

Rate Equation을 이용한 Laser Diode의 Nonlinearity 분석

이상봉, 박상현, 윤영설, 최영완
 중앙대학교 광전자 및 광통신 연구실

Nonlinearity Analysis of Laser Diode Using Rate Equation

S. B. Lee, S. H. Park, Y. S. Yun, Y. W. Choi
 Lab. of Optoelectronics and Optical Communications, Chung Ang University

Abstract -In this paper, Laser nonlinearity is analyzed by Rate Equation. Two-tone third-order intermodulation distortions are calculated from Rate Equation. Simulation results and experiment results are compared.

1. 서 론

아날로그 광통신시스템은 높은 신호대 잡음비와 양호한 선형성을 가진 송수신기가 요구된다. 비선형 왜곡과 잡음은 양호한 품질의 전송을 열화시킨다. 그 중에서도 비선형성은 CATV와 CDMA와 같은 다채널 시스템의 통신품질에 더 많은 영향을 미친다. 그리고 엄격한 품질요구를 만족하기 위해서는 Intensity Noise를 줄이는 것이 바람직하다. 높은 신호대 잡음비를 얻기 위해서는 LD의 변조폭기를 크게 하는 게 필요한데, 그것은 LD의 선형특성을 열화시키게 된다. 이런 Tradeoff는 다양한 선형화 기법에 의해서 쉽게 해결될 수 있다. 이런 다양한 선형화기법을 사용하기 위해서는 먼저 LD의 비선형성을 분석하는 것이 우선된다. 이 논문에서는 LD의 비선형성이 시스템에 미치는 영향을 Rate Equation을 이용하여 분석하였다.

2. 본 론

2.1 Rate Equation

LD의 동작특성을 구하기 위해서 가장 기본이 되는 것은 LD의 Rate equation을 모델링하는 것이다. LD의 비선형성을 구하기 위해 Rate equation[1],[2]으로부터 Photon density Q의 함수로 주입된 전류를 표현하였다.[3]

$$I_a - I_{th} = \frac{V}{T} \cdot \frac{dQ}{dt} + \frac{V}{T\tau_p} \cdot Q + \frac{V}{Tg} \cdot \frac{d}{dt} \left\{ \frac{\frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{\tau_p}}{(1-\epsilon Q)Q} \right\} \quad (1)$$

I_a 는 Laser에 주입된 전류, I_{th} 는 Laser의 문턱전류, V 는 액티브 영역에 전하량을 곱한 양, Γ 는 Optical confinement 요인, τ_p 는 Photon life time, g 는 광학 이득요인, ϵ 는 이득제한 인자이다. (1)식은 Rate Equation으로부터 유도된 수식으로부터 ϵQ_0 는 0.05보다 작기 때문에 $1 - \epsilon Q_0 \cong 1$ 이라고 가정하여 간단히 하였다.[3]

$$\begin{aligned} I_a(t) &= I_{dc} + I_{ac}(t) \\ Q(t) &= Q_0 + q(t) \end{aligned} \quad (2)$$

(2)식에서 I_{dc} 와 Q_0 는 dc량이므로 $i(t)$ 는 Talyor series를 이용하여 전개할 수 있다.[3],[4]

$$f'(Q_0) = \frac{2\epsilon Q_0 - 1}{(1 - \epsilon Q_0)^2 Q_0^2} \quad (3)$$

$$f''(Q_0) = \frac{2(3\epsilon^2 Q_0^2 - 3\epsilon Q_0 + 1)}{(1 - \epsilon Q_0)^3 Q_0^3} \quad (4)$$

$$f'''(Q_0) = \frac{6(4\epsilon^3 Q_0^3 - 6\epsilon^2 Q_0^2 - 3\epsilon Q_0 + 1)}{(1 - \epsilon Q_0)^3 Q_0^3} \quad (5)$$

이라고 할때,

$$\begin{aligned} \frac{1}{(1 - \epsilon Q)Q} &\cong f(Q_0) \cdot q + \frac{1}{2!} f''(Q_0) \cdot q^2 \\ &+ \frac{1}{3!} f'''(Q_0) \cdot q^3 \end{aligned} \quad (6)$$

와 같이 Talyor series를 전개할 수 있다. (6)식을 (1)식에 대입하면,

$$\begin{aligned} I_{ac}(t) &= D \cdot q(t) + E \cdot q'(t) + F \cdot q''(t) \\ &+ M \cdot \{q(t) \cdot q'(t)\} + N \cdot \{q'(t)\}^2 \\ &+ N \cdot \{q''(t)\} + S \cdot \{q^2(t) \cdot q'(t)\} \\ &+ 2G \cdot \{q(t) \cdot (q'(t))^2\} \\ &+ G \cdot \{q^2(t) \cdot q''(t)\} \end{aligned} \quad (7)$$

와 같은 식이 얻어진다. (7)식으로부터 세 번째까지의 전달함수를 얻게 되면, Volterra series로부터 LD의 비선형성에 의해서 생기는 IMD성분의 크기를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{IMD^{3rd}}{C} &= 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{3}{4} \cdot m^2 \cdot (I_{dc} - I_{th})^2 \right. \\ &\left. \cdot \frac{|H_3(u_1, u_1, -u_2)| \cdot |H_1(0)|^2}{|H_1(u_1)|^3} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

