

DHP

Laser Diode Simulation Harmonic Distortion

제4회 광전자공학 학술회의 논문 ThB2-4

등가회로 모델을 이용한 양자 우물 레이저 다이오드의 하모닉 디스토션 해석 (Harmonic Distortion Analysis using a Equivalent Circuit Model for Quantum Well Laser Diodes)

*김대욱, 최우영
연세대학교 전자공학과 반도체 연구실

요약 - 양자 우물 레이저 다이오드의 하모닉 디스토션을 변형된 rate 방정식을 이용한 등가회로 모델을 이용하여 살펴보았다. 모델의 정확도를 높이기 위해 leakage current와 spatial hole burning에 의한 효과를 포함하였다. 저주파 대역에서는 SHB, 그리고 고주파 대역에서는 relaxation oscillation에 의해 하모닉 디스토션이 크게 영향을 받는다는 것을 확인하였다. 하모닉 디스토션을 구하기 위해 여기서 제안된 방법은 실제 시스템에서 여러 파라미터의 하모닉 디스토션에 대한 영향을 쉽게 살펴볼 수 있는 장점이 있다.

1. 서론

양자우물(Quantum Well:QW) 레이저 다이오드(Laser Diode:LD)는 장거리 광 전송 뿐 아니라 CATV를 위한 subcarrier multiplexing (SCM) 시스템에서 사용되는 핵심 소자이다. 특히 아날로그 통신을 위한 QW LD는 신뢰성 있는 정보의 전송을 위해 뛰어난 선형성을 가져야 한다. 하모닉 디스토션(Harmonic Distortion:HD)은 신호들 사이의 간섭을 일으킬 수 있는 LD의 intrinsic한 특성인데 이것의 원인은 내부적으로는 relaxation oscillation 그리고 carrier 밀도와 optical field의 균일하지 않은 분포와 관련이 있고, 외부적으로는 LD의 current blocking 구조에서 일어나는 누설전류와 관련이 있다. 또한 DFB LD에서는 spatial hole burning(SHB)이 HD에 큰 영향을 미친다.

HD의 해석을 위한 여러 방법이 발표되었으나, 본 연구는 LD의 등가회로 모델을 이용하여 HD를 구하였다. 이제까지 알려진 LD의 등가회로 모델은 dc convergence의 문제로 인해 HD 해석이 요구하는 ac 해석을 정확하게 하기가 힘들었다[1]. 본 연구에서는 rate방정식의 변형을 통해 안정된 ac simulation을 수행할 수 있는 등가회로 모델을 구현하였으며, 이를 이용하여 누설전류, SHB등과 같은 LD의 특성이 어떻게 HD에 영향을 미치는지 연구하였다.

2. LD의 등가회로 모델

QW LD의 dynamic 특성을 기술하는 rate 방정식[2]을 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{V_a}{V_{SCH}} \cdot I = I_s + \frac{\tau_s}{\tau_n} \cdot I_s + \tau_s \frac{dI_s}{dt}$$

$$I_s = I_n + \tau_n \frac{dI_n}{dt} + G(N_w, S)(1 - \epsilon S) \cdot S$$

$$G(N_w, S)(1 - \epsilon S) \cdot S + \beta I_n = \frac{qV_a}{\Gamma \tau_p} \cdot S + \frac{qV_a}{\Gamma} \cdot \frac{dS}{dt}$$

$$\frac{S}{P_f} = \frac{\Gamma \tau_p \lambda}{V_a \eta_{sc}}$$

여기서 I는 주입된 전류, I_s와 I_n은 각각 sch와 QW의 영역의 전류, S는 광출력 그리고 P_f는 LD의 output power이다. V_a와 V_{SCH}는 active와 SCH층의 체적이고, τ_s, τ_n 그리고 τ_p는 각각 carrier transport time, carrier recombination time 그리고 photon의 life time이다. ε은 gain compression factor, Γ는 confinement

factor 그리고 β 는 stimulate emission factor 그리고 η 는 differential quantum efficiency이다. 이 식은 정상 상태에서 I_s , I_n , S , P_r 에 대해 각각 두 가지의 해를 가지고 있기 때문에 회로 시뮬레이터가 어떤 해를 동작점으로 정할지 알 수 없게 된다. 각각의 해는 양수이어야 하므로 P_r 와 active에서의 캐리어의 농도가 항상 양의 값을 갖게 하기 위해 P_r 를 $(V+a)^2$ 으로, I_n 을 $I_0 \cdot \exp(V/nV_T)$ 로 바꾸어 준다[1]. 그러면 파라미터에 따라 약간의 차이는 있으나 동작점을 찾기 위해 iteration을 몇 번만 반복하면 정확한 동작점을 찾을 수 있다. 이러한 과정을 거친 LD의 등가회로가 그림 1.에 나타나 있다. 주입된 전류는 SCH영역을 거쳐 well로 흘러 들어가고, 이 전류는 출력단에서 광 파워를 나타내는 전압(V_o)으로 바뀌는 것을 볼 수 있다. 각각의 분할된 회로들은 위 네가지 방정식을 회로로 구현한 것이다.

하나의 예로서, 이 등가 모델을 이용하여 LD의 L-I곡선과 바이어스 전류의 변화에 대한 주파수 특성의 변화를 살펴보았다(그림2, 그림3).

3. LD의 harmonic distortion

제시된 등가회로 모델을 이용하여 HSPICE의 distortion 해석을 하면 LD의 HD를 살펴볼 수 있다. 또한 LD의 누설전류는 'qADn_{po}/L'의 식으로 표현할 수 있으므로[4] 이 값에 해당하는 전류원을 병렬로 연결하면 누설전류에 의한 영향을 쉽게 고려할 수 있다. 단, 여기서 A는 누설전류가 흐르는 영역의 면적, D는 diffusion 상수, n_{po}는 정상상태에서 p-blocking 영역의 소수 캐리어 농도 그리고 L은 diffusion length이다.

