이중 전극 구조를 이용한 반도체 레이저의 직접 변조 성능 향상

성혁기*

Improvement of Direct-Modulation Performances of Semiconductor Lasers by using
Dual-Electrode Structure

Hyuk-Kee Sung*

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의
지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 2010T100100855)

요 약

반도체 레이저의 직접 변조 시에 발생하는 레이저의 주파수 처핑(chirping) 현상을 감소시켜 직접 변조를 하는 레이저 다이오드의 변조 특성을 향상시키기 위하여 이중 전극을 가진 구조의 반도체 레이저를 제안하였다. 이중 전극 레이저는 일반적인 측면 방출형 반도체 레이저와 달리 하나의 광이득 매질에 대하여 전기적으로 전극을 분리한 구조이다. 본 논문에서는 이중 전극 구조의 반도체 레이저를 이용하여 직접 변조시 발생하는 처핑(chirping)과 이에 따른 광신호의 선폭을 감소시킴으로써 단일 전극 구조의 레이저 다이오드와 비교하여 10-Gbps NRZ(non-return-to zero) 신호의 80-km 광전송에 대하여 2.5 dB의 광링크 수신감도 향상을 달성하였다.

ABSTRACT

We propose a novel method to reduce laser chirp and improve modulation performance in semiconductor laser by using dual-electrode structure. Dual-electrode structure is realized by segmenting a electrode on top of gain medium, as was the case of edge emitting laser diode, into electrically isolated two electrodes. By using the proposed structure, we have experimentally achieved a reduction of laser spectral width of 0.23 nm and an improvement of 2.5-dB receiver sensitivity at an 80-km fiber transmission for 10-Gbps NRZ (non-return-to zero) data stream.

키워드

반도체 레이저, 변조, 레이저 처핑, 광통신

Key word

Semiconductor laser, Modulation, Laser chirp, Optical fiber communications

* 정회원 : 홍익대학교 (교신저자, hksung@hongik.ac.kr)

접수일자 : 2011. 01. 13

심사완료일자 : 2011. 01. 25

I. 서 론

HDTV, VOD (Video On Demand), 스마트폰을 비롯한 유비쿼터스 네트워크 및 기기의 발달로 인해 사용자에게 더 많은 데이터 대역폭이 주어져야 함은 주지의 사실이다. 이를 위하여 기간망 또한 고속 정보 전송이 가능한 시스템 구조로 진화하여야만 하며, 이의 첨두에는 광전송망이 자리하고 있다. 광전송망을 이용한 대용량의 정보 전송은 여러 형태의 소자 및 시스템으로 가능하나 이를 더욱 단순화된 저비용 시스템으로 구현하고자 하는 연구들이 최근 들어 더욱 활발히 진행되고 있다. 그 중에서 반도체 레이저를 직접 변조하여 대용량 정보를 전송하는 방법은 구현의 편리성, 소자의 단순성, 저비용이라는 측면에서 외부 변조기를 이용한 시스템에 비하여 장점을 가지고 있다 [1, 2]. 그러나 반도체 레이저를 직접 변조할 때 발생하는 레이저의 주파수 chirp 현상 및 이에 따른 변조신호의 선폭 증가는 대용량 신호의 장거리 전송에 있어 제한 요소로 작용하고 있다 [3]. 즉, 변조 신호의 선폭이 넓은 경우 넓은 선폭을 가진 신호가 광섬유를 통해 전송될 경우 광섬유의 색분산 현상에 의해 전송된 신호는 심각한 열화를 가지게 된다 [4]. 이를 극복하기 위하여 외부 변조기를 사용하는 방법 이외에 레이저를 직접 변조 방법으로는 외부 광주입된 레이저를 이용하거나 [5] 다중 전극 구조의 반사형 반도체 광증폭기(Reflective Semiconductor Optical Amplifier)를 사용하는 방법이 제안되어져 오고 있다 [6]. 그러나 이러한 방법을 사용하여 반도체 레이저를 직접 변조하여 광신호 전송에 사용하는 경우에는 외부 변조기를 사용하는 경우와 마찬가지로 광전송 시스템을 구현하는 데 있어 소자가 복잡해지고, 비용이 많이 들어간다는 단점을 가지고 있어 실질적으로 반도체 레이저의 직접 변조에 따른 저비용, 단순화의 장점을 기대하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 단일화된 반도체 레이저 소자를 이용하여 레이저 직접 변조 시스템을 구현하며, 직접 변조에서 나타나는 전송 신호 대역폭의 제한 요소인 레이저 주파수 처핑 현상을 이중 전극 반도체 레이저를 이용하여 극복하고자 하였다. 다중 전극 반도체 레이저는 기본적으로 측면 방사형 DFB-LD (Distributed Feedback Laser Diode)의 제작 공정과 유사하게 구현될 수 있다. 일반적인 DFB-LD의 제작과 비교할 때 단지 레이저의

바이어스 전류 인가를 위한 전극과 변조를 위한 전극을 분리함으로써 더 이상의 추가적인 공정의 복잡함 없이 고속 데이터 전송이 가능한 단일 소자를 용이하게 구현할 수 있다.

