

반도체 광증폭기에 기반을 둔 10 Gb/s 전광 반가산기

김재현[†] · 전영민 · 변영태 · 이 석 · 우덕하 · 김선호

한국과학기술연구원, 광기술연구센터

Ⓣ 136-791 서울시 성북구 하월곡동 39-1

(2002년 6월 10일 받음, 2002년 7월 26일 수정본 받음)

반도체 광증폭기에 기반을 둔 소자들을 이용한 전광 반가산기가 처음으로 구현되었다. 전광 반가산기의 동작속도와 신호 형식은 각각 10 Gb/s와 RZ였다. 전광 반가산기의 SUM과 CARRY의 동작에는 각각 전광 XOR 논리소자와 전광 AND 논리소자가 이용되었으며 두 연산이 동시에 구현되었다.

주제어 : all-optical half adder, all-optical logic XOR, all-optical logic AND, semiconductor optical amplifier, XPM wavelength converter.

I. 서 론

최근의 경향을 보면 광통신의 고속화와 대용량화에 대한 요구는 기하급수적으로 증가하고 있다. 이러한 요구 사항을 만족시키기 위해서는 전광 네트워크의 구성이 필수적이다. 현재의 광통신은 속도향상 및 정보처리 용량 증가 뿐만 아니라 신호처리에서 여러 가지 기능성을 요구한다. 현재 광통신의 신호처리에는 일반적으로 단일 논리소자가 쓰이고 있다. 하지만 단일 소자만으로는 증가하는 기능성 및 효율성에 대한 요구를 만족시킬 수 없기 때문에 다목적 기능을 가지는 논리시스템이 요구된다.

여러 가지 기능을 가지는 논리 시스템의 예로는 TOAD (terahertz optical asymmetric demultiplexer)를 이용한 전광 반가산기(half adder)^[1]와 전가산기(full adder)^[2]가 있다. 이 외에는 크게 알려진 바가 없으며 XOR, AND 등의 여러 가지 단일 논리소자에 대해서만 연구가 이루어져 왔다. 전광 반가산기 및 전가산기에 쓰이는 XOR 논리소자와 AND 논리소자는 그 자체 만으로도 패킷스위칭(packet switching),^[3] 신호결정(decision making) 뿐만 아니라 multiplexing, demultiplexing 등과 같은 뛰어난 연구적인 가치를 가진 핵심소자이다. 최근에는 UNI(ultrafast nonlinear interferometer)를 이용한 XOR,^[4] TOAD를 이용한 XOR,^[2] Sagnac Gate를 이용한 XOR,^[5] 그리고 IWC(interferometric wavelength converter)를 이용한 XOR^[6] 등 많은 연구 결과들이 있다. 그리고 AND 논리소자의 구현에는 four wave mixing^[7]과 NOLM(nonlinear optical loop mirror)^[8] 등이 이용되었다.

위에서 언급된 UNI, TOAD, NOLM, 그리고 Sagnac Gate를 이용한 소자는 높은 동작속도의 장점이 있으나, 핵심 구성 요소가 광섬유(optical fiber)이므로 안정성이 나쁘고 구성이 복잡하며 다른 소자와 집적이 어렵다. 따라서 고집적화를 요구

하는 광연산 시스템에는 적용하기가 힘들다. 이에 비해서 반도체 광증폭기(semiconductor optical amplifier; SOA)에 기반을 둔 광논리소자들은 안정적이고 시스템의 규모가 작으며 다른 광소자와의 결합이 용이할 뿐만 아니라, 편광과 파장의 무의존성이 가능하다는^[6] 장점들이 있다.

그리고 지금까지 발표된 XOR 논리소자들은 모두 클락(clock)이나 CW(continuous wave) 신호 등의 추가적인 신호가 필요하다. 그러나 본 연구에서 처음으로 2개의 단일 SOA에서의 XGM(cross-gain modulation) 특성을 이용하여 구현된 XOR 논리소자는 SOA들의 입력 신호가 A 신호와 B 신호에만 의존하기 때문에 추가적인 신호가 필요 없어 단일 파장에서 동작 가능하다. 또한 XPM의 binary 특성을 이용한 AND 논리소자도 두 입력신호 외의 추가적인 신호에 대한 의존성이 없다. 본 논문에서는 이 두가지 논리소자를 결합하여 두 입력 신호만으로 동작하여 추가적인 광원이 필요없고 단일 파장에서 동작 가능한 전광 반가산기가 구현되었다.