현재 CATV 시스템은 수백 MHz 주파수 대역에서 동작하는데 이 대역에서는 SHB에 의한 HD의 변화가 매우 크므로 보다 정확한 해석을 위해서는 SHB를 고려해야만 한다. SHB는 coupling coefficient와 LD의 출력 파워와 밀접한 관련이 있다. 회로 모델 상에서 SHB에 의한 gain compression factor를 실제 측정치에 근사하도록 [5]에서 주어진 광 파워와 gain compression factor의 관계식을 사용하면 된다. (그림 4)는 누설전류와 SHB이 HD에 미치는 영향을 살펴보았다. 누설전류는 전체적으로 HD를 크게 만들어 준다. 하지만 SHB은 LD의 광출력이 낮을 때 LD의 이득을 낮추는 효과가 있으므로 공진 주파수 근처에서 보다 저주파 대역에서 HD에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 전체적인 gain compression factor가 커지면 대부분의 주파수 대역에서의 HD는 증가하나 damping이 커지므로 공진 주파수 근처에서의 HD이 상대적으로 줄어든다. 공진 주파수 부근에서의 HD은 relaxation oscillation에 의해서 주로 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

파라미터의 변화에 대한 HD의 예로서 differential gain의 변화에 따른 HD을 나타내었다(그림 5). Differential gain이 커지면 LD의 resonance 주파수가 커지므로 HD이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

주어진 LD의 등가회로 모델을 사용하면 dc해석과 ac해석을 쉽게 할 수 있을 뿐 아니라 많은 관심을 끌고 있는 CSO, CTB에 대한 시뮬레이션도 쉽게 수행할 수 있으며 이 연구 결과에 대해서도 workshop에서 할 예정이다.

< 참고문헌 >

- [1] S. A. Javro and S. M. Kang, J. Lightwave Technol., vol.13, No. 9, pp. 1899-1904, 1995
- [2] R. Nagarajan et al., IEEE J. Quantum Electron., vol 28, No. 10, pp. 1190-2007, 1992
- [3] David E. Dodds and M. J. Sieben, IEEE Photon Technol. Lett., Vol 7., No. 3, pp. 254-256, 1995
- [4] M. S. Lin et al., IEEE J. Quantum Electron., vol 26, No. 6, pp. 998-1004, 1990
- [5] C. Y. Kuo, J. Lightwave Technol., Vol. 10, No. 2. pp. 235-242, 1992

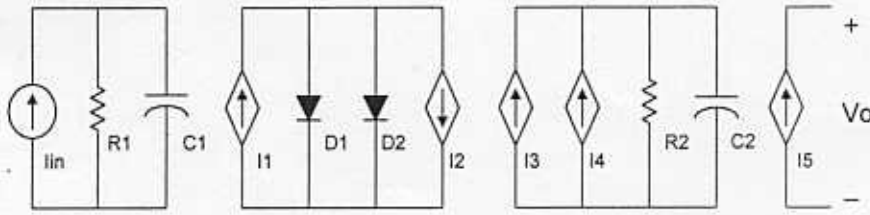


그림 1. 양자우물 레이저 다이오드의 동가회로 모델

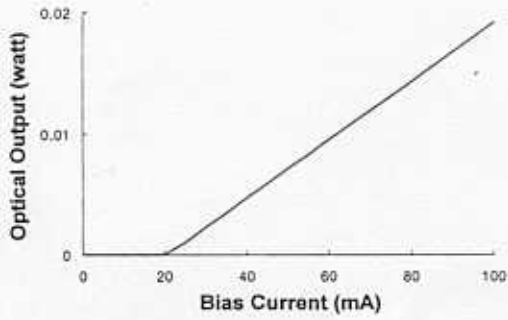


그림 2. L-I 곡선

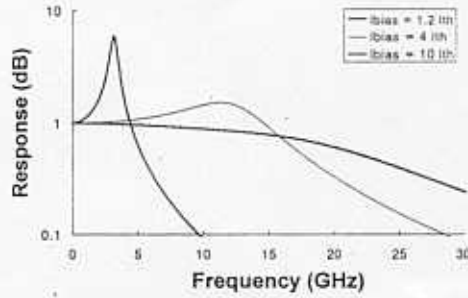


그림 3. Bias 전류에 따른 주파수 특성

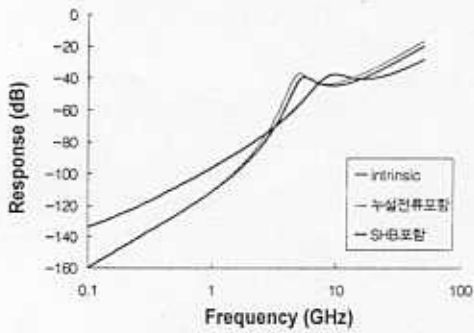


그림 4. 누설전류와 SHB이 2차 harmonic distortion에 미치는 영향

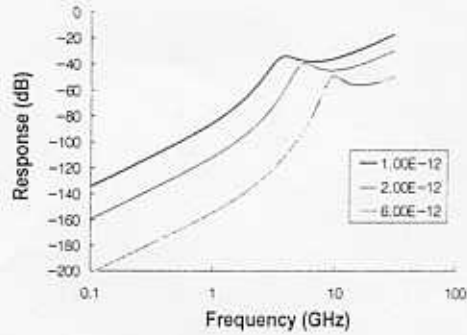


그림 5. Differential Gain의 변화에 따른 2차 harmonic distortion