

반도체 레이저의 FM 응답 특성이 Optical Phase-Locked Loop 성능에 미치는 영향

Influence of Semiconductor Laser FM Response on Optical Phase-Locked Loop Performance

오 세 은*, 최 우 영
연세대학교 전자공학과

Abstract

Performance of optical phase-locked loop(OPLL) is analyzed including FM response of VCO semiconductor laser. It is found that OPLL performance parameters such as stability, maximum permissible linewidth and lock-in settle time are affected by VCO laser FM response characteristics.

최근에 마이크로웨이브 신호의 광전송과 마이크로웨이브 소자의 광 제어 등의 응용 분야에서 마이크로웨이브 대역의 광 신호 생성 및 전송에 지리에 대한 관심이 점차 증가하고 있다. 이러한 응용에 필요한 마이크로웨이브 대역의 광 반송파 생성을 위해서, 두 개의 레이저로 안정된 주파수의 광 신호를 제공하는 optical phase-locked loop(OPLL)를 사용할 수 있다.

그러나, 이러한 마이크로웨이브 대역의 광원 생성에 쓰이는 OPLL의 경우에는, 반도체 레이저의 위상 잡음과 루프 시간 지연, 그리고 반도체 레이저의 FM 응답의 영향으로 안정적인 동작을 보장하기 힘들다.

본 논문에서는 이러한 반도체 레이저의 위상 잡음과 루프 시간 지연이 OPLL 성능에 미치는 영향에 대한 연구[1],[2]를 바탕으로, VCO laser의 FM 응답 특성이 OPLL 성능에 미치는 영향을 처음으로 분석하였다. 그림 1은 레이저의 FM 응답 $D(s)$ 를 포함시킨 OPLL의 선형 모델이다.

VCO laser의 FM 응답은 FM 응답 효율을 레이저의 VCO 이득과 함께 고려할 경우, 비유 방정식의 소신호 분석으로부터 다음과 같은 식으로 주어진다. [3]

$$D(s) = \frac{1 + s(\chi\omega_p^2\tau_p)}{1 + s(1/\tau + \omega_p^2\tau_p + \chi\omega_p^2\tau_p)/\omega_p^2 + s^2/\omega_p^2} \quad (1)$$

여기서, $\omega_p (= 2\pi/\tau)$ 은 공진 주파수, τ_p 은 광자의 수명, τ 는 캐리어의 수명, χ 은 아래와 같이 정의되는 감쇄 파라미터이다.

$$\chi = \frac{\epsilon}{A\tau_p} \quad (2)$$

A는 temporal gain cross section, ϵ 는 gain compression factor이다.

공진 주파수와 감쇄 파라미터를 독립적으로 변화시키는 것은 어렵지만, 먼저 레이저 3dB 대역폭의

변화에 따른 영향을 살펴보기 위해서 공진 주파수를 8GHz로 고정된 상태에서 감쇄 파라미터를 8과 100으로 조정하여, 각각 1GHz와 10GHz의 대역폭을 갖도록 한 것이 그림 2이다.

이러한 레이저의 FM 응답을 시스템 전달함수에 포함하여 루프 안정성을 살펴본 것이 그림 2이다. 이 경우 보면, 레이저의 대역폭이 10GHz이상일 경우에 FM 응답을 고려하지 않은 경우와 같은 결과를 가지오나, 이보다 작은 경우에는 시간 지연에 대한 제한이 더욱 엄격해짐을 알 수 있다.

그림 3은 평균 사이클 슬루피가 일어나는 시간은 10년으로 하고, 시간 지연을 400ns로 하였을 때, 루프 대역폭에 따른 레이저의 최대 허용 가능한 선폭을 나타낸 것이다. 이 경우 보면, 레이저의 대역폭이 10GHz이상일 경우에 FM 응답을 고려하지 않은 경우와 같은 결과를 가지오나, 이보다 작은 경우에는 최대 허용 레이저의 선폭이 작아짐을 알 수 있다. 이것은 루프의 시스템 잡음 대역폭이 레이저의 대역폭에 의해 영향을 받아서 FM 응답을 고려하지 않은 경우보다 키저 나타나는 현상이다.

다음으로 공진 주파수의 변화에 따른 FM 응답 곡선의 비균일적인 특성을 살펴본 것이 그림 4이다. 감쇄 파라미터를 8로 고정된 상태에서 공진 주파수만을 변화시킨 경우, 응답의 3dB 대역폭은 변화하지 않는 상태에서 응답 곡선의 비균일적인 특성이 심하게 변화함을 볼 수 있다.

