOA-MZI들의 각각의 arm으로 들어가는 CW probe 입력 신호의 광 파워 레벨이다. P_{AL} 과 P_{AH} 그리고 P_{BL} 과 P_{BH} 는 각각 펌프 (pump) 입력 데이터 A와 B의 “0”과 “1” 논리 상태에 대응하는 광 파워 레벨들이다. 위쪽 MZI에서 $(P_{in}+P_{AL})$ 과 $(P_{in}+P_{AH})$ 의 레벨들이 SOA1에서 겪게 되는 광 이득들은 각각 G_{1L} 과 G_{1H} 이다. 마찬가지로 $(P_{in}+P_{BL})$ 과 $(P_{in}+P_{BH})$ 의 레벨들이 SOA2에서 겪게 되는 광 이득들은 각각 G_{2L} 과 G_{2H} 이다. 따라서 위쪽 MZI에서 간섭하게 되는 probe 출력 신호의 광 파워 레벨 ($P_{O1-AB}(\phi_1)$)은 아래의 식으로 표현된다^[5].

$$P_{O1-AB}(\phi_1) = P_{in}(G_{1A} + G_{2B}) + 2\sqrt{G_{1A} \cdot G_{2B}} \cos(\phi_1 + \Delta\phi_{XPM}) \quad (1)$$

여기서 첨자 A와 B는 각각 P_{AX} 와 P_{BX} 의 논리 상태 (X)를 의미하고, ϕ_1 은 위쪽 MZI의 양 arm들 사이의 광 위상차이고 $\Delta\phi_{XPM}$ 은 MZI의 양 arm에 있는 SOA들 사이에서 존재하는 XPM 차에 의한 상대적인 광 위상차를 나타낸다. 한편, 아래쪽 MZI의 위쪽 arm의 SOA3에서는 $(P_{in}+P_{AL}+P_{BL})$, $(P_{in}+P_{AL}+P_{BH})$, $(P_{in}+P_{AH}+P_{BL})$, 그리고 $(P_{in}+P_{AH}+P_{BH})$ 의 네 개의 레벨들이 각기 다른 광 이득들을 겪게 되는데, 그것들을 G_{3LL} , G_{3LH} , G_{3HL} , 그리고

G_{3HH} 로 정의한다. G_4 는 probe 입력 신호 P_{in} 이 아래쪽 arm의 SOA4에서 겪게 되는 광 이득이다. 따라서 아래쪽 MZI에서 간섭하게 되는 probe 출력 신호의 광 파워 레벨 ($P_{O2-AB}(\phi_2)$)은 아래의 식으로 표현된다.

$$P_{O2-AB}(\phi_2) = P_{in}(G_{3AB} + G_4) + 2\sqrt{G_{3AE} \cdot G_4} \cos(\phi_2 + \Delta\phi_{XPM}) \quad (2)$$

여기서 ϕ_2 는 아래쪽 MZI의 양 arm들 사이의 광 위상차를 나타낸다. 위 식(1)과 식(2)에서, 수식들을 간단하게 만들기 위하여 $P_{in}G_{1L}=P_{in}G_{2L}=a$, $P_{in}G_{1H}=P_{in}G_{2H}=b$, $P_{in}G_{3LL}=c$, $P_{in}G_{3LH}=P_{in}G_{3HL}=d$, $P_{in}G_{3HH}=e$, $P_{in}G_4=f$ 와 같은 광 이득 조건들을 부과할 수 있다. 추가적으로 XPM에 의한 광 위상 편이가 “1”의 논리 상태에서 π 이고 “0”의 논리 상태에서 0인 것을 가정하면 아래와 같은 진리표를 얻을 수 있다.

표 1. 제안된 구조에서 XOR, NOR, OR, 그리고 NAND 게이트들을 위한 최적화된 진리표
Table 1. Optimized truth table for XOR, NOR, OR, and NAND gates in the proposed scheme.

A	B	$\Delta\phi_{XPM}$		XOR($\phi_1=\pi$) a=c, b=d		NOR($\phi_2=0$) d=f \approx e		OR($\phi_2=\pi$) c=f, d \approx e		NAND (XOR+NOR)	
		XOR	NOR	O	P _{O1} ($\phi_1=\pi$)	O	P _{O2} ($\phi_2=0$)	O	P _{O2} ($\phi_2=\pi$)	O	P _{O3}
L	L	0	0	L	0	H	c+d+2√(cd)	L	0	H	c+d+2√(cd)
L	H	π	π	H	c+d+2√(cd)	L	0	H	d+f+2√(df)	H	c+d+2√(cd)
H	L	π	π	H	c+d+2√(cd)	L	0	H	d+f+2√(df)	H	c+d+2√(cd)
H	H	0	π	L	0	L	\approx 0	H	\approx d+f+2√(df)	L	\approx 0

