

CW-HB를 이용하는 전치증폭기를 가진 SOA-MZI 파장변환기에서 IPDR 개선

정회원 김 주엽*, 한 상국*

Enhancement of IPDR of SOA-MZI Wavelength Converter with Pre-amplifier Using a CW-HB

Joo-Youp Kim*, Sang-Kook Han* *Regular Members*

요 약

CW-HB(continuous wave-holding beam)를 이용하여 전치 증폭되는 SOA-MZI(semiconductor optical amplifier-Mach-Zehnder interferometer) 파장변환기가 제안되고 10Gb/s에서 실험적으로 검증되었다. 바이어스 전류만으로 전치증폭기를 제어하던 기존의 방법과 비교할 때, 제안된 CW-HB 제어 방법은 IPDR(input power dynamic range)의 개선 측면에서는 20dB 정도로 유사하나 출력신호의 왜곡을 제거하여 Q 파라미터를 2~3 정도 향상시키고 낮은 NF(noise figure)를 달성하여 2~5dB 정도 더 높은 소광 비를 얻을 수 있어서 매우 우수하다.

Key Words : SOA-MZI, wavelength converter, pre-amplifier, CW holding beam

ABSTRACT

A pre-amplified semiconductor optical amplifier-Mach-Zehnder interferometer(SOA-MZI) wavelength converter (WC) using a continuous wave-holding beam(CW-HB) is proposed and experimentally demonstrated at 10Gb/s. The proposed scheme achieves not only enhancement of input power dynamic range(IPDR) to over 20dB but also higher Q parameter of about 2 to 3 by no output signal distortion and higher extinction ratio(ER) of about 2dB to 5dB by low noise figure (NF), compared with the bias current control method.

1. 서 론

XPM(cross phase modulation) 현상을 이용하는 SOA-MZI(semiconductor optical amplifier - Mach-Zehnder interferometer) 파장변환기는 비 반전된 출력신호가 재생되면서 높은 소광 비와 낮은 chirp을 가지기 때문에 WDM(wavelength division multiplexing) 네트워크에서 매우 중요한 역할을 한다^[1]. 그러나 SOA-MZI 파장변환기는 IPDR(input power dynamic range)이 10Gb/s의 속도에서 3~4dB일 정도로 매우 좁은 치명적인 단점을 가지는데 그 원인

은 XPM이 SOA로 들어오는 펌프(pump) 입력 신호 파위의 좁은 범위에서만 가변되기 때문이다^[2]. 최근에 모놀리식(monolithic) 구조로 집적된 전치증폭이 가능한 SOA-MZI 파장변환기에서 전치증폭기(pre-amplifier)의 바이어스(bias) 전류를 제어하는 방법을 이용하여 좁은 IPDR을 개선할 수 있는 방법들이 제시되었다^[2-5]. 그러나 SOA를 전치증폭기로 사용할 경우 집적이 용이하기는 하지만 출력신호 왜곡과 잡음이 발생하는 문제점을 가지고 있다. 본 고에서는 전치 증폭된 SOA-MZI 파장변환기에서 전치증폭기에 CW-HB(continuous wave-holding beam)

* 연세대학교 전기전자공학과 광대역 전송 네트워크 연구실 (opelkim@yonsei.ac.kr)
 논문번호 : KICS2005-11-456, 접수일자 : 2005년 11월 10일

을 주입하여 제어하는 방법을 제시하고 출력신호의 왜곡과 잡음의 발생을 최소화시켜서 높은 Q 파라미터와 높은 소광 비를 얻는 것을 실험적으로 검증하였다.

