

Influence of Injection Locking on Transmission Performance of Directly Modulated Semiconductor Lasers

Young-Kwang Seo* and Woo-Young Choi

Dept. of Electronic Engineering, Yonsei University

Abstract

Injection-locked semiconductor lasers can offer less chirping and larger bandwidth with the proper adjustment of injection parameters. In this paper, the modulation characteristics of injection-locked lasers and their performances in optical fiber transmission systems are investigated through the large-signal analysis.

반도체 레이저 다이오드 (LD)의 직접 변조 시 발생하는 chirp 은, 고속 bit rate 의 장거리 광통신 시스템 성능을 악화시키는 요소로 작용한다 [1]. 이러한 chirp 문제를 완화시킬 수 있는 한 방법으로 injection-locking 방법이 있는데, 이 경우 injection parameter 를 적절히 조절함으로써 chirp [2]을 상당히 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 변조대역폭의 향상을 기대할 수 있다 [3-4].

본 논문은 injection-locked LD 의 과도응답 및 fiber-optic 전송 성능을 large-signal 해석 및 BER (bit error rate) 계산을 통해 살펴보았다. 사용된 injection-locked LD 모델로 Van der Pol equation 에 바탕을 둔 비울방정식 [5]을 이용하였고, LD parameter 는 논문 [1]을 참조하였다. 시뮬레이션에서 사용한 데이터는 nonreturn-to-zero (NRZ) 이진 디지털 형태로, 1 Gbps, 5 Gbps, 그리고 9 Gbps 의 bit rate 에서 single-mode fiber 길이에 따른 BER 을 계산하였다. 시뮬레이션에서 사용된 기본 block diagram 은 Fig.1 과 같다. Fiber 입력으로 들어가는 Slave laser (SL)의 출력 파워는, 인가되는 광 파워에 관계없이, on 상태에서 약 3 mW, 그리고 off 상태에서 약 1 mW 로 가정된다. 외부에서 빛이 인가되지 않는 free-running (a)과 $\Delta f = -10.6$ GHz 인 injection-locking (b)에 대한 과도응답을 Fig.2 에서 보이고 있다. Fig.2-(b)의 경우 injected power ratio 는 -3 dB 로, SL 로 인가되는 ML 의 파워와 off 상태에서의 SL 출력 파워와의 비율로 정의한다. Frequency detuning, $\Delta f = f_{ML} - f_{SL}$, 의 크기는 ML 로부터 인가되는 파워에서 BER 이 가장 좋도록 하는 주파수 차이이다. Fig.2 에서 사용된 bit 의 순서는 {1, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0}이고, bit rate 는 2.5 Gbps 이다. 또한, lasing 주파수의 시간에 따른 크기 변화도 Fig.2 에서 함께 보이고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, injection locking 의 경우에 free-running 의 경우와 비교하면 chirping 의 크기가 매우 감소됨을 알 수 있다.

LD 모델링에 사용된 비울방정식에 대한 소신호 해석을 통해 얻어지는 free-running 과 injection-locked LD 의 주파수 응답이 Fig.3 에 보이고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 외부에서 빛을 강하게 인가해 줌에 따라서 변조 대역폭은 향상된다. Free-running LD 의 대역폭은 약 5.5 GHz 인 반면에, injected power ratio 가 -3 dB 인 경우 약 15.5 GHz 이다. Optical Injection 에 따른 변조 대역폭 향상과 광전송 성능과의 관계를 Fig.4 에서 살펴볼 수 있다.

Fig.4 에서는 single-mode fiber ($D = 17$ ps/km/nm)의 길이를 100 km 로 가정하였다. BER 계산을 위해 truncated pulse train, Gaussian 근사법 [1]과 optical threshold 를 사용하였다. Bit rate 에 따른 BER 의 의존성을 보기 위하여, 1 Gbps (squares), 5 Gbps (circles), 그리고 9 Gbps (triangles)의 bit rate 에서 BER 를 계산하였다. 1 Gbps 처럼 낮은 bit rate 에서는 adiabatic chirp 이 주도적이기 때문에 injection locking 의 BER 기여는 그다지 크지 못하다. 그러나, 높은 bit rate 에서는 chirp 의 크기를 결정짓는 transient chirp 이 Fig.2 에서 볼 수 있듯이 injection locking 으로 상당히 감소되기 때문에, BER 향상에 크게 기여함을 알 수 있다. SL 의 intrinsic 변조대역폭 이상의 bit rate 인 9 Gbps 에서 살펴보면, free-running 의 경우는 10^{-9} 의 BER 을 얻을 수 없지만, injection locking 의 경우는 변조대역폭의 향상 효과로 수신단의 sensitivity 가 약 -14 dBm 에서 10^{-9} BER 을 얻을 수 있다.