II. 동작원리

본 연구에서는 SOA에 기반을 둔 소자들을 이용한 전광 반가산기가 구현되었다. 전광 반가산기는 그림 1과 같이 크게 두 가지 동작으로 나뉘는데 하나는 덧셈을 위한 SUM이고, 다른 하나는 덧셈 시 자리 수 올림을 위한 CARRY이다.

SUM은 SOA의 XGM 특성을 가지는 전광 XOR 논리소자를 이용하여 구현되었다.^[6] 그림 2는 전광 반가산기의 SUM 구현을 위한 XOR 논리소자의 구성도이다. 먼저 A 신호와 B 신호가 각각 조사신호(probe signal)와 펌프신호(pump signal)로 SOA-1에 주입되면 Boolean \overline{AB} 이 얻어진다. 또한 B 신호와 A 신호가 각각 조사신호와 펌프신호로 SOA-2로 주입되면 Boolean \overline{BA} 가 얻어진다. 따라서 그림 2에서 보이는 것과 같이 출력신호 \overline{AB} 과 \overline{BA} 가 합쳐지면 표 1의 SUM과 같이 $\overline{AB} + \overline{BA}$ 의 값을 가지는 전광 XOR 논리소자의 동작특성

[†]E-mail: jaekim@kist.re.kr

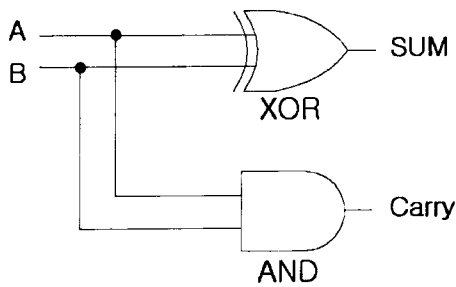


그림 1. 전광 반가산기

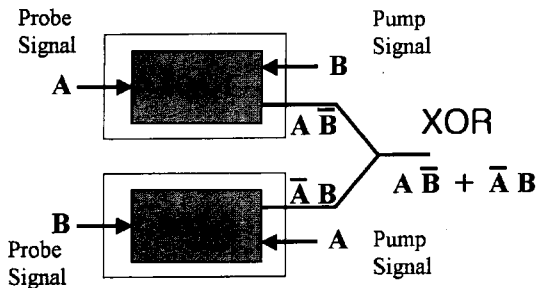


그림 2. 전광 XOR 논리소자의 기본 구성도.

이 얻어진다.

CARRY는 XGM 파장변환기의 binary 특성을 가지는 전광 AND 논리소자를 이용하여 구현되었다.^[10] 그림 3은 AND 논리소자를 구현하기 위한 기본 특성도이다. 광세기 차가 큰 두 신호가 논리 1과 0의 조사신호로 사용되었으며, 펌프신호가 낮은 광세기에서 높은 광세기로 차츰 변화되면서 XPM 파장변환기로 입사된다. 낮은 광세기를 가지는 조사신호가 입사된 경우, 펌프신호의 크기가 작을 때는 출력신호가 (A), 펌프신호의 크기가 클 때는 출력신호가 (B) 지점에 있게 된다. 높은 광세기를 가지는 조사신호가 입사된 경우, 펌프신호의 크기가 작을 때는 출력신호가 (A), 펌프신호의 크기가 클 때는 출력신호가 (C) 지점에 있게 된다. 따라서 낮은 광세기를 가지는 신

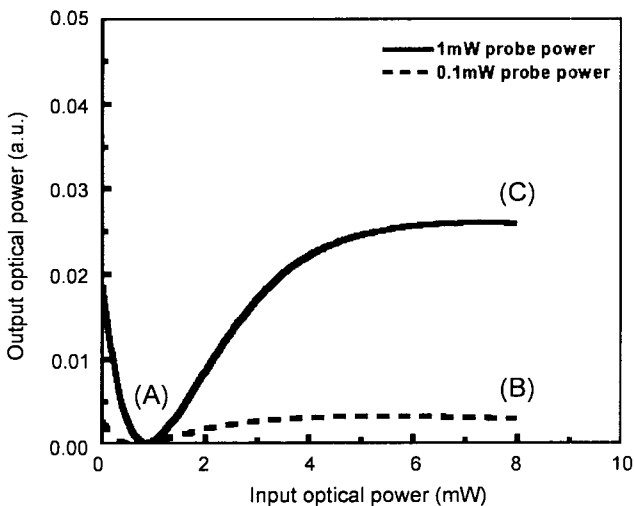


그림 3. XPM 파장변환기의 기본특성.