II. 동작 원리

그림 1은 전치 증폭된 SOA-MZI 파장변환기의 구성도이다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 전치증폭기의 바이어스 전류 제어 방법을 이용하는 IPDR의 개선 원리는 펌프 입력신호의 광 파워 전치균등화(pre-equalization)로서 설명할 수 있다. 즉, 전치증폭기의 바이어스 전류를 이용하여 전치증폭기의 광 이득을 제어함으로써 SOA-MZI 파장변환기로 들어가는 펌프 입력신호를 전치균등화 시켜서 IPDR을 개선하는 것이다. 통상적으로 전치증폭기로 SOA를 사용하는데 SOA는 바이어스 전류뿐만이 아니라 CW-HB를 이용하여 광 이득을 제어할 수 있다^[6]. 따라서 전치증폭기의 바이어스 전류를 고정시킨 후 CW-HB를 주입하여 전치증폭기의 광 이득을 제어하여도 전치균등화를 이룰 수 있는데 우리는 이와 같은 CW-HB 제어 방법을 제안한다. 실제로 CW-HB 제어 방법은 CW 프로브 입력신호의 일부를 분기시켜 제어함으로써 매우 간단하게 구현할 수 있을 것이다. 바이어스 전류와 CW-HB를 이용한 전치증폭의 개념들은 그림 2(a)의 전치증폭기의 정적 전달 특성 곡선에 잘 나타나 있다. 그런데, 그림 2(a)에서 볼 수 있듯이, 펌프 입력신호 파워가 변화될 때 전치증폭기 상에서 항상 일정한 출력신호 파워를 얻기 위해서는 바이어스 전류와 CW-HB의 광 파워가 반대로 제어되어야 한다. 그림 2(b)는 SOA-MZI 파장변환기의 정적 전달 특성 곡선 상에서 펌프 입력신호가 전치 증폭에 의해 최적화되는 과정을 보여준다. 정적 전달 특성 곡선에서 골(valley)이 생기는 이유는 SOA-MZI 파장변환기 내의 SOA1

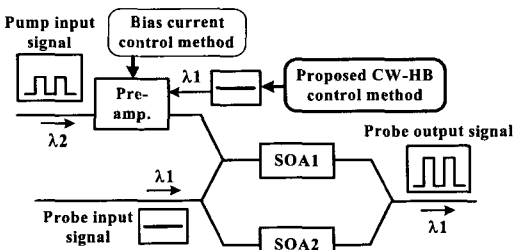


그림 1. 전치 증폭된 SOA-MZI 파장변환기의 구성도
Fig. 1. Schematic of pre-amplified SOA-MZI WC

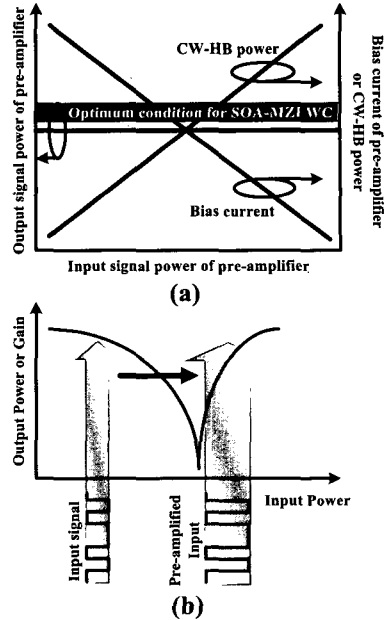


그림 2. 정적 전달 특성 곡선
(a) 전치증폭기 (b) SOA-MZI 파장변환기
Fig. 2. Static transfer characteristics curves
(a) pre-amplifier (b) SOA-MZI WC

에서 프로브 출력신호 레벨들이 펌프 입력신호 레벨들에 의해 야기되는 XPM을 겪었기 때문인데 그 기울기가 급격할수록 파장변환된 프로브 출력신호의 소광비가 최대가 된다.^[7] 결론적으로, 바이어스 전류 제어 방법과 CW-HB 제어 방법 모두에서, 넓은 파워 레벨 범위의 펌프 입력신호가 전치증폭기로 입사하더라도 전치균등화를 통해 그 출력신호의 크기가 항상 일정한 최적의 값을 유지하도록 제어함으로써 SOA-MZI 파장변환기의 좁은 IPDR을 크게 확장시킬 수 있다. 여기에서 주목해야 할 점은 SOA를 전치증폭기로 사용할 때 바이어스 전류 제어 방법에서는 두 가지 큰 단점들이 발견된다는 것이다. 그것들은 출력펄스 상에서 오버슈팅과 언더슈팅과 같은 출력신호의 왜곡이 발생하고 EDFA (erbium-doped fiber amplifier)보다 높은 NF(noise figure)를 갖는다는 것이다^[8]. NF는 증폭기의 입력단과 출력단 사이의 SNR(signal-to-noise ratio)들의 비로서 정의되는데 그 값이 클수록 증폭기에서 발생하는 잡음이 크다. 오버슈팅과 언더슈팅에 의한 출력펄스의 왜곡의 경우 그 크기는 데이터의 전송속도와 비례한다. 만일 10Gb/s 이상의 높은 전송속도에서 낮은 파워를 가진 펌프 입력신호를 증폭하기 위하여 전치증폭기의 바이어스 전류를 증가시키면, 주입된 바이어스 전류에 의해 캐리어 수명