그림 5는 그림 4와 같은 레이저의 FM 응답 특성을 고려하여 시스템의 전달함수를 구하였을 때, 위상 개단 임피에 대한 OPLL의 과도 응답을 살펴본 것이다. 여기서 보면, 공진 주파수가 작아져 레이저의 FM 응답의 비균일성이 심하게 나타날수록 과도 응답의 초기에 작은 오실레이션이 발생하고, 이로 인해 루프의 정형시간(settle time)이 길어짐을 알 수 있다. 이것은 루프의 위상 동작을 더욱 어렵게 하는 결과

를 초래한다.

본 논문에서는 기존의 일부에서 고려하지 않았던, VCO laser의 FM 응답을 모델링하여 시스템 안정성과 레이저의 최대 허용 선폭에 대한 영향을 분석하였다. 그리고, FM 응답이 비균일적으로 바뀌에 따라서 OPLL의 위상 동기 과정에서 생기는 과도 응답이 더 오래 지속되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 연구 결과는 반도체 레이저를 이용한 실용적인 OPLL의 구현에 많은 도움을 주리라 생각한다.

참고문헌

- [1] M. A. Grant, W. C. Michie, and M. J. Fletcher, "The performance of optical phase-locked loops in the presence of nonnegligible loop propagation delay," IEEE J. of Lightwave Technol., vol. 9, pp. 1083-1093, 1991.
- [2] R. T. Ramos and A. J. Seeds, "Delay, Linewidth and bandwidth limitations in optical phase-locked loop design," IEE Electron. Lett., vol. 26, no. 6, pp. 1202-1203, 1990.
- [3] M. Kuznetsov, "High-speed frequency modulation and switching of tunable distributed feedback lasers with two active segments," IEEE J. of Quantum Electron., vol. 27, no. 3, pp. 668-677, 1991.

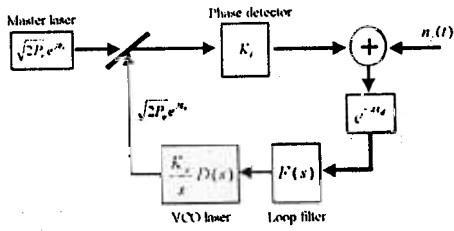


그림 1. VCO laser FM 응답을 포함한 optical phase-locked loop의 선형 모델

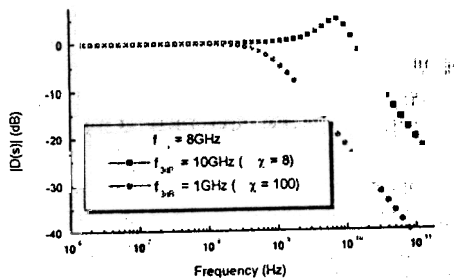


그림 2. 감쇄 파라미터의 변화에 따른 VCO laser의 FM 응답 곡선

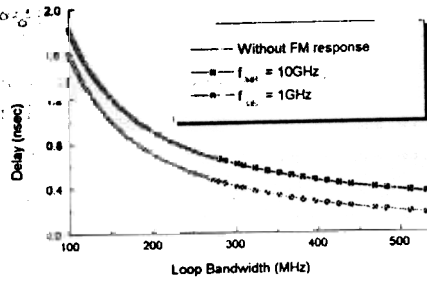


그림 3. 안정적 동작을 위한 VCO laser FM 응답의 대역폭 변화에 따른 대역폭과 시간지연의 관계

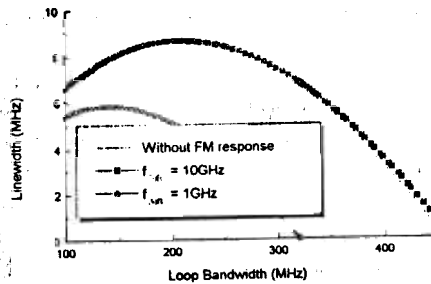


그림 4. 안정적 동작을 위한 VCO laser 응답의 대역폭 변화에 따른 레이저의 최대 허용 선폭

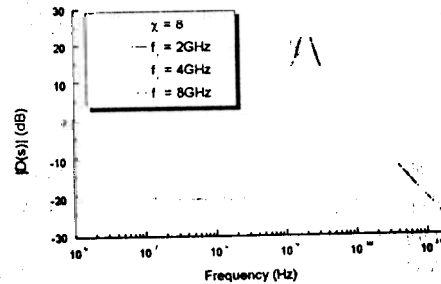


그림 5. 공진 주파수 변화에 따른 VCO laser의 FM 응답 곡선

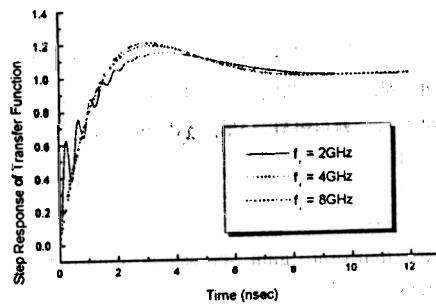


그림 6. VCO laser FM 응답의 비균일성의 정도에 따른 위상 계단 입력에 대한 OPLL의 과도 응답