본 논문에서는 이중 전극을 가진 DFB-LD를 직접 변조함으로써 변조시 발생하는 레이저의 주파수 처핑 현상을 감소시켜 단일 전극 레이저를 이용한 경우와 비교하여 10-Gbps NRZ (non-return-to zero) 신호 전송에 대하여 80-km 광전송시에 2.5 dB의 링크 성능 향상을 달성하였다.

II. 본 론

2.1 이중 전극을 가진 반도체 레이저의 구조

실험의 광전송 시스템에 사용될 이중 전극 반도체 레이저의 구조는 (그림 1)과 같다. 이중 전극 반도체 레이저는 일반적으로 제작되는 측면 방사형 DFB-LD와 동일한 제작 과정을 거쳐 제작할 수 있다. 일반적인 측면 방사형 DFB-LD와의 공정상의 차이점은 레이저의 바이어스 전류 인가 및 직접 변조시의 변조 신호 인가를 위한 전극을 구성할 때 (그림 1(a))와 같이 광이득 매질을 가진 광도파로 위에 단일한 전극을 생성하는 대신 전기적으로 분리된 두 개의 전극을 형성하는 공정 과정을 추가한다.

본 논문에서의 레이저의 캐비티 길이는 $1000\ \mu\text{m}$ 이며, 레이저의 광도파로를 형성하기 위하여 약 $3\text{--}4\ \mu\text{m}$ 높이의 돌출부 도파관(ridge waveguide)을 구성한다. 레이저의 상층부는 전기적 부동태화(passivation)을 위하여 SiN으로 덮혀져 있다. 두 개의 전기적으로 분리된 전극을 형성하기 위하여 금속 전극을 증착하기 전에 돌출부 도파관 가운데 부분을 약 $0.2\ \mu\text{m}$ 의 깊이로 etching하여 광도파관을 전기적으로 분리한다. 이후 분리된 광도파관 위에 각각 금속 전극을 증착함으로써 분리된 두 개의 전극을 형성할 수 있다. 이러한 과정을 거쳐 제작된 측면 방사형 레이저의 두 개의 전극 간의 전기적 저항은 $10\ \text{k}\Omega$ 이상의 높은 저항값을 갖게 되어 전기적으로 분리된 전극 효과를 얻을 수 있게 된다. 최종적으로 다중 모드를 억제하고, 레이저의 출력 값을 증가시키기 위하여 출력 측면은 ZrO_2 로 무반사 코팅된다. (그림 1(b))에

는 제작된 이중 전극 반도체 레이저의 단면이 도시되어 있다.

그림 1. 이중 전극 반도체 레이저의 구조
(a) 위에서 본 구조 (b) 단면 구조.

Fig. 1 Schematic of dual-electrode semiconductor laser (a) Top-view (b) Cross-section view.

2.2 이중 전극 구조를 가진 반도체 레이저의 직접 변조 특성

(그림 2)에는 이중 전극 반도체 레이저의 직접 변조 특성을 평가하기 위한 실험 개요도가 나타나 있다. 이중 전극 반도체 레이저의 두 개의 전극에는 모두 직류 전류가 인가되며, 한쪽 전극(전극 1)만이 전기 신호의 직접 변조를 위해 고속 변조가 가능한 RF 프로브가 연결되어 있다. 전극 1은 신호의 변조 특성을 측정하기 위하여 BER(Bit Error Rate) 측정기에 연결되어 있다. 이중 전극 레이저의 출력은 80-km 길이의 광섬유를 통하여 전송되어 두 가지 형태로 성능이 평가된다. 먼저 신호의 광학적 특성을 측정하기 위하여 OSA (Optical Spectrum Analyzer)에 의해 광스펙트럼이 분석되고, 다른 한 부분은 10-Gbps용 광검출기에 연결되며 검출된 전기적 신호는 필요한 경우 RF 증폭기에 의해 증폭된 후 샘플링 오실로스코프 혹은 BER 측정기로 연결되어 신호 파형 및 BER이 측정된다.