위 표를 보면 우리가 제안한 구조에서 XOR, NOR, OR, 그리고 NAND 기능들을 가진 이상적인 전광 복합 논리 게이트들이 $\Delta\phi_{XPM}$ 을 포함하여 광 이득 및 위상 차이들을 위한 조건들을 최적화시킴에 의해 구현됨을 알 수 있다. 광 이득 차 및 $\Delta\phi_{XPM}$ 은 SOA들의 바이어스 (bias) 전류를 제어함으로써 최적화시킬 수 있고 광 위상차는 π 위상 시프터 (혹은 위상차 제어 수단)의 전압 (혹은 전류)을 제어함으로써 최적화시킬 수 있다. 최대의 소광 비는 양 MZI 모두에서 $\Delta\phi_{XPM}$ 이 0 혹은 π 에 근접했을 때 얻어질 수 있다. NAND 기능은 XOR와 NOR 게이트들의 합에 의해 수행된다. 그리하여 XOR, NOR, 그리고 NAND 게이트들이 동시에 동작될 수 있게 된다.

III. 실험

그림 2는 실험 setup을 보여준다. Probe 입력 신호 (P_{in})의 파장은 1539.45nm이고 광 파워는 0.4mW이다.

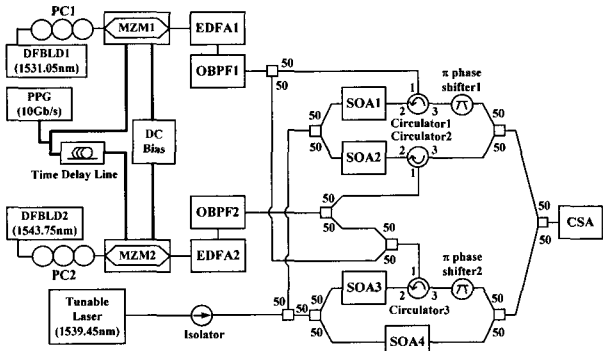


그림 2. 실험 셋업 EDFA: erbium-doped fiber amplifier, OBPF: optical band pass filter, CSA: communication signal analyzer.

Fig. 2. Experimental setup. EDFA: erbium-doped fiber amplifier, OBPF: optical band pass filter, CSA: communication signal analyzer.

두 병렬 MZI로 들어가는 두 펌프 입력 신호 (P_A 와 P_B)의 파장들은 각각 1531.05nm와 1543.75nm인데 양쪽 신호들 모두 “1”과 “0” 논리 상태 레벨들 (P_{AH} ($=P_{BH}$)와 P_{AL} ($=P_{BL}$))은 각각 0.95mW와 0.05mW이다. 펌프 입력 신호들은 마하젠더 변조기들 (MZM1과 MZM2)에 의해 외부 변조되어지는데 PPG (pulse pattern generator)에서는 2^7-1 PRBS (pseudo random binary sequence)의 NRZ (non-return-to-zero) 펄스패턴을 9.95328Gbps (OC192/STM64)의 비트 율로 내보낸다. MZM2 앞의 time delay line은 P_A 와 P_B 의 논리 조합들 (LL, LH, HL, 그리고 HH)을 만들기 위하여 사용된다. 우리는 앞장에서 설명한 동작원리에 따라서 소광 비를 최대 만들기 위하여 $\Delta\phi_{XPM}$ 을 포함하여 SOA들 사이의 광 이득 및 위상 차이들을 최적화시켰다. 그 결과로서 얻어진 최적화된 XOR 게이트 내의 SOA1과 SOA2에 대한 바이어스 전류는 각각 180mA와 190mA이고 최적화된 NOR (혹은 OR) 게이트 내의 SOA3와 SOA4에 대한 바이어스 전류는 각각 190mA와 130mA (혹은 200mA)이다.

그림 3(a)와 3(b)는 각각 A와 B의 펌프 입력 신호들 (P_A 와 P_B)이고 3(c)~3(f)는 각각 XOR, NOR, OR, 그리고 NAND 게이트들의 probe 출력 펄스들 ($P_{O1-AB}(\phi_1=\pi)$, $P_{O2-AB}(\phi_2=0)$, $P_{O2-AB}(\phi_2=\pi)$, 그리고 P_{O3-AB})을 보여준다. 그림 3은 XOR, NOR, OR, 그리고 NAND 게이트들에서 나온 모든 출력 펄스들이 15dB 이상의 높은 소광 비를 가지고 있음을 보여준다. 또한 모든 출력 펄스들은 MZI들의 광 위상 변조로부터 얻어지기 때문에 그 형태가 새로 만들어짐 (reshaping)을 볼 수 있다.

