

## 반도체 광증폭기를 이용한 다기능 전광 논리 소자의 설계 및 측정

손창완 · 윤태훈<sup>†</sup>

부산대학교 전자공학과 광전자연구실  
Ⓣ 609-390 부산시 금정구 장전동 산 30번지

김상헌 · 전영민 · 변영태 · 이 석 · 우덕하 · 김선호

한국과학기술연구원 광기술연구센터  
Ⓣ 136-130 서울시 성북구 하월곡동 39-1번지

(2006년 10월 17일 받음, 2006년 12월 13일 수정본 받음)

반도체 광증폭기에 기반을 둔 이득포화특성을 이용하여 XOR, AND, OR 논리 게이트를 동시에 구현하는 다기능 전광 논리소자를 설계하고 구현하였다. 상용화된 프로그램인 VPI Component Maker<sup>TM</sup>을 사용하여 시뮬레이션을 수행 하였고 10 Gbit/s의 입력 신호를 사용하여 XOR, AND, OR 논리동작을 동시에 구현하는 다기능 전광 논리소자를 구현하였다.

주제어 : Optical logic, Semiconductor optical amplifier, Semiconductor nonlinear optics including MQW

### I. 서 론

앞으로의 정보 통신망은 음성신호, 동영상 등의 멀티미디어 서비스를 제공하는 것이고 이러한 멀티미디어 서비스를 제공하기 위해서는 기간망의 정보처리 용량이 수백 Gbit/s에서 수 Tbit/s로 증가될 것이다. 그러므로 대용량의 데이터를 고속으로 전송, 처리, 교환 할 수 있는 전광 신호처리 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>[1-2]</sup> 현재 광통신의 신호 처리에는 일반적으로 단일 논리소자가 쓰이고 있다. 하지만 단일 소자만으로는 증가하는 기능성 및 효율성에 대한 요구를 만족 시킬 수 없기에 다목적 기능을 가지는 논리시스템이 요구되고 있다.

현재 연구되고 있는 논리 시스템은 크게 광섬유를 이용한 논리소자들과 반도체 광증폭기를 이용한 논리소자로 구분할 수 있다. 광파이버를 이용한 논리소자들은 TOAD(Terahertz Optical Asymmetric Demultiplexer)를 이용한 XOR 게이트<sup>[3]</sup>, AND 게이트, UNI(Ultrafast Nonlinear Interferometer)를 이용한 전광 XOR 게이트<sup>[4]</sup>, Sagnac gate를 이용한 전광 XOR 게이트<sup>[5]</sup>, NOLM(Nonlinear Optical Loop Mirror)을 이용한 전광 AND 게이트<sup>[6]</sup> 등이 있다. 앞에서 언급한 광파이버에 기반을 둔 전광 논리소자들은 높은 동작속도의 장점이 있으나, 핵심 구성요소가 광섬유이므로 안정성이 나쁘고 구성이 복잡하며 다른 소자와의 집적이 어렵다. 따라서 고집적화를 요구하는 광논리 시스템에는 적용하기 어려운 단점을 가진다.

반도체 광증폭기(Semiconductor Optical Amplifier; SOA)를 이용한 전광 논리소자는 Cross-Phase Modulation(XPM)<sup>[7]</sup>, Cross-Gain Modulation(XGM)<sup>[8]</sup>, Four Wave Mixing(FWM)<sup>[9]</sup>

등을 이용한 방법이 있다. 반도체 광증폭기를 이용한 전광 논리소자의 경우 안정적이고 시스템의 규모가 작으며 다른 광소자와의 결합이 용이할 뿐만 아니라, 편광과 파장의 무의존성이 가능하다는 장점으로 인하여 널리 연구되고 있다.<sup>[10]</sup> 특히 XGM을 이용한 전광 논리소자는 다른 방법들에 비하여 보다 안정적인 동작을 하고 구성이 간단하다는 장점으로 집적된 광소자를 만드는데 있어서도 이용되고 있다.<sup>[11-15]</sup>