(8)식의 H_1, H_2, H_3 는 (7)식의 D, E, F, M, N, S,

G로부터 표현할 수 있다. 이런 값들은 모두 Laser의 변수들인 Γ , τ_p , g , ϵ , V' , Q_0 로서 표현할 수 있다.[4]

2.2 수치해석과 실험 결과

수치해석과 수치해석에 의해 나온 결과를 비교하기 위해서 실험에 사용된 LD는 Teradian InGaAsP TLD-5304이다. LD는 Strained MQW DFB 타입이며, 사용된 변수들은 표 1.에 나타내어졌다.[5] 변수들은 Strained MQW InGaAsP DFB LD의 전형적인 값들과 ILX lightwave LDC-3722B laser diode controller을 이용해 측정된 L-I 곡선(그림 1.)의 추출된 값들로부터 계산한 변수들을 사용하였다. 850MHz와 855MHz의 Two-tone신호를 Bias current와 주입 전류를 변화시키면서 시뮬레이션 하였고, 이 시뮬레이션 결과를 확인하기 위해 측정된 실험결과와 비교하였다. 비교결과는 그림 2.에 보여진다. 그림 2.로부터 시뮬레이션과 실험결과는 일치함을 알 수 있다. 오차는 시뮬레이션에는 적용되어지지 않은 active layer밖에서의 누설전류와 온도특성에 의해서 발생할 수 있다. 그런 외부변수는 LD의 비선형성에 많은 영향을 미칠 수 있지만 Rate Equation에 의한 비선형성 해석은 그것에 대한 해답을 제공하지는 않는다.

3. 결 론

아날로그 광통신시스템의 통신품질에 LD의 비선형성이 미치는 영향을 분석하기 위해 Rate Equation을 이용하였다. 이런 분석으로부터 LD의 비선형성은 아날로그 광통신에 필요한 높은 신호 대 잡음비를 얻기 위해 해결해야 하는 문제이다. 비선형성은 여러 가지 선형화 기법을 통해서 해결할 수 있고, 이렇게 해서 얻어진 선형성은 높은 신호대 잡음비를 얻게 해 줄것이다. 특히 CATV와 CDMA와 같은 다채널 시스템의 통신품질을 향상시키기 위해서 선형화기법은 사용되어야만 한다.

(참 고 문 헌)

- [1] PALLAB BHATTACHARYA, *Semiconductor Optoelectronic Devices*. Prentice Hall, 1997. pp.317-331.
- [2] R. S. Tucker, and I. P. Kaminow., "High-frequency characteristics of directly modulated InGaAsP ridge waveguide and buried heterostructure lasers," *IEEE Journ. Light. Tech.*, vol. LT-2, no.4, pp.385-393, Aug. 1984.
- [3] T. Biswas and W. McGee, "Volterra series analysis of semiconductor laser diode," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol.3, no. 8, Aug.1991, pp. 706-708
- [4] D. Hassin and R. Vahldieck, "Feedforward Linearization of Analog Modulated Laser Diodes-Theoretical Analysis and Experimental Verification," *IEEE Trans. on Micro. Theory and Tech.* vol. 41, no12, p2376-2382, Dec. 1993.
- [5] G. Rossin, R. Paoletti, "SPICE simulation for Analysis and Design of Fast 1.55 um MQW Laser Diodes.," *IEEE Journ. Light. Tech.* vol. 16, NO. 8, pp. 1509-1516, Aug. 1988

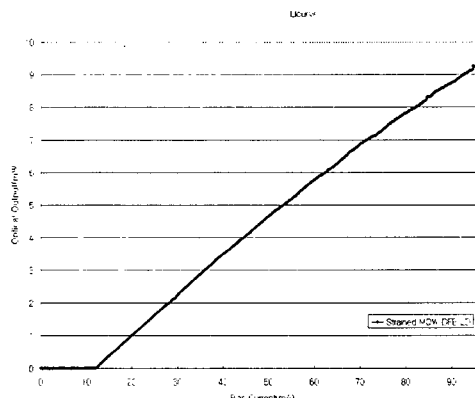


그림 1. TLD-5304의 L-I curve

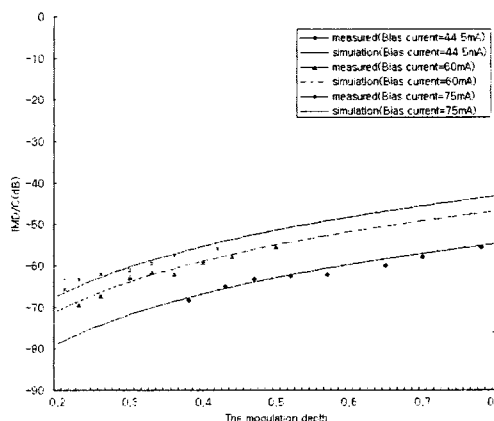


그림 2. Modulation index와 Bias level에 따른 Two-tone third-order IMD 시뮬레이션과 측정결과

표 1. 사용되어진 Laser parameter

Name	Symbol	value
Optical confinement factor	Γ	0.1175
Photon life time	τ_p	1.3750×10^{-12}
Gain coefficient	g	95000m^{-1}
Gain suppression factor	ϵ	5×10^{-17}
The volume of the active region \times the electron charge	V'	$1.47 \times 10^{-35} \text{C} \cdot \text{m}^{-3}$
Frequency 1	f_1	850MHz
Frequency 2	f_2	855MHz