(lifetime)은 감소하고 광 이득 회복율(recovery rate)은 증가하여 광 이득 다이내믹스가 다소 빨라지지만 오버슈팅과 언더슈팅에 의한 출력펄스의 왜곡을 막기에는 충분하지 못하다. 더구나 높은 파워를 가진 펌프 입력신호가 전치증폭기로 들어올 경우 바이어스 전류의 양이 적어지도록 제어하게 되는데 이 경우 적어진 바이어스 전류의 양에 의해 광 이득 다이내믹스가 더 늦어지게 되어 오버슈팅과 언더슈팅에 의한 출력펄스의 왜곡은 더욱 심해지게 된다. 이와 같은 전치증폭기의 왜곡된 출력펄스가 SOA-MZI 파장변환기의 펌프 입력신호가 되면 SOA-MZI 파장변환기로부터 나오는 파장 변환된 프로브(probe) 출력신호도 크게 왜곡되어진다. 또한, 전치증폭기로서 SOA를 사용할 때, 그 출력 신호는 높은 반전 분포율(inversion population factor)에 의해 높은 NF를 가지기 때문에 상대적으로 낮은 소광비를 가진다⁸⁾. 바이어스 전류 제어 방법이 갖고 있는 이러한 치명적인 문제들은 우리는 제안한 CW-HB를 이용한 전치증폭기의 출력 광 파워 제어 방법을 이용하면 해결될 수 있다. CW-HB를 전치증폭기인 SOA에 주입하여 제어하면 SOA의 유도 재결합율(stimulated recombination rate)을 크게 증가시키고 캐리어 수명을 크게 줄여서 광 이득 회복율을 크게 높인다⁶⁾. 이렇게 높여진 광 이득 회복율에 의해 오버슈팅과 언더슈팅에 의한 출력펄스의 왜곡을 제거할 수 있다. 더 나아가 CW-HB는 반전 분포율과 ASE(amplified stimulated emission)를 감소시켜서 NF를 줄일 수 있기 때문에 파장 변환된 프로브 출력신호의 소광 비를 낮출 수 있다⁸⁾.