여러 종류의 전광 논리소자들(AND, NAND, OR, NOR, XOR, XNOR)등이 광컴퓨팅이나 전광 신호처리 시스템의 복잡한 기능을 수행하기 위해서는 각각의 전광 논리소자들의 구조가 간단하여야 하고 시스템 구축에 있어서 동일한 동작원리로 작동 하도록 구현 되어야 한다. 더불어 지금까지 연구되고 있는 반도체 전광 논리소자들은 대부분 단일 논리소자에 기반을 둔 논리 시스템들이나, 단일 소자로는 증가하는 기능성 및 효율성에 대한 요구를 모두 만족시키기 어렵기 때문에 다목적 기능을 가지는 논리 시스템 또한 요구되고 있다. 이와 같은 이유로 인하여 본 연구에서는 보다 효율적이고 다양한 요구를 만족 시킬 수 있는 XOR, AND, OR동작을 구현하는 다기능 전광 논리소자를 설계하고 구현하였다. 각 논리소자는 10 Gbit/s의 동작속도에서 동시에 구현이 되며 단일한 동작원리인 이득포화 현상만을 이용하였기 때문에 보다 간단하고 효율적인 방법으로 구현 되었다.

### II. 다기능 반도체 전광 논리소자의 동작원리

본 연구에서는 반도체 광증폭기의 XGM 특성을 이용하여 다기능 전광 논리소자를 설계하고 구현하였다. 반도체 광증폭기에서 유도방출의 비율은 광 입력 파워와 연관이 있다. 높은 광 입력에서는 반도체 광증폭기 내부의 활성영역에서

<sup>†</sup> E-mail: thyoon@pusan.ac.kr

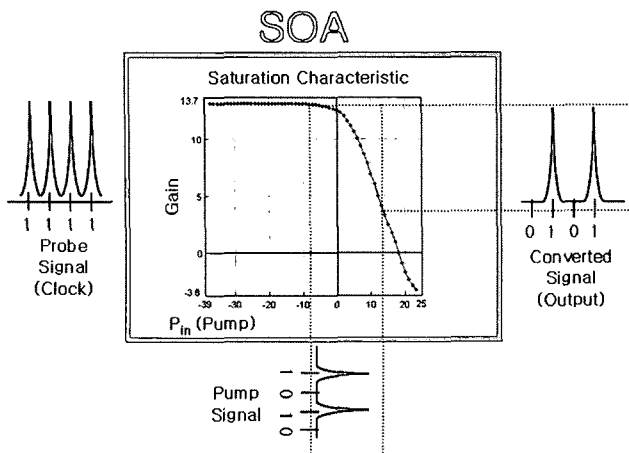


그림 1. 반도체 광증폭기의 이득포화 특성.

유도방출에 의해 운반자가 고갈(carrier depletion)되어 반도체 광증폭기의 이득이 줄어들게 된다. 이러한 비선형 현상을 반도체 광증폭기의 이득포화(gain saturation) 현상이라고 하며 XGM의 기본 원리이다. 펄스 형태의 펌프신호(pump signal)가 반도체 광증폭기 내부를 지나면 반도체 광증폭기 내부의 운반자 고갈 현상을 가져오게 된다<sup>[16]</sup>. 이러한 운반자 고갈 현상은 반도체 광증폭기의 이득포화 현상을 일으키게 되고 입력되는 조사신호(probe signal)의 이득감소를 일으키게 된다. 이러한 이득감소로 인하여 반도체 광증폭기의 출력 신호에서 조사신호가 나타나지 않게 된다. 그림 1에서 반도체 광증폭기의 이득포화 특성과 펌프와 조사신호에 따른 출력 결과의 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

본 연구에서 제안한 다기능 전광 논리소자의 동작 원리는 그림 2와 같다. 그림 2에서 첫 번째 반도체 광증폭기와 두 번째 반도체 광증폭기는 XOR 논리동작을 하기위해 사용되었고 두 번째와 세 번째는 AND 논리동작을 하기위해 사용되었다. XOR 논리동작에서 첫 번째 반도체 광증폭기에서 B 신호를 조사신호로 A 신호를 펌프신호로 사용하여 Boolean  $\overline{A}B$  신호를 얻을 수 있고, 두 번째 반도체 광증폭기에서 A 신호를 조사신호로 B 신호를 펌프신호로 사용하여 Boolean  $A\overline{B}$  신호를 얻을 수 있다. 따라서 그림 2에서 보이는 것과 같이 출력신호인 Boolean  $\overline{A}B$  신호와 Boolean  $A\overline{B}$  신호가 합쳐지면 표 1의 XOR와 같이  $\overline{A}B + A\overline{B}$ 의 값을 가지는 전광 XOR 논리소자의 동작특성이 얻어진다. AND 논리동작에서 두 번째 반도체 광증폭기에서는 A 신호가 조사신호로 쓰이고 B 신호가 펌프신호로 쓰여  $\overline{A}B$  신호를 얻을 수 있고 세 번째 반도체 광증폭기에서는 A 신호를 조사신호로 사용하고 두 번째 반도체 광증폭기에서 얻어진  $\overline{A}B$  신호를 펌프신호로 사용하여 Boolean  $A(\overline{A} + B)$  신호를 얻게 되어 이 결과는 Bool 연산에 따라 AND 논리동작을 수행하게 된다. 첫 번째와 두 번째 반도체 광증폭기에서 얻어진 XOR 논리동작과 두 번째와 세 번째 반도체 광증폭기에서 얻어진 AND 논리동작을 합쳐