표 1. 전광 반가산기의 진리표

A	B	SUM	CARRY
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

호를 논리 0, 높은 광세기를 가지는 신호를 논리 1이라고 가정할 경우, 두 입력신호 모두 논리 1을 가질 때 출력신호도 논리 1을 가진다. 그 외의 입력 신호들에 대한 출력신호는 모두 논리 0을 가진다. 따라서 표 1의 CARRY와 같이 A·B의 값을 가지는 전광 AND 논리소자의 동작이 얻어진다.

III. 실험 및 논의

그림 4는 전광 반가산기를 구현하기 위한 실험도이다. 먼저 모드잠김 광섬유 링레이저(mode-locked fiber ring laser)와 펄스생성기(pulse generator)를 이용하여 400 ps(2.5 GHz)의 주기를 가지는 펄스 신호가 만들어졌다. 이때 생성된 펄스의 폭은 33 ps 정도였다. 이렇게 만들어진 펄스 신호는 50:50 광섬유 결합기(coupler)에서 분리된 후 한쪽 광섬유를 진행하는 펄스 신호는 100 ps 만큼 시간지연(delay) 되었다. 그리고 시간지연이 주어진 신호와 그렇지 않은 신호가 같이 합쳐져서 1100 패턴을 가지는 10 Gb/s의 A 신호가 만들어졌다. 한편 1100 패턴을 가지는 A 신호가 100 ps 만큼 시간지연 되어 0110 패턴을 가지는 B 신호가 만들어졌다. 전광 반가산기는 SUM과 CARRY 부분으로 구성되므로 위와 같은 방법으로 만들어진 A 신호와 B 신호는 50:50 광섬유결합기에 통과되어 나뉘진 다음 각각 SUM과 CARRY 구현에 사용되었다.

전광 반가산기 중의 하나인 SUM의 역할을 하는 전광 XOR 논리소자는 다음과 같은 방법으로 구현되었다. SOA-1에서는 A 신호가 조사신호, 그리고 B 신호가 펌프신호의 역할을 하며 SOA-2에서는 A 신호가 펌프신호, 그리고 B 신호가 조사신호의 역할을 한다. 먼저 SOA-1에서 Boolean AB 가 만들어지고 SOA-2에서 Boolean $\bar{A}\bar{B}$ 가 만들어진 후 더해져서 $AB + \bar{A}\bar{B}$ 가 얻어진다.^[9] 이렇게 합해진 신호는 20 Gb/s의 광검출기(Photo-detector)에 연결된 20 Gb/s의 오실로스코프(oscilloscope)로 측정되었다. 그림 5와 그림 6은 SOA-1과 SOA-2를 이용하여 만

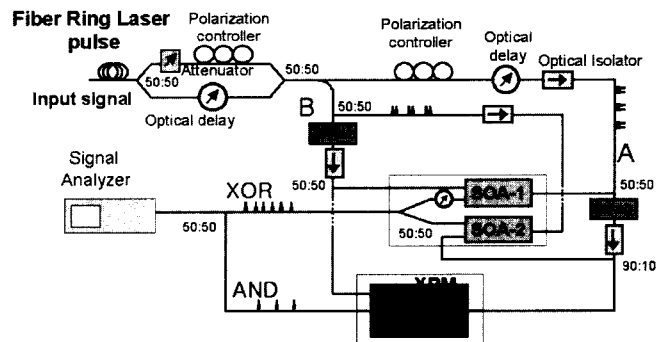


그림 4. 전광 반가산기의 실험도.