III. 실험

그림 3은 제안된 구조를 구현한 실험 셋업이다. SOA-MZI 파장변환기는 모놀리식으로 집적된 형태가 아닌 이산적인 광소자들로 구성된 하이브리드

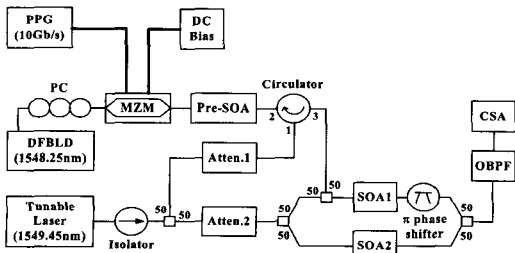


그림 3. 실험 셋업
Fig. 3. Experimental setup

형태로 되어 있다. 가변 레이저(tunable laser)의 출력은 SOA-MZI 파장변환기로 들어가는 프로브 입력신호와 전치증폭기의 CW-HB로 분기되는데 그 파장은 1549.45nm이고 DFB LD(distributed feedback laser diode)로부터 나온 펌프 입력신호의 파장은 1548.25nm이다. 펌프 입력신호는 PPG(pulse pattern generator)로부터 2⁷-1 PRBS(pseudo random binary sequence)의 NRZ(non-return-to-zero) 패턴들을 가지고 9.95328Gb/s(OC192/STM64)의 전송속도로 MZM(Mach-Zehnder Modulator)에서 외부 변조된다. 프로브 입력신호(0.1mW)와 CW-HB는 각각 별도의 감쇄기(attenuator)들을 통하여 그 크기가 조절된다. SOA-MZI 파장변환기 내의 SOA1과 SOA2의 바이어스 전류는 각각 180mA와 100mA로 결정했는데 여기에서 나오는 프로브 출력 신호는 CSA(communication signal analyser)에서 측정되어진다. OBPF(optical band pass filter)는 불필요한 펌프 출력신호를 차단하고 프로브 출력신호만을 통과시키는 역할을 한다.

IV. 결과 및 고찰

IPDR의 개선을 검증하기 위해서 우리는 바이어스 전류 제어 방식과 제안된 CW-HB를 이용한 광 제어 방식 모두의 정적(static) 동작에 대한 모의실험을 수행했다. 그림 4(a)와 4(b)는 실험과 동일한 조건하에서 각각 바이어스 전류 제어 방식과 CW-HB 제어 방식을 이용하여 얻어진 펌프 입력 신호의 정적 전달 특성 함수의 변화를 보여준다. 두 방식 모두에서 IPDR은 3~4dB에서 20dB로 크게 확장되었음을 보여주고 있다. 더구나 제어 시에 “1”의 로직 상태에서의 파워 레벨이 일정하고 XPM이 발생하는 영역의 경사각이 매우 급격하기 때문에 높은 소광 비를 가지고 출력 신호의 재생이 가능함을 보여준다. 그 다음에 우리는 바이어스 전류 제어 방식과 제안된 CW-HB 제어 방식의 동적 특성을 보기 위하여 실제 실험을 수행했다. LD(DFB LD)의 입력전류를 15mA에서 40mA까지 변화시켜 가면서 실험을 수행하였는데 이 경우 LD의 출력 파워 범위는 0.1mW에서 2mW까지이다. 1mW의 LD의 출력 파워를 기준으로 할 때 기존의 바이어스 전류 제어 방식을 이용하여 얻어진 전치증폭기의 최적의 바이어스 전류는 70mA이다. 이 경우에 LD의 입력 전류의 가변 범위(15mA~40mA) 내에서 SOA-MZI 파장변환기의 출력 레벨의 절대 값은 큰 차이가 없

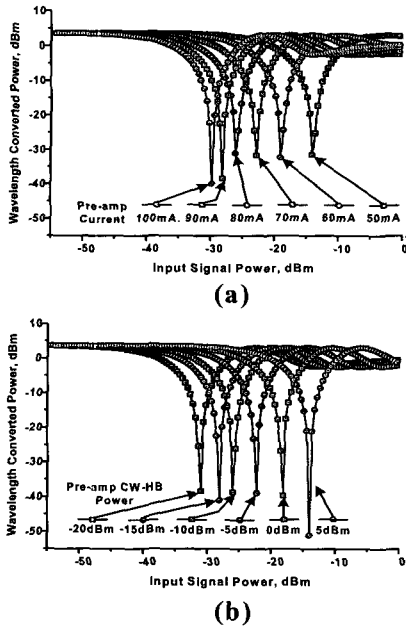


그림 4. SOA-MZI 파장변환기의 정적 전달 특성 곡선: (a) 바이어스 전류 제어 방법, (b) CW-HB 제어 방법
 Fig. 4. Static transfer characteristics curves of SOA-MZI WC: (a) bias current control method, (b) CW-HB control method

