

Optically Injection Lock 된 DFB 레이저에서 왜곡 성분 감소의 광 주입 파장 의존성

서준혁*, 최우영

연세대학교 전기 전자 공학과, 초고속 정보 전송 연구실

e-mail: jhseo@yonsei.ac.kr

We demonstrate the injection wavelength dependence of nonlinear distortion suppression characteristics in optically injection locked directly modulated DFB lasers. According to the optical injection wavelength, the distortion suppression amount is different. To investigate this phenomenon, we simulate the rate equation that contains optical injection term, and experimentally measure the IMD2 (Second order Intermodulation Distortion) suppression amount according to the injection wavelength within stable locking range.

아날로그 변조를 이용한 SCM (Subcarrier Multiplex) 방식에서 레이저의 직접 변조 방식은 외부 변조 방식에 비해 신호의 왜곡 영향이 크게 나타나지만, 낮은 가격으로 fiber-radio 시스템을 구현할 수 있다. 그러나 멀티미디어 서비스와 인터넷 관련 서비스의 대용량화에 따라 변조 주파수는 수 GHz 에 이르고, 레이저 직접 변조 방식에서의 신호 왜곡은 더욱 심하게 나타난다 [1]. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 optical injection locking 기법이 있다 [2].

Master laser (ML) 라는 외부 레이저의 빛을 동작 레이저인 slave laser (SL) 에 입사 할 경우 입사하는 광 출력과 주입 파장을 조절하면 SL 은 외부 레이저에 동기 된다. 이 때 relaxation oscillation 주파수가 증가하고, GHz 변조 신호 왜곡의 주 원인인 relaxation oscillation 이 높은 주파수에서 일어나, 변조 대역에서는 왜곡 성분이 줄어든다 [2].

이와 같은 특성은 안정된 locking 영역 내에서 주입하는 빛의 파장에 따라 달라진다. 이 파장 의존성을 분석하기 위해 실험을 통해 SL 에 두 개의 주파수로 변조 했을 때 생기는 IMD2 의 감소를 ML 의 파장에 따라 살펴 보았다. 이와 함께 실험 결과를 분석하고자 안정된 locking 영역에서의 주파수 응답 특성을 외부 광 주입이 고려된 rate equation model 를 통해 구하고, 주입하는 빛의 파장에 따른 relaxation oscillation 주파수의 변화와 damping 의 크기를 살펴 보았다. 이 simulation 결과와 실험 결과를 비교해 본 결과 실험 결과를 rate equation model 을 통해 설명 가능함을 알 수 있었다.

먼저 injection locking 에 의한 IMD2 의 감소를 측정하기 위해 그림 1 과 같은 실험을 구성 하였다. IMD2 는 2 개의 변조 주파수의 합에 해당하는 주파수에서 발생하는 왜곡의 크기를 나타내는 값이다. 실험에서는 SL 을 2 개의 주파수 2.8 GHz, 2.9 GHz 로 변조 하였고, 5.7 GHz 에서 이차 왜곡 성분이 발생한다. 이 때 안정된

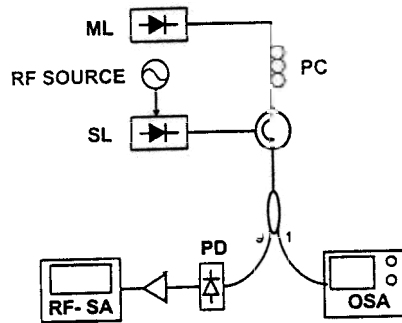


그림 1. 실험 setup. PC: Polarization Controller, PD: Photo-Detector, RF-SA: RF Spectrum Analyzer, OSA: Optical Spectrum Analyzer

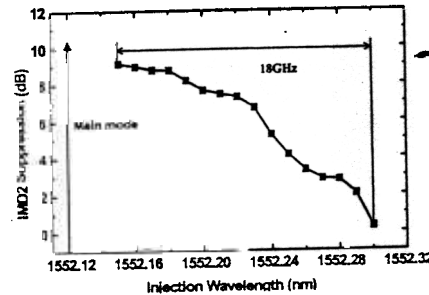


그림 2. Normalized IMD2 suppression. 18 GHz 는 stable locking 영역을 나타낸다.

locking 영역 내에서의 ML 의 파장을 변화 시키면서, 레이저의 비선형성에 의해 발생하는 IMD2 의 감소 양을 spectrum analyzer 를 통해 측정 하였다.

그림 2 는 injection locking 에 의한 주 신호의 감소를 보정한 IMD2 의 감소 양을 나타낸 실험 결과이다. ML 과 SL 의 파장 간격이 작은

경우 IMD2의 감소가 크게 나타나는데 비해 파장 간격이 큰 경우는 IMD2가 거의 줄지 않았다. 파장 간격이 작은 경우, IMD2가 줄어든 이유는 relaxation oscillation 주파수가 증가한 결과이다. 파장 간격이 큰 경우는 relaxation oscillation 주파수가 증가했지만, locking에 의해 damping이 커지고 원 신호의 크기가 줄어들었기 때문이다. 이 줄어든 크기를 free-running (no optical injection) 상태에서의 변조 신호의 크기로 보상한 결과 왜곡 억제 면에서 작은 값을 가지게 되었다. 그러나 만약 주입 광의 크기를 줄이는 방법을 써서 damping을 줄이면, 파장 간격이 작은 경우와 비슷한 결과를 얻을 수 있으리라 생각된다.