이상으로, 본 논문에서는 single mode 비울방정식으로 모델링이 된 injection-locked LD 에 대하여 large-signal 해석과, 이를 바탕으로 dispersion 이 고려된 single-mode fiber 에서의 광전송 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통하여, injection locking 은 chirp 을 크게 감소시킴과 동시에, 변조 대역폭의 향상에 기여함으로써 intrinsic 변조 속도의 한계성을 극복할 수 있으며, BER 측면에서 광전송 시스템 성능 향상에

기여할 수 있음을 알 수 있다.

References:

[1] J. C. Cartledge and G. S. Burley, *J. Lightwave Technol.*, vol. 7, no. 3, pp. 568-573, 1989.
 [2] G. Yabre, *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, no. 10, pp. 236-2373, 1996.

[3] T. B. Simpson and J. M. Liu, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, no. 10, pp. 1322-1324, 1997.
 [4] X. J. Meng et al., *IEEE Photon Technol. Lett.*, vol. 10, no. 11, pp. 1620-1622, 1998.
 [5] O. Lidoyné et al., *IEEE J. Quantum. Electron.*, vol. 27, no. 3, pp. 344-350, 1991.

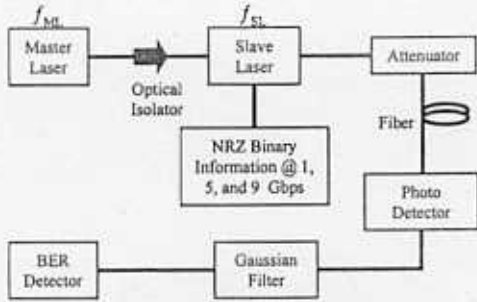


Figure 1 System configuration for simulation. The frequency detuning, Δf , is defined as $f_{ML} - f_{SL}$.

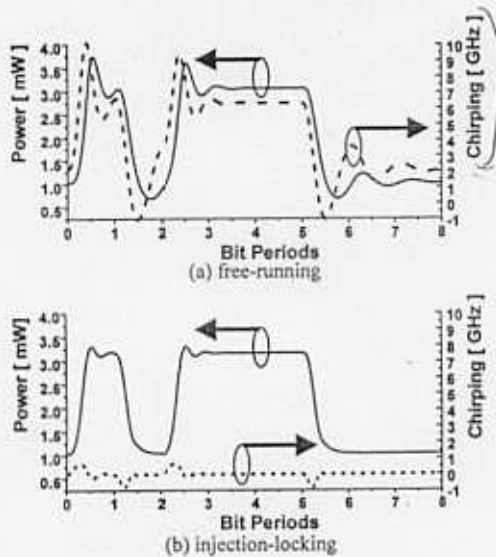


Figure 2. Transient solutions for (a) free-running, and (b) injection-locked (-3 dB) lasers. The solid lines represent optical power, and dotted lines frequency chirping

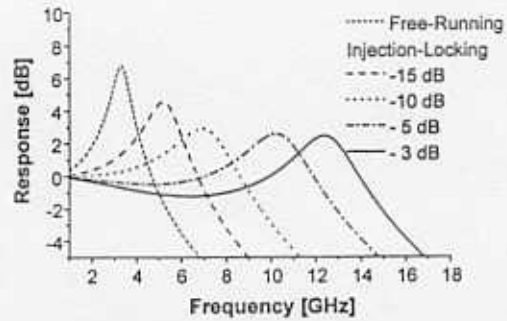


Figure 3 Modulation responses for free-running and injection-locked lasers. The emitting power per facet is at about 2 mW.

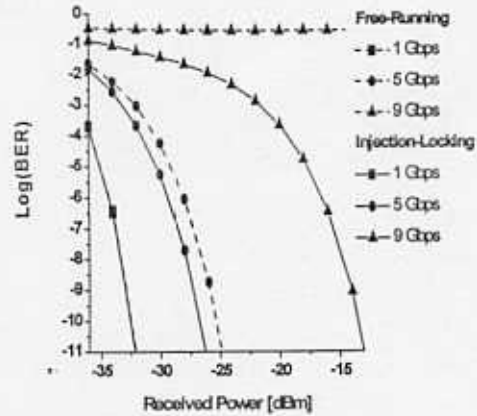


Figure 4. Calculated bit error rate at 1 (squares), 5 (circles), and 9 (triangles) Gbps. The dotted lines represent the free-running, and solid lines the injection-locked (-3 dB) lasers.

Chirp: Freq.의 변화 / or phase의 변화