다. 파장 변환된 출력신호의 왜곡을 효과적으로 보 여주기 위해서 전치증폭기에 주입하는 바이어스 전류를 70mA로 고정한 후, LD의 입력전류가 15mA에서 40mA까지 5mA 간격으로 바뀔 때 변화하는 전치 증폭된 펄프 입력 펄스들과 파장변환된 프로브 출력 펄스들을 측정하였는데 이것들은 그림 5에 잘 나타나 있다. 그림 5에서 오버슈팅에 의한 신호 왜곡과 높은 NF에 의해 나타나는 낮은 소광 비를 볼 수 있다. 또한, LD의 입력전류가 커질수록 LD의 출력 파워가 커질수록 늦은 광 이득 다이내믹스 때문에 프로브 출력신호의 왜곡은 더 커짐을 볼 수 있다. 현재의 실험조건 상에서 제안된 CW-HB 제어 방식을 이용하면, LD의 출력 파워가 1mW 일 경우를 기준으로 전치증폭기의 바이어스 전류가 100mA일 때 0.3mW의 최적의 CW-HB의 광 파워를 얻을 수 있다. 그런데 이 경우에도 LD의 입력전류의 가변 범위(15mA~40mA) 내에서 SOA-MZI 파장변환기의 출력 레벨의 절대 값은 큰 차이가 없다. 바이어스 전류 제어 방법과 동일한 실험 조건을 만들기 위하여 전치증폭기에 주입하는 CW-HB의 광 파워를 0.3mW로 고정한 후, 이 조건에서 LD의 입력 전류가 15mA에서 40mA까지 5mA 간격으로 증가할 때 변화하는 전치 증폭된 펄프 입력 펄스들

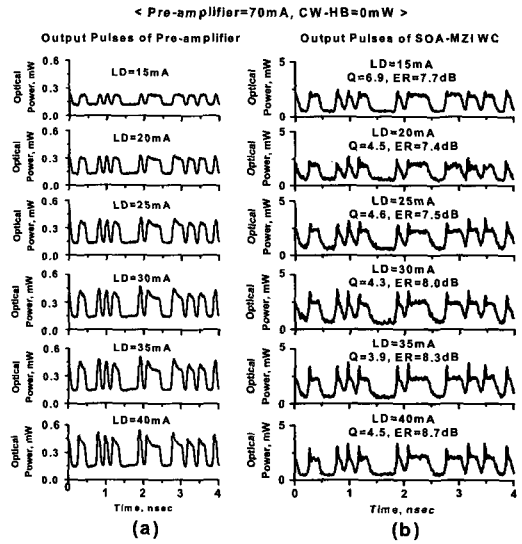


그림 5. 바이어스 전류 제어 방법: LD의 입력 전류에 따라 변화하는 (a) 전치증폭기로부터 나온 펄프 입력 펄스들과 (b) SOA-MZI 파장변환기로부터 나온 프로브 출력 펄스들(LD의 출력파워가 1mW 일 경우의 최적의 바이어스 전류 70mA 적용 시)
 Fig. 5. Bias current control method: (a) pump input pulses from pre-amplifier and (b) probe output pulses from SOA-MZI WC by variation of input currents of LD. (as applying optimal bias current of 70mA in case of LD output power of 1mW)

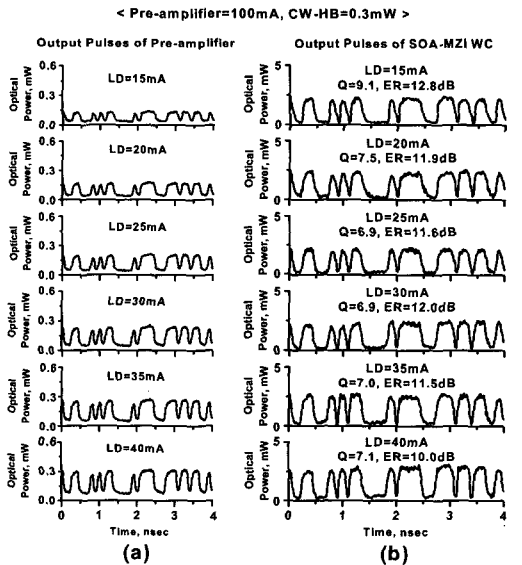


그림 6. CW-HB 제어 방법: LD의 입력 전류에 따라 변화하는 (a) 전치증폭기로부터 나온 펄프 입력 펄스들과 (b) SOA-MZI 파장변환기로부터 나온 프로브 출력 펄스들(LD의 출력파워가 1mW이고 바이어스 전류가 100mA 일 경우의 최적의 CW-HB 파워 0.3mW 적용 시)
 Fig. 6. CW-HB control method: (a) pump input pulses from pre-amplifier and (b) probe output pulses from SOA-MZI WC by variation of input currents of LD(as applying optimal CW-HB power of 0.3mW in case of LD output power of 1mW & pre-amplifier bias current of 100mA)