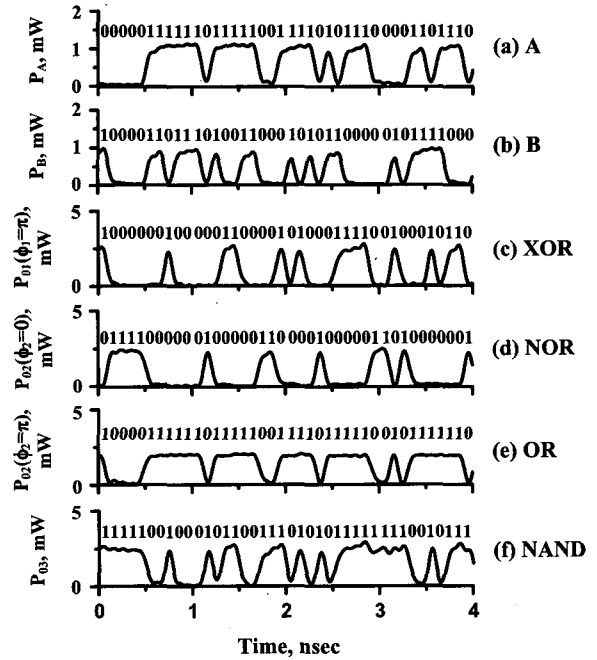


그림 3. 실험 결과: (a) P_A 와 (b) P_B 의 펌프 입력 펄스들 그리고 (c) XOR, (d) NOR, (e) OR, 그리고 (f) NAND 게이트들로부터 나온 probe 출력 펄스들

Fig. 3. Experimental setup: pump input pulses of (a) P_A and (b) P_B , and probe output pulses from (c) XOR, (d) NOR, (e) OR, and (f) NAND gates.

그러므로 제안된 방법은 집적성과 성능을 고려할 때 다른 방법으로 구현된 어떠한 전광 논리 소자보다도 우수함을 알 수 있다.

IV. 결론

본고에서 우리는 병렬 SOA-MZI 구조를 이용하여 XOR, NOR, OR, 그리고 NAND 기능을 가진 여러 가지 논리 기능들을 동시에 수행할 수 있는 전광 복합 논리 게이트들을 제안하고 10Gbps에서 실험적으로 검증하였다. 제안된 구조는 SOA-MZI 구조내의 광 이득과 위상 차이들을 제어함으로써 최적화되며 최대의 소광 비를 얻는다. XPM을 이용하는 구조로서 출력펄스들은 10Gbps에서 15dB 이상의 높은 소광 비를 가지고 있고 그들의 형태는 새롭게 만들어진다.

참고 문헌

[1] H. Soto, J.D. Topomondzo, D. Erasme, and M. Castro, "All-optical NOR gates with two and three input logic signals based on cross-

- polarization modulation in a semiconductor optical amplifier" Opt. Comm., Vol. 218, pp. 243-247, 2003.
- [2] T. Houbavlis, K.E. Zoiros, G. Kanellos, and C. Tsekrekos, "Performance analysis of ultrafast all-optical Boolean XOR gate using semiconductor optical amplifier-based Mach-Zehnder Interferometer" Opt. Comm., Vol. 232, pp. 179-199, 2004.
- [3] Q. Wang, G. Zhu, H. Chen, J. Jaques, J. Leuthold, A.B. Piccirilli, and N.K. Dutta, "Study of All-Optical XOR Using Mach-Zehnder Interferometer and Differential Scheme" IEEE J. Quantum Elect., Vol. 40, No. 6, pp. 703-710, June 2004.
- [4] J.H. Kim, Y.T. Byun, Y.M. Jhon, S. Lee, D.H. Woo, and S.H. Kim, "All-optical half adder using semiconductor optical amplifier based devices" Opt. Comm., Vol. 218, pp. 345-349, 2003.
- [5] J.Y. Kim, and S.K. Han, "Novel automatic control for the optimum optical gain and phase difference in SOA-MZI wavelength converter" CLEO/QELS'2005, JTuC68, Baltimore, Maryland, USA, May 2005.

 저 자 소 개



김 주 엽 (학생회원)
 1993년 성균관대학교 전자공학과
 학사
 1995년 성균관대학교 전자공학과
 석사
 2005년 현재 연세대학교 전기전자
 공학과 박사과정

1995년~현재 삼성전자(주) 책임연구원
 <주관심분야 : 광전자, 광통신, 광디스크>



한 상 국 (정회원)
 1986년 연세대학교 전자공학과
 학사
 1988년 University of Florida
 전기공학과 석사
 1994년 University of Florida
 전기공학과 박사

1994년~1996년 현대전자(주) 선임연구원
 1996년~현재 연세대학교 전기전자공학과 교수
 <주관심분야 : 광통신, 광 네트워크>