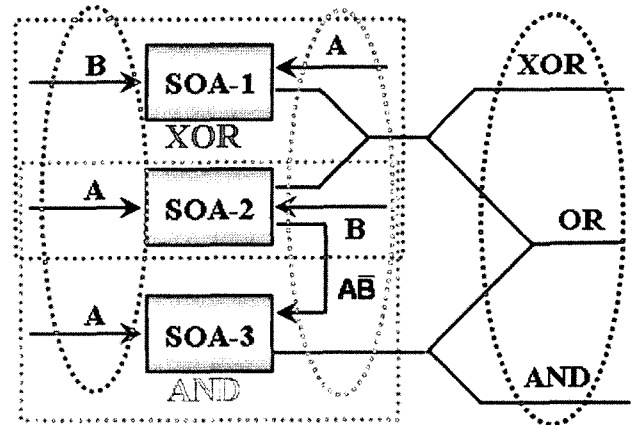


그림 2. 다기능 전광 논리소자의 동작원리.

게 되면 세 번째 논리동작인 OR 논리동작을 얻을 수 있게 된다. 기존의 반도체 광증폭기를 이용한 XOR 논리동작과 AND 논리동작을 하기 위해서는 각각 두 개씩 모두 네 개의 반도체 광증폭기가 필요 하였고<sup>[13,14]</sup> OR 논리동작을 얻기 위해서도 또 다른 반도체 광증폭기가 필요<sup>[15]</sup>한 반면 제안된 구조로 동작을 하게 된다면 세 개의 반도체 광증폭기로 세 가지 논리동작을 구현 할 수 있게 된다.

설계된 다기능 전광 논리소자는 반도체 광증폭기의 특성 중 이득포화 현상만을 이용한 것으로 병렬로 나열된 형태의 집적된 반도체 광증폭기로도 구현이 가능하다는 장점이 있다. 뿐만 아니라 논리소자의 핵심 구성요소인 XOR과 AND가 포함된 형태의 시스템으로 두 가지 논리소자를 사용하여 전광 반가산기로의 사용이 가능하다.<sup>[15]</sup>

### III. 측정결과 및 분석

실제 실험을 진행하기 전에 상용화된 프로그램인 VPI Component Maker™을 사용하여 그림 2의 구성을 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션에 사용한 반도체 광증폭기는 다중양자우물 구조의 활성영역을 가지며 1.552  $\mu\text{m}$ 의 동작파장을 가지는 소자를 사용 하였고, 길이는 700  $\mu\text{m}$ 이다. 양쪽의 반사율은  $10^{-4}$ 로 설정 하였으며 반도체 광증폭기에 주입한 전류는 200 mA이다. 사용한 조사신호와 펌프신호의 광세기는 각각 2.3 mW와 100 mW이다. 그림 4는 앞서 설명한 파라미터를 사용하여 다기능 전광 논리소자를 시뮬레이션 한 결과이다. 입력신호인 A신호와 B신호는 pseudo-random binary sequence(PRBS) 신호를 사용 하였으며 연관된 출력 신호로 XOR, AND, OR 신호를 볼 수 있다.