과 프로브 출력 펄스들을 측정하였는데 이것들은 그림 6에 잘 나타나 있다. 그림 6에서는 오버슈팅에 의한 신호왜곡이 거의 없고 낮은 NF로 인하여 높은 소광 비를 가지고 있음을 볼 수 있다. 결국 바이어스 전류 제어 방법에 비해 2~3 정도 높은 Q 파라미터와 2~5dB 정도 높은 소광 비가 구현되어 신호 품질 측면에서 제안된 CW-HB 제어 방법이 매우 우수함을 보여준다.

V. 결론

제안된 CW-HB 제어 방법은 기존의 바이어스 전류 제어 방법에 비해 IPDR의 개선 측면에서는 비슷한 성능을 가지지만 빠른 광 이득 다이내믹스에 의한 왜곡되지 않은 출력 펄스들과 낮은 NF에 의한 높은 소광 비를 달성할 수 있기 때문에 출력 신호의 품질의 측면에서 매우 우수함을 알 수 있다. 따라서 CW 프로브 입력 신호의 일부를 분기시켜 그 크기를 제어하며 전치증폭기에 주입함으로써 SOA-MZI 파장변환기의 출력 신호 품질을 크게 개선할 수 있음을 보여준다.

참고 문헌

[1] 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 Photon. Technol. Lett.*, Vol. 6, No. 1, pp. 53-55, 1994.

[2] S. L. Danielsen, "All optical wavelength conversion schemes for increased input power dynamic range", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 10, No. 1, pp. 60-62, 1998.

[3] L. H. Spiekman, "All-optical Mach-Zehnder wavelength converter with monolithically integrated preamplifiers", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 10, No. 8, pp. 1115-1117, 1998.

[4] J. Y. Emery, "Increased input power dynamic range of Mach-Zehnder wavelength converter using a semiconductor optical amplifier power equalizer with 8dBm output saturation power", *IEE Electron. Lett.*, Vol. 35, No. 12, pp. 995-996, 1999.

[5] J. Endo, A. Ohki, R. Sato, T. Ito, Y.

Tohmori, and Y. Suzuki, "Wide input dynamic range cross-phase modulated wavelength conversion using an SOA-based automatic power equalizer", *Proc. 7th Optoelectronics Communication Conf.(OECC)*, pp. 275-277, 2002.

[6] J. Yu and P. Jeppesen, "Improvement of cascaded semiconductor optical amplifier gates by using holding light injection", *J. Lightwave. Technol.*, Vol. 19, No. 5, pp. 614-623, 2001.

[7] S. J. B. Yoo, "Wavelength conversion technologies for WDM network applications", *J. Lightwave. Technol.*, Vol. 14, No. 6, pp. 955-966, 1996.

[8] A. Crottini, F. Salleras, P. Moreno, M. A. Dupertuis, B. Deveaud, and R. Brenot, "Noise figure improvement in semiconductor optical amplifiers by holding beam at transparency scheme", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 17, No. 5, pp. 977-979, 2005.

김 주 엽 (Joo-Youp Kim)

정회원



1993년 2월 성균관대학교 전자공학과 학사 졸업
1995년 2월 성균관대학교 전자공학과 석사 졸업
1995년 8월~현재 삼성전자(주)
2002년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정

<관심분야> 광통신 공학

한 상 국 (Sang-Kook Han)

정회원



1986년 2월 연세대학교 전자공학과 학사 졸업
1988년 University of Florida 전기공학과 석사 졸업
1994년 University of Florida 전기공학과 박사 졸업
1994년~1996년 현대전자(주)

1996년~현재 연세대학교 전기전자공학과 교수

<관심분야> 광통신 공학