

Analysis of Transient and Spectral Characteristics of Semiconductor Lasers under Optical Injection

Young-Kwang Seo* and Woo-Young Choi

Dept. of Electronic Engineering, Yonsei University

Abstract

The locking characteristics for semiconductor lasers under optical injection are greatly dependent upon the various parameters. We investigated locking characteristics through the large-signal and spectral analyses.

Injection parameter 를 적절히 조정함에 따라 매우 작은 phase noise, 넓은 tuning range 와 높은 안정성을 얻을 수 있기 때문에, 반도체 레이저의 injection-locking 을 이용한 coherent 광통신, 파장변환, 광스위칭, mm-wave 신호발생 등의 응용분야에서 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 mm-wave 시스템을 근간으로 하는 광대역 이동 통신망에서 injection locking 은 광 heterodyne 을 이용한 mm-wave 신호를 발생시키는 한 방법으로써, FM sideband locking, intermodal locking, 35 ~ 60 GHz mm-wave 생성 등의 이론적인 연구 및 실험들이 활발히 진행되어 오고 있다 [1]. 대부분 연구들은 -30 dB 이하의 weak injection level 에 초점이 맞추어져 있다. Injection locking 은 주어진 injection parameter 의 크기에 따라 여러 특성을 보이는데, 특히 strong injection level 에서는 그 locking range 안에서 unstable 한 특성이 나타난다 [2]. 따라서, 이에 대한 해석을 위해서, 외부로부터 인가되는 빛의 크기 및 주파수에 따른 여러 특성에 대한 해석 및 모델링 작업이 선행되어야 한다.

본 논문에서는 injection locking 특성에 대하여 large-signal 및 spectral analysis 를 이용한 해석이 이루어졌다. Injection locking 의 기본 구성(Fig. 1)은 master laser (ML)에서 나온 빛이 optical isolator 를 지나 slave laser (SL)로 인가되는 형태를 갖는다. Injection locking 에 대한 수학적 모델로 single-mode Van der Pol equation [3]을 본 해석에 사용하였으며, LD parameter 들은 논문 [4]를 참조하였다. 정적 상태의 locking 범위는 다음과 같이 locking 영역의 경계조건을 갖는다 [5].

$$\begin{aligned} \Delta\omega &= 2\pi(f_{ML} - f_{SL}) \\ &= K_C \sqrt{\frac{S_{ML}}{S_{SL}}} (\sin\theta - \alpha \cos\theta) \end{aligned}$$

여기서, K_C 는 coupling coefficient, S_{ML} 은 각각 ML로부터 SL로 인가되는 photon density, S_{SL} 은 SL cavity 내의 photon density, 그리고, θ 는 ML과

SL 간의 phase 의 차이 이다. 또한, 주어진 비율 방식에 대한 소신호 해석을 통해 얻어지는 3차 시스템 함수는 동적으로 안정된 lock 이 되기 위해서 모든 zero 는 s-domain 의 좌측에 존재하여야 한다. 위의 안정도 해석을 만족시키는 해들의 한 예가 Fig. 2 에 제시되어 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, stable-locking, unstable-locking, 그리고 unlocked 의 세 영역으로 구별된다. Fig. 3 은 이들 영역의 해들에 대한 신호 응답 및 스펙트럼을 보여주고 있다. 신호응답의 경우, 2ns 에서 $1.01 \times I_{th}$ 에서 $1.5 \times I_{th}$ 로 step-like 전류를 인가했을 때의 파형이다. 이 때 발생하는 과도응답 이후 정상상태의 한 부분을 window 로 내어서 FFT 하여 얻은 스펙트럼이 (a-2), (b-2), 그리고 (c-2)이다. 각 값들은 free-running 경우의 FFT 출력값 중 최고치로 정규화가 이루어졌다. Stable-locking (Fig. 3-a)의 경우에는 모든 SL 의 출력 광파워는 ML의 주파수에 lock 됨을 볼 수 있다. Unstable-locking (Fig. 3-b)의 경우에는 lock 이 된 파워가 정상상태의 값을 중심으로 진동하여서, Fig. 3-a 처럼 안정적으로 lock 이 되고 있지는 않지만, unlocked power 가 존재하지 않으므로 넓은 의미에서 lock 이 되었다고 정의할 수 있다. Fig. 3-b 의 스펙트럼에서 sideband 가 존재하는데, 이는 relaxation oscillation sideband 들이다. Unlocked (Fig. 3-c)의 경우에는 ML 주파수에 lock 되는 파워는 줄어드는 반면에, unlock 된 power 가 커져서 일정 정상상태에 도달함을 볼 수 있다.