다기능 전광 논리소자를 구현하기 위하여 10 Gbit/s의 RZ (return to zero)형태의 입력 신호를 사용하였다. 그림 4는 다기능 전광 논리게이트를 구현하기 위한 실험도이다. 먼저 모드잠김 광섬유 링레이저(mode-locked fiber ring laser)를 이용하여 2.5 GHz(400 ps)의 주기를 가지는 펄스 신호를 만들었다. 이때 생성된 펄스의 반치폭은 30 ps이다. 이렇게 만들

## PRBS Signal

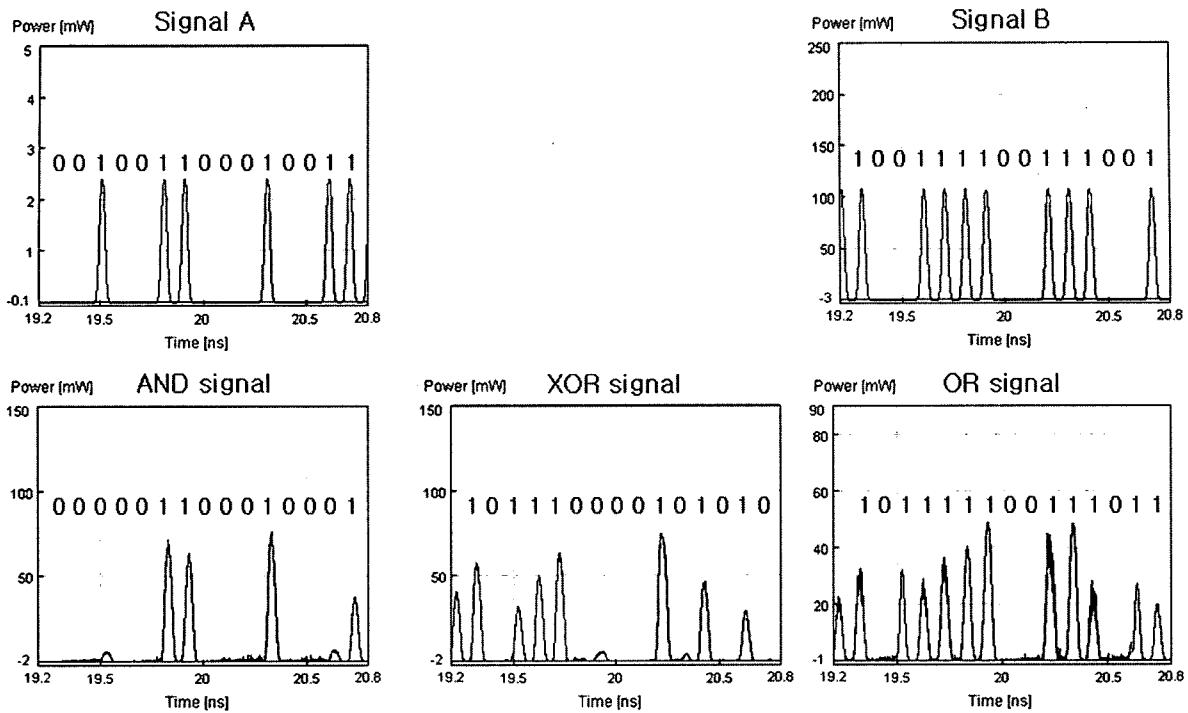


그림 3. 다기능 전광 논리소자의 시뮬레이션 결과.

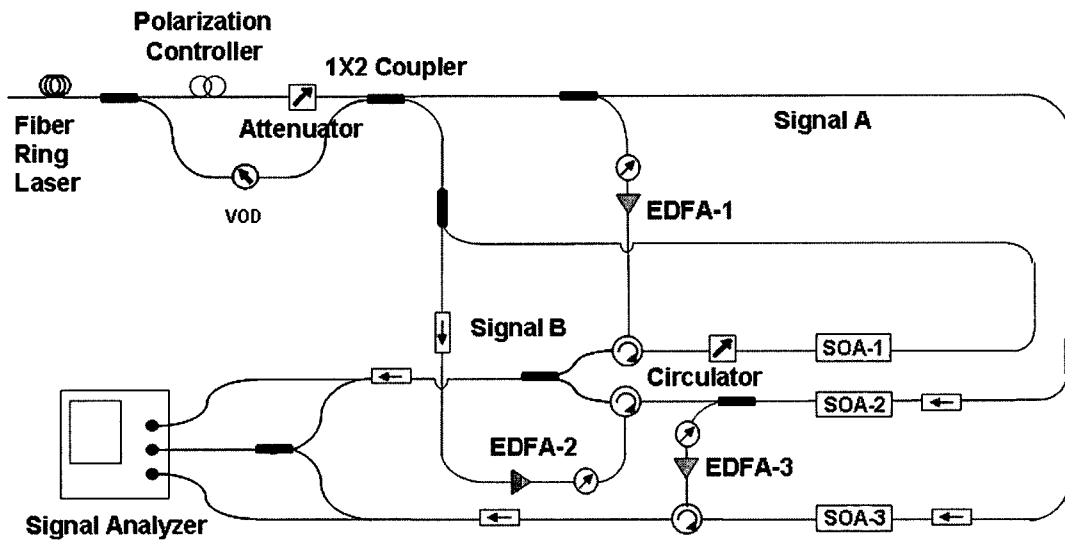


그림 4. 다기능 전광 논리소자의 실험 구성도.