실험 결과를 분석하고자 광 주입이 고려된 다음의 rate equation을 가지고 광 주입 파장 따른 주파수 응답 특성을 분석하였다.

$$\frac{dS}{dt} = [\Gamma g_0 \frac{(N - N_t)}{(1 + \epsilon)} - \frac{1}{\tau_p}] S - R_{sp} + 2Kc \sqrt{S_{inj}} S \cos q - (1)$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{1}{2} a [\Gamma g_0 \frac{(N - N_t)}{(1 + \epsilon)} - \frac{1}{\tau_p}] - (\omega_{inj} - \omega_0) + Kc \sqrt{\frac{S_{inj}}{S}} \sin q - (2)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{qV} - \frac{N}{\tau_N} - g_0 \frac{(N - N_t)}{(1 + \epsilon)} S - (3)$$

S는 광자 밀도, Φ 는 광자의 위상, N은 캐리어 밀도, Γ 는 confinement factor, g_0 는 differential gain, N_t 는 transparent 캐리어 밀도, τ_p 는 광자의 lifetime, τ_N 는 캐리어 lifetime, ϵ 는 gain suppression factor, ω_{inj} 는 주입 광자의 주파수, ω_0 는 동작 레이저의 주파수, θ 는 주입 광자의 위상과 동작 레이저의 위상차이를 의미한다.

이 식에서부터 S, Φ , N, I에 대한 소 신호 분석과 Laplace transform을 통해 시스템 함수를 구하고, 주입 광자와 동작 레이저의 주파수 차이와 주입 광자의 크기와 동작 레이저의 크기의 비를 변수로 하여 시스템 안정화 조건을 만족하는 영역을 구하면 그림 3과 같다. 여기서 사용한 parameter는 reference [3]에서 사용한 1.55 μ m 레이저 parameter이다.

Simulation을 통해 얻은 stable locking 영역 중 injection ratio가 -8 dB인 영역에 대해 두 레이저의 주파수 차이를 -5.5 GHz에서 -37 GHz까지 변화 시키면서 주파수 응답 특성을 보면 그림 4와 같이 나타난다. 그림 4에서 ML의 파장이 SL의 파장에 가까울수록 relaxation oscillation 주파수는 더 증가한다. 그러므로 공진에 의한 왜곡 성분이 감소한다. 그러나 damping factor는 오히려 작아져서 변조 주파수를 free-running 상태에서의 주파수 동작 범위를 넘길 경우 오히려 비선형 왜곡 성분이 커질 수 있다. 한편 주파수 차이가 큰 경우는 relaxation oscillation 주파수는 크게 증가하지 않고, 대신 damping factor가 매우 커진다. 이는 resonance에 의한 비선형 왜곡 성분이 이 경우 크게 줄

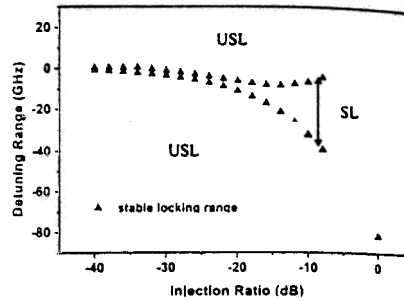


그림 3. SL: Stable Locking Range, USL: Unstable Locking Range. Injection Ratio: Ratio of the ML power to the SL power, Detuning Range: Frequency difference between ML and SL

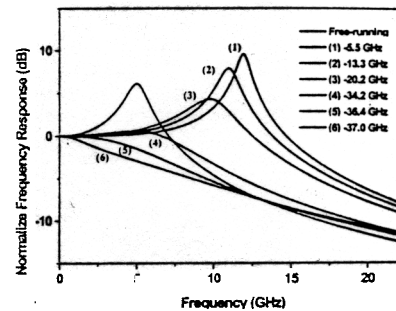


그림 4. 동작 레이저의 주파수 응답 특성.

어울 수 있지만, 동시에 변조 신호의 크기 또한 감소하여, CNR 면에서 단점이 될 수 있음을 의미한다.

이상에서 injection locking 방법에서의 광 주입 파장에 따른 특성을 살펴 보았다. 시뮬레이션 결과로 두 레이저의 파장 차이가 작은 경우 relaxation oscillation 주파수는 증가하고, damping factor는 커진다. 반면, 차이가 크면, relaxation oscillation 주파수는 크게 증가하지 않지만, damping factor가 커짐을 볼 수 있었다. 이러한 경향은 실험으로 측정된 IMD2의 감소의 특성과 일치한다.

Reference

[1] J. Helms, "Intermodulation distortions of broad-band modulated laser diodes," *J. Lightwave Technol.*, vol. 10, no. 12, pp. 1901-1906, 1992.
 [2] X. M. Meng, T. Chau, and C. Wu, "Improved intrinsic dynamic distortions in directly modulated semiconductor lasers by optical injection locking," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, Vol. 47, no. 7, pp. 1172-1176, 1999.
 [3] J. C. Cardledge, G. S. Burley, "The effect of laser chirping on lightwave system performance," *J. Lightwave Technol.*, vol. 7, no. 3, pp. 568-573, 1989.