이상으로, 본 논문에서는 locking 특성을 비율방정식으로 모델링하고, 이 방정식을 이용하여, step-like 전류입력에 따른 신호응답 및 FFT 를 이용한 스펙트럼 해석을 수행하였다. 이러한 모델링 및 해석은 앞으로의 mm-wave 신호 발생에 대한 이론적 모델링의 확장 및 injection locking 을 응용할 수 있는 분야의 기본 이해에 도움이 되리라 여겨진다.

References;

[1] J. Troger et al., *J. Quant. Electron.*, vol. 35, no. 1, pp. 32-38, 1999.
 [2] V. Kovanis et al., *Appl. Phys. Lett.*, vol. 67, no. 19, pp. 2780-2782, 1995.
 [3] R. Lang, *J. Quant. Electron.*, vol. 18, no. 6, pp.

976-983, 1982.
 [4] J. C. Cartledge and G. S. Burley, *J. Lightwave Technol.*, vol. 7, no. 3, pp. 568-573, 1989.
 [5] R. Hui et al., *J. Quant. Electron.*, vol. 27, no. 6, pp. 1688-1694, 1991.

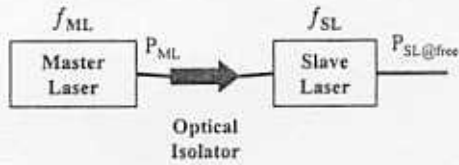


Figure 1 Basic configuration for simulation. Frequency detuning, Δf , is defined as $f_{ML} - f_{SL}$, injected power ratio as $P_{ML} / P_{SL@free}$. $P_{SL@free}$ is the SL emitting power under no optical injection, and P_{ML} the ML's injected power into SL.

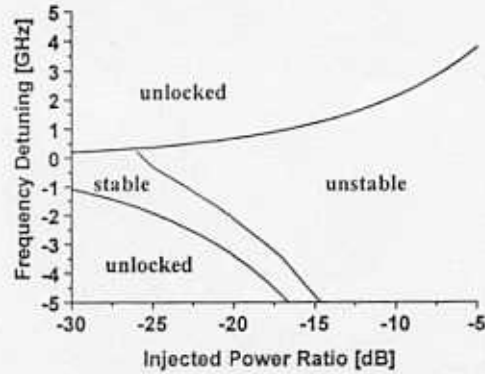


Figure 2. Locking range versus injected power ratio.

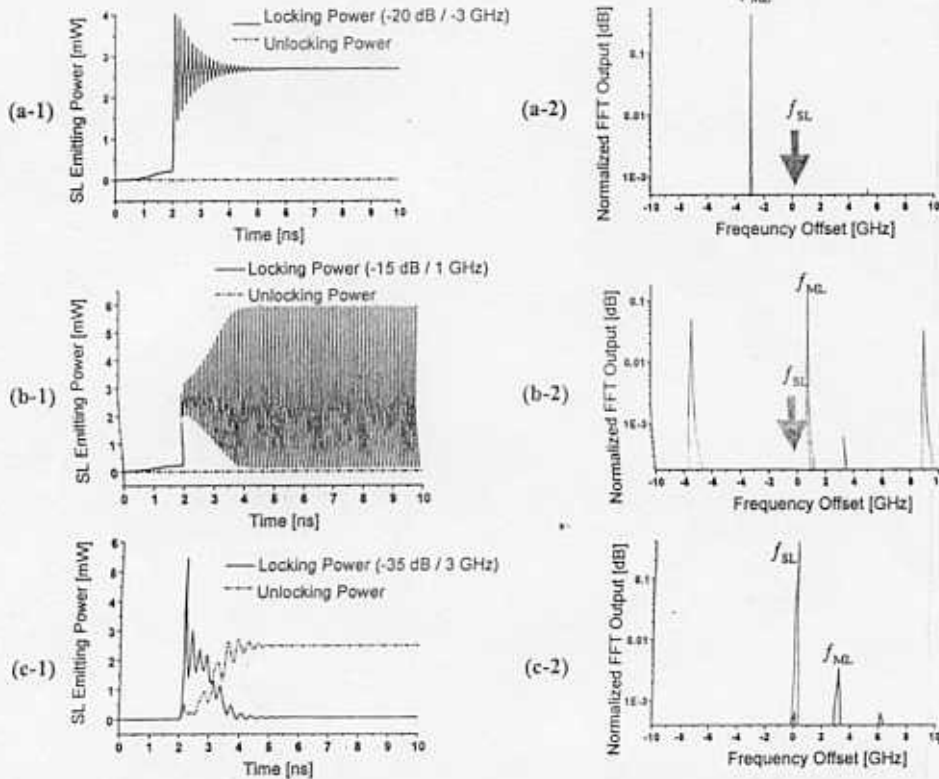


Figure 3. Modulation responses and spectra at different operating conditions: (a) stable locked, (b) unstable locked, and (c) unlocked. The initial current level is $1.01 \times I_{th}$, and step-like current is applied up to $1.5 \times I_{th}$ at 2 ns.