어진 펄스 신호는 1×2 광커플러를 사용하여 두 방향으로 분리한 후, 한쪽 광섬유를 진행하는 펄스 신호는 100 ps만큼 시간적으로 지연 시켰다. 나누어진 두 신호를 합치게 되면 시간지연이 주어진 신호와 주어지지 않은 신호가 합쳐져서 1100 패턴을 가지는 10 Gbit/s의 A신호를 만들 수 있다. 다

시 1100의 패턴을 가지는 A신호를 100 ps만큼 시간지연 시키게 되면 0110 패턴을 가지는 B신호를 만들 수 있다. 앞에서 설명한 신호의 발생 방법은 그림 3에서 알 수 있다.

그림 3에서 XOR동작의 구현은 다음과 같은 방법으로 구현되었다. SOA-1에서는 1100 패턴을 가지는 A신호가 조사

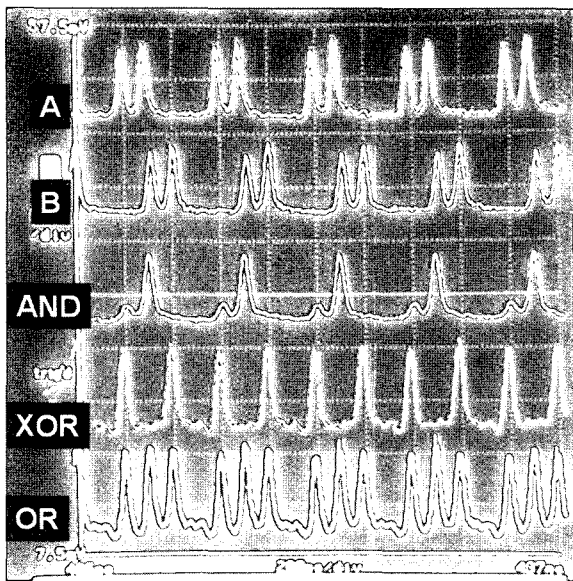


그림 5. 다기능 전광 논리소자의 측정결과.

표 1. XOR, AND, OR의 진리표

A	B	XOR	AND	OR
0	0	0	0	0
0	1	1	0	1
1	0	1	0	1
1	1	0	1	1

신호, 그리고 0110 패턴을 가지는 B신호가 펄프신호로 사용되며 SOA-2에서는 A신호가 펄프신호 B신호가 조사신호로 사용되었다. 먼저 SOA-1에서 0010 패턴을 가지는 Boolean  $\overline{A}B$ 신호를 얻을 수 있고, SOA-2에서는 1000 패턴을 가지는 Boolean  $A\overline{B}$ 신호를 얻을 수 있다. 이 두 신호를 1×2 광커플러를 사용하여 결합하면 1010 패턴을 가지는 XOR 동작의 결과를 얻을 수 있다. 그림 4에서 AND동작의 구현은 SOA-3에 1100 패턴을 가지는 A신호를 조사신호로 사용하고 SOA-2에서 얻어진 1000 패턴을 가지는 Boolean  $A\overline{B}$ 신호를 펄프신호로 사용하여 0100 패턴을 가지는 AND 동작의 결과를 얻을 수 있다. 이렇게 얻어진 두 신호를 1×2 광커플러를 사용하여 결합하면 1110 패턴을 가지는 OR 동작의 결과를 얻게 된다. 이 결과들은 광검출기(photo detector)에 연결된 오실로스코프(oscilloscope)를 통하여 확인 하였으며 그 결과는 그림 5와 같다.