그림 2. 이중 전극 반도체 레이저의 변조 특성을 측정하기 위한 실험 개요도

Fig. 2 Schematic for a modulation performance characterization of a dual-electrode semiconductor laser

단일 전극 및 이중 전극에 따른 반도체 레이저의 변조 특성을 비교 평가하기 위하여 다음과 같이 직류 바이어스 및 변조 신호를 인가한다. 먼저 단일 전극 레이저의 효과를 살펴보기 위하여 전극 1에만 직류 전류 및 변조 신호를 인가한다 ($I_1 = 90 \text{ mA}$, $I_2 = 0 \text{ mA}$). 다음의 (그림 3(a))는 단일 전극 레이저로 작동시킨 경우 80-km 전송 후의 광학적 스펙트럼이 나타나 있다. 전극 1이 전기적으로 변조되지 않은 경우에는 점선으로 나타난 스펙트럼에서 보듯이 3-dB 선포이 약 0.14 nm로 측정되지만 10 Gbps의 신호로 변조되는 경우에는 레이저의 선포이 0.44 nm로 증가하게 된다. 이는 레이저의 직접 변조시 발생한 레이저의 주파수 chirp 현상이 광섬유를 통한 신호 전송에 따른 광섬유 색분산 현상과 결합하여 나타난 결과이다.

다음으로 이중 전극의 효과를 살펴보기 위하여 전극 1과 전극 2에 동시에 전류를 인가하였다. 즉, 전극 1에는 위와 동일한 값의 전류 및 변조 신호를 인가하고, 전극 2에는 추가적으로 30 mA의 전류를 인가한다 ($I_1 = 90 \text{ mA}$, $I_2 = 30 \text{ mA}$). (그림 3(b))에는 이 경우의 스펙트럼이 나타나 있다. (그림 3(b))의 실선 스펙트럼에서 볼 수 있듯이 두 전극에 동시에 전류가 인가된 경우에는 직접 변조에 따른 주파수 chirp 현상이 감소함으로써 이에 따른 전송

색분산 효과도 억제되어 선평이 0.21 nm로 측정되었다. 단일 전극 모드와 비교하여 선평에 있어 약 0.23 nm의 감소를 얻을 수 있었다. 이중 전극을 사용하여 변조를 하는 경우에서의 주파수 chirp 현상의 감소는 아래와 같이 설명될 수 있다. 이중 전극 반도체 레이저에서는 변조 전극 (이 경우 I_1)이 EAML (Electro-Absorption Modulated Laser) 혹은 외부 변조기와 유사한 역할을 하고, 직류 전류만이 인가된 전극($=I_2$)은 CW(Continuous Wave)광원의 역할을 한다. 따라서 이중전극 레이저는 마치 단일한 소자 위에 변조기와 광원을 함께 집적한 결과와 유사한 현상을 보여 직접 변조에 따른 주파수 chirp이 현저하게 감소된다.

그림 3. 10-Gbps NRZ 신호로 변조된 경우 광전송 후 광학적 스펙트럼 (a) 단일 전극 모드로 작동하는 경우 ($I_1 = 90$ mA, $I_2 = 0$ mA) (b) 이중 전극 모드로 작동하는 경우 ($I_1 = 90$ mA, $I_2 = 30$ mA)

Fig. 3 Optical spectrum under 10-Gbps NRZ data modulation (a) single-electrode operation ($I_1 = 90$ mA, $I_2 = 0$ mA) (b) dual-electrode operation ($I_1 = 90$ mA, $I_2 = 30$ mA)

(그림 4)에는 80 km 전송 후 검출된 신호에 대한 오실로스코프 측정 파형이 나타나 있다. (그림 4(a))와 (그림 4(b))는 단일 전극 작동시($I_1 = 90$ mA, $I_2 = 0$ mA)의 전송 전 및 전송 후의 eye diagram이며, (그림 4(c))와 (그림 4(d))는 이중 전극 작동시($I_1 = 90$ mA, $I_2 = 30$ mA)의 전송 전 및 전송 후의 eye diagram이다. 전송 전은 광섬유의 색분산 효과를 겪기 전이므로 단일 전극이나 이중 전극으로의 동작 여부에 관계 없이 eye opening이 유사하지만, (그림 4(b))와 (그림 4(d))를 비교하면 전송 후에는 이중 전극 동작시의 eye가 현저하게 넓음을 알 수 있다 (그림 4(d)).