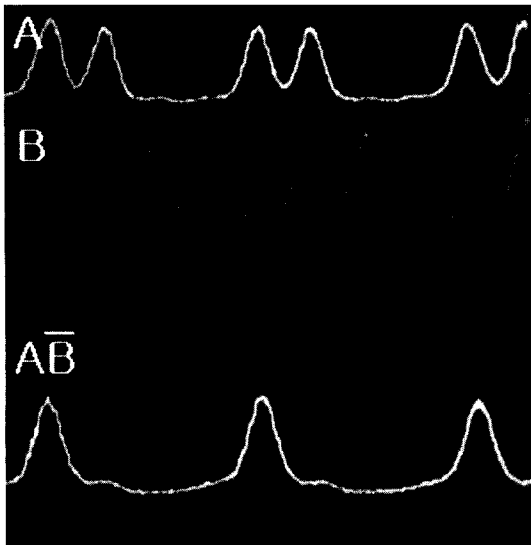


그림 5. Boolean \bar{A} .

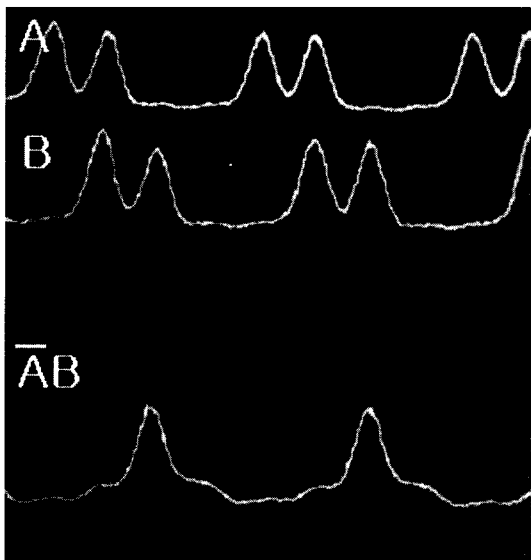


그림 6. Boolean \bar{A} .

든 Boolean \bar{A} 과 Boolean \bar{B} 이다. 그림 7의 SUM은 SOA-1과 SOA-2의 출력신호의 합, 즉 10 Gb/s에서의 XOR 논리소자의 동작 특성이다. 그림 7에서 보는 바와 같이 1100의 패턴을 가지는 A 신호와 0110 패턴을 가지는 B 신호를 합했을 때 1010의 패턴을 가지는 출력신호가 측정되었다. 출력신호에서와 같이 A 신호가 논리 0이고 B 신호가 논리 1일 때 출력신호는 논리 1을 가지며, A 신호가 논리 1이고 B 신호가 논리 0일 때 출력신호는 역시 논리 1을 가진다. 그외 두 신호가 모두 같을 때, 즉 신호 A가 논리 0이고 신호 B가 논리 0일 때와 신호 A가 논리 1이고 신호 B가 논리 1일 때의 출력신호는 모두 논리 0을 가진다. 이와 같은 결과는 표 1의 SUM(Boolean XOR)과 일치하므로 XOR 논리소자 즉 SUM 특성이 실험적으로 입증되었다. SOA-1과 SOA-2를 충분히 이

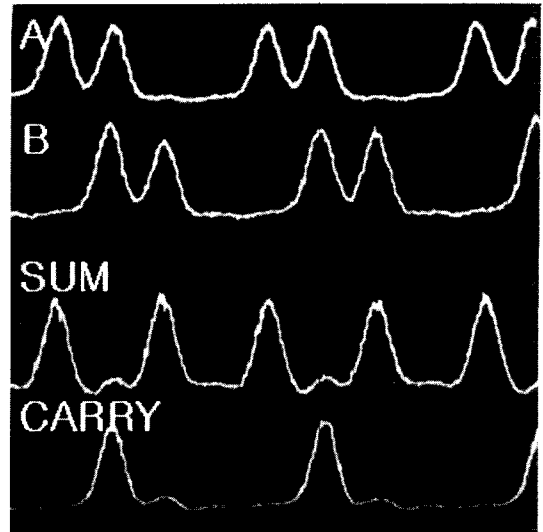


그림 7. 전광 반가산기의 동작특성.

득포화(gain saturation) 시켜주기 위해서 가해진 펌프신호의 평균출력과 펄스 당 에너지는 각각 2.2 mW, 2.6 mW 및 220 fJ, 260 fJ이었으며, 이때의 조사신호의 값은 각각 0.037 mW, 0.045 mW 및 3.7 fJ, 4.5 fJ이었다.