측정에서 사용된 신호의 동작속도는 모두 10 Gbit/s의 RZ 신호를 사용하여 다기능 전광 논리소자를 구현하였으며 그림 5에서 보이는 바와 같이 1100의 패턴을 가지는 A신호와 0110의 패턴을 가지는 B신호를 인가하였을 때 표 1의 진리표와 일치하는 XOR, AND, OR 논리동작을 얻을 수 있었다. 측정된 결과에서 XOR 논리동작을 반가산기의 SUM으로 사용하고 AND 논리동작을 반가산기의 Carry로 사용한다면 제안된 다기능 전광 논리소자는 전광 반가산기로서의 사용이 가

능하다. 본 논문의 그림 2에서 알 수 있듯이 반도체 광증폭기의 특성 중 이득포화 특성만을 사용한 XGM 방식으로 전체 시스템의 구조가 간단하고 부피가 작을 뿐만 아니라 반도체 광증폭기를 사용하고 있기에 Y-branch등의 다른 반도체 광도파로의 집적이 가능하면서 10 Gbit/s의 고속 동작이 가능하다는 장점을 가지고 있다. XGM 방법은 구조가 간단하고 집적화가 용이하기 때문에 본 연구의 다기능 전광 논리소자는 광컴퓨팅이나 전광 신호처리 시스템 등의 복잡한 전광 회로를 소형화 하는데 응용 가능하다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 반도체 광증폭기에 기반을 둔 다기능 전광 논리소자에 관한 설계와 구현을 하였다. 세 개의 반도체 광증폭기의 이득포화 특성을 이용하여 XOR, AND, OR 논리동작을 동시에 구현하는 형태의 시스템을 제안 하였으며 10 Gbit/s의 RZ 신호에서 성공적으로 구현하였다. 단일 시스템 안에서 구현 가능하므로 각각의 XOR, AND, OR 동작을 수행 하는 시스템에 비하여 반도체 광증폭기의 사용을 줄일 수 있었다. 동시에 구현된 전광 XOR 논리소자와 전광 AND 논리소자 그리고 전광 OR 논리소자는 나머지 다른 단일 광 논리소자들(XOR, NOR, NAND)과 함께 광컴퓨팅이나 전광 신호처리 시스템을 구성하는데 있어서 빼놓을 수 없는 핵심소자 이다. 본 논문의 다기능 전광 논리소자는 구조가 간단하고 부피가 작을 뿐만 아니라 반도체 광증폭기를 사용 하였기에 Y-branch등의 반도체 광도파로와 집적이 가능하다. XOR 전광 논리소자와 AND 전광 논리소자를 동시에 구현할 경우 반가산기의 동작을 수행할 수 있으며, 단일한 동작원리를 사용하여 병렬로 나열된 반도체 광증폭기의 형태로 집적 가능하다. 이와 같은 결과는 광 프로세서 같은 소자 및 부품 등의 기능 향상 및 다양한 응용분야로의 발전 가능성을 가져올 거라 기대한다.

#### 참고문헌

- [1] R. E. Wagner, et al., "MONET: multiwavelength optical networking," J. Lightwave Technol., vol. 14, no. 6. pp. 1349-1355, June 1996.
- [2] S. W. Seo, et al., "Transparent optical networks with time-division multiplexing," J. Selected Areas in Comm., vol. 14, no. 5, pp. 1039-1051, June 1996.
- [3] A. J. Poustie, K. J. Blow, A. E. Kelly, and R. J. Manning, "All-optical full adder with bit-differential delay," Opt. Commun., vol. 168, no. 1-4, pp. 89-93, 1999.
- [4] C. Bintjas, M. Kalyvas, G. Theophilopoulos, T. Stathopoulos, H. Avramopoulos, L. Occhi, L. Schares, G. Guekos, S. Hansmann, and R. Dall'Ara, "20 Gb/s All-Optical XOR with UNI gate," IEEE Photonics Tech. Lett., vol. 12, no. 7, pp. 834-836, 2000.