그림 4. 10-Gbps NRZ 신호로 변조된 이중 전극 반도체 레이저의 전송 전 및 전송 후 eye diagram (20 ps/div.) 단일 전극($I_1 = 90$ mA, $I_2 = 0$ mA)으로 동작시 (a) 전송 전 (b) 전송 후, 이중 전극($I_1 = 90$ mA, $I_2 = 30$ mA)으로 동작시 (c) 전송 전 (d) 전송 후
Fig. 4 Eye diagram under 10-Gbps NRZ data modulation before and after fiber transmission. single-electrode operation ($I_1 = 90$ mA, $I_2 = 0$ mA) (a) before and (b) after transmission, dual-electrode operation ($I_1 = 90$ mA, $I_2 = 30$ mA) (c) before and (d) after transmission.

전송신호의 BER 특성 결과가 (그림 5)에 비교되어 있다. 이중 전극 모드로 작동하는 경우 단일 전극 모드로 작동하는 경우에 비하여 10^{-8} 의 BER을 얻기 위한 수신기 감도 성능에서 2.5 dB 이상의 이득을 얻을 수 있었다.

그림 5. 80-km 광링크를 통해 전송된 10-Gbps NRZ 신호에 대한 BER 측정 결과

Fig. 5. Measured BER performance under 10-Gbps NRZ data modulation

V. 결 론

본 논문에서는 이중 전극을 가진 반도체 레이저를 이용하여 직접 변조된 광전송 링크의 전송 특성을 향상시킬 수 있음을 보였다. 이중 전극 반도체 레이저는 단일 전극을 가진 측면 방출형 DFB-LD와 유사한 공정 과정을 거쳐 용이하게 제작될 수 있으며, 이를 직접 변조 광전송 시스템에 적용시킬 경우 직접 변조시 발생하는 주파수 chirp을 현저히 감소시킬 수 있다. 주파수 chirp을 감소시킴으로써 광섬유를 통한 장거리 전송시 광섬유의 색분산으로 인한 신호 열화를 억제할 수 있으며, 단일 전극 레이저와 비교하여 80-km 10-Gbps NRZ 광전송 링크에 대하여 2.5 dB 이상의 링크 성능 향상을 얻었다. 따라서 이중 전극 레이저는 간단한 소자 형태로 광원 및 광변조기 역할을 수행할 수 있으므로 높은 수준의 BER을 요구하는 장거리 전송에 효과적으로 사용될 수 있다. 이는 초고속 장거리 전송 시스템을 저비용으로 단순하게 구성할 수 있으므로 차세대 초고속 정보 전송 시스템에서 중요한 부분을 차지할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 2010T100100855)

참고문헌

- [1] A. Bhardwaj, S. Ristic, L. A. Johansson, C. Althouse, and L. A. Coldren, "Direct modulation bandwidth enhancement of strongly injection-locked SG-DBR laser," *Electron. Lett.*, vol. 46, no. 5, pp.362-363, 2010.
- [2] C. Chen, T. Zhaobing, K. D. Choquette, and D. V. Plant, "25-Gb/s Direct Modulation of Implant Confined Hole Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, , vol. 22, no. 7, pp.465-467, 2010.
- [3] E. Peral, W. K. Marshall, and A. Yariv, "Precise measurement of semiconductor laser chirp using effect of propagation in dispersive fiber and application to simulation of transmission through fiber gratings," *J. Lightwave Technol.*, vol. 16, no. 10, pp. 1874 -1880, 1998.
- [4] K. Sato, S. Kuwahara, and Y. Miyamoto, "Chirp characteristics of 40-gb/s directly Modulated distributed-feedback laser diodes," *J. Lightwave Technol.*, vol. 23, no. 11, pp. 3790-3797, 2005.
- [5] S. K. Hwang, andJ. M. Tian, "Chirp reduction in directly-modulated semiconductor lasers subject to external optical injection," in *IEEE Conf. Lasers and Electro-Optics (LEOS)*, 2005, pp. 798- 799.
- [6] G. de Valicourt, F. Pommereau, F. Poingt, M. Lamponi, G. H. Duan, P. Chanclou, M. A. Violas, and R. Brenot, "Chirp Reduction in Directly Modulated Multi-Electrode RSOA Devices in Passive Optical Networks," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.22, no.19, pp.1425-1427, 2010.

성혁기(Hyuk-Kee Sung)

1999년 연세대학교 전자공학과
(공학사)

2001년 연세대학교 전자공학과
(공학석사)

2006년 University of California, Berkeley 전기 및 컴퓨터
공학과(EECS) 공학박사

2007년 ~ 현재 홍익대학교 전자전기공학부 조교수

※ 관심분야: 광통신, 광소자, RF Photonics