다음은 전광 반가산기의 CARRY의 역할을 하는 전광 AND 논리소자의 구현 방법이다. A 신호는 조사신호로 B 신호는 펌프신호로 각각 XPM 파장변환기로 입력되었다.^[10] 출력신호는 광검출기(photo-detector)에 연결된 오실로스코프(oscilloscope)로 측정되었다. 그림 7의 CARRY는 10 Gb/s에서의 AND 논리소자의 동작 특성이다. 그림 7에서 보는 바와 같이 1100의 패턴을 가지는 A 신호와 0110의 패턴을 가지는 B 신호를 합했을 때 0100의 패턴을 가지는 출력신호가 측정되었다. 출력신호에서와 같이 두 입력신호 모두 논리 1을 가질 때 출력신호는 논리 1을 가지며 그 외에는 출력신호는 모두 논리 0을 가진다. 이와 같은 결과는 표 1의 CARRY(Boolean AND)와 일치하므로 AND 논리소자가 CARRY로 동작 될 수 있음이 실험적으로 검증되었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 처음으로 반도체 광증폭기(SOA)에 기반을 둔 전광 반가산기가 구현되었다. 동작 속도는 10 Gb/s였으며 RZ 형식에서 구현되었다. SUM과 CARRY의 구현에는 전광 XOR 논리소자와 전광 AND 논리소자가 각각 이용되었다. 전광 XOR 논리소자에는 SOA의 이득포화 현상이 이용되었고, 전광 AND 논리소자에는 XPM에 의한 두 신호의 간섭현상이 이용되었다. 전광 반가산기의 SUM과 CARRY가 동시 구현되어 전광 반가산기가 실현되었으므로 이를 응용할 수 있는 복잡한 연산 및 신호처리수행이 가능하다. 이와 같은 결과는 광 프로세서 같은 소자 및 부품 등의 기능 향상을 가져올 거라 기대된다.

참고문헌

[1] A. J. Poustie, K. J. Blow, A. E. Kelly, and R. J. Manning, "All-optical binary half adder," *Opt. Commun.*, vol. 156, no. 1-3, pp. 22-26, 1998.

[2] 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.

[3] T. Fjelde, A. Kloch, D. Wolfson, B. Dagens, A. Coquelin, I. Guillemot, F. Gaborit, F. Poingt, and M. Renaud, "Novel Scheme for Simple Label-Swapping Employing XOR Logic in an Integrated Interferometric Wavelength Converter," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, vol. 13, no. 7, pp. 750-752, 2001.

[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] 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.

[7] D. Nasset, M. C. Tatham, and D. Cotter, "All-optical AND gate operating on 10 Gbit/s signals at the same wavelength using four-wave mixing in a semiconductor laser amplifier," *Electron. Lett.*, vol. 31, no. 11, pp. 896-897, 1995.

[8] B.-E. Olsson and P. A. Andrekson, "Polarization-Independent all-optical AND-gate using randomly birefringent fiber in a nonlinear optical loop mirror," in *Optical Fiber Communications 1998*, 2001, pp. 375-376.

[9] 김재현, 변영태, 전영민, 이 석, 우덕하, 김선호, "Semiconductor Optical Amplifier를 이용한 5 Gb/s 전광 XOR 논리소자," *한국광학회지*, vol. 13, no. 1, pp. 84-87, 2002.

[10] J. H. Kim, B.-K. Kang, Y. H. Park, Y. T. Byun, S. Lee, D. H. Woo, and S. H. Kim, "All-optical and gate using XPM wavelength converter," *Journal of Optical Society of Korea*, vol. 5, no. 1, pp. 25-28, 2001.

10 Gb/s All-optical half adder by using semiconductor optical amplifier based devices

Jae Hun Kim[†], Young Min Jhon, Young Tae Byun, Seok Lee,
Deok Ha Woo, and Sun Ho Kim

Photonics Research Center, KIST, Seoul 136-791, KOREA

[†]E-mail: jaekim@kist.re.kr

(Received June 10, 2002 ; Revised manuscript received July 26, 2002)

By using SOA (Semiconductor Optical Amplifier) based devices, an all-optical half adder has been successfully demonstrated at 10 Gb/s. All-optical XOR and AND gates are utilized to realize SUM and CARRY. Since SUM and CARRY have been simultaneously realized to form the all-optical half adder, complex calculation and signal processing can be achieved.

Classification codes : IP.010, LO.010, OE.030.