- [5] T. Houbavlis, K. Zoiros, A. Hatziefremidis, H. Avramopoulos, L. Occhi, G. Guekos, S. Hansmann, H. Burkhard, and R. Dall'Ara, "10 Gbit/s all-optical Boolean XOR with SOA fiber Sagnac gate," *Electron. Lett.*, vol. 35, no. 19, pp. 1650-1652, 1999.
- [6] B.-E. Olsson and P. A. Andrekson, "Polarization independent all-optical AND gate using randomly birefringent fiber in a nonlinear optical loop mirror," *Proc. Optical Communications 1998*, San Jose, CA, USA, pp. 375-376.
- [7] T. Durhuus, C. Joergensen, B. Mikkelsen, R. J. S. Pedersen, and K. E. Stubkjaer, "All optical wavelength conversion by SOA's in a Mach-Zehnder configuration," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 6, no. 1, pp. 53-55, 1994.
- [8] R. Schanabel, W. Pieper, M. Ehrhardt, M. Eiselt, and H. G. Weber, "Wavelength conversion and switching of high speed data signals using semiconductor laser amplifiers," *Electron. Lett.*, vol. 29, no. 23, pp. 2047-2048, 1993.
- [9] J. Zhou, N. Park, J. W. Dawson, K. J. Vahala, M. A. Newkirk, and B. I. Millerl, "Efficiency of broadband four-wave mixing wavelength conversion using semiconductor traveling wave amplifiers," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 6, no. 1, pp. 50-52, 1994.
- [10] T. Fjelde, D. Wolfson, A. Kloch, B. Dagens, A. Coquelin, I. Guillemot, F. Gaborit, F. Poingt, and M. Renaud, "Demonstration of 20 Gbit/s all-optical logic XOR in integrated SOA-based interferometric wavelength converter," *Electron. Lett.*, vol. 36, no. 22, pp. 1863-1864, 2000.
- [11] 김재현, 변영태, 전영민, 이석, 우덕하, 김선호, 강광남, "반도체 광증폭기를 이용한 전광 NAND 논리소자의 구현장치," 대한민국 특허출원 01-59368, 2001.
- [12] B. C. Kim, J. H. Kim, Y. T. Byun, Y. M. Jeon, Y. H. Park, S. Lee, D. H. Woo, and S. H. Kim, "10 Gb/s All Optical AND Gate by Using Semiconductor Optical Amplifiers," in *The Sixth International Symposium on Contemporary Photonics Technology (CPT2003)*, Tokyo, Japan, p. 9, 2003.
- [13] J. H. Kim, B. C. Kim, Y. T. Byun, Y. M. Jhon, S. Lee, D. H. Woo, and S. H. Kim, "All-Optical AND Gate Using Cross-Gain Modulation in Semiconductor Optical Amplifiers," *Jpn. J. of Appl. Phys.*, vol. 43, pp. 608-610, 2004.
- [14] 김재현, 전영민, 변영태, 이석, 우덕하, 김선호, "반도체 광증폭기에 기반을 둔 10 Gb/s 전광 반가산기," *한국광학회지*, vol. 13, no. 5, pp. 421-424, 2002.
- [15] Y. T. Byun, J. H. Kim, Y. M. Jeon, S. Lee, D. H. Woo, and S. H. Kim, "An All-Optical OR Gate by using cascaded SOAs," in *2002 International Topical meeting on Photonics in Switching (PS 2002)*, Cheju Island, KOREA, pp. 187-189, 2002.
- [16] K. E. Stubkjaer, "Semiconductor optical amplifier-based all-optical gates for high-speed optical processing," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2000, vol. 6, pp. 1428-1435, 2000.

## Design and Demonstration of All-Optical XOR, AND, OR Gate in Single Format by Using Semiconductor Optical Amplifiers

Chang Wan Son and Tae-Hoon Yoon<sup>†</sup>

*Pusan National University San 30 Changjeon-dong, Keumjeong-ku, Busan 609-735, Korea*

<sup>†</sup>*E-mail: thyoon@pusan.ac.kr*

Sang Hun Kim, Young Min Jhon, Yung Tae Byun, Seok Lee, Deok Ha Woo and Sun Ho Kim

*Photonics Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, 136-791, Korea*

(Received October 17, 2006, Revised manuscript December 13, 2006)

Using the cross-gain modulation (XGM) characteristics of semiconductor optical amplifiers (SOAs), multi-functional all-optical logic gates, including XOR, AND, and OR gates are successfully simulated and demonstrated at 10 Gbit/s. A VPI component maker<sup>TM</sup> simulation tool is used for the simulation of multi-functional all-optical logic gates and the 10 Gbit/s input signal is made by a mode-locked fiber ring laser. A multi-quantum well (MQW) SOA is used for the simulation and demonstration of the all-optical logic system. Our suggested system is composed of three MQW SOAs, SOA-1 and SOA-2 for XOR logic operation and SOA-2 and SOA-3 for AND logic operation. By the addition of two output signals XOR and AND, all-optical OR logic can be obtained.

OCIS code : 200.4660, 250.5980, 190.5970.