

# 1550 nm InGaAsP LD 광송신회로의 PSPICE 모델 및 광변조 특성 해석

구유림 · 김종대 · 이종창<sup>†</sup>

홍익대학교 전자정보통신공학과  
⑧ 121-791 서울특별시 마포구 상수동 72-1

(2011년 1월 26일 받음, 2011년 2월 9일 수정본 받음, 2011년 2월 9일 게재 확정)

다중 비율 방정식을 이용한 1550 nm InGaAsP 레이저 다이오드의 PSPICE 등가회로 모델을 제안하고 구현하였다. 비율 방정식에 필요한 레이저 다이오드 파라미터들은 자기충족적 양자우물 해석법을 이용하여 도출하였다. 이 모델을 이용하여 실제 레이저 다이오드와 드라이버 IC를 포함하는 광송신기 회로 전체를 PSPICE로 구현하여 그 출력 값과 측정치를 비교하였다. 이 비교를 통하여 실제 레이저 다이오드의 패키징 시 발생하는 기생 커패시티 값을 산출하였다. 이를 바탕으로 한 PSPICE 출력 값은 여러 동작 주파수에서 실제 회로의 측정값과 일치함을 보였다.

## PSPICE Modeling and Characterization of Optical Transmitter with 1550 nm InGaAsP LDs

Yu-Rim Goo, Jong Dae Kim, and Jong Chang Yi<sup>†</sup>

*Electronic & Electrical Engineering, Hongik University, 72-1 Sangsu-dong, Mapo-gu, Seoul 121-791, Korea*

(Received January 26, 2011; Revised manuscript February 9, 2011; Accepted February 9, 2011)

The PSPICE equivalent circuit elements of a 1550 nm InGaAsP laser diode were derived by using multi-level rate equations. The device parameters were extracted by using a self-consistent numerical method for the optical gain properties of the MQW active regions. The resulting equivalent circuit model is also applied to an actual optical transmitter, and its PSPICE simulation results show good agreement with the measured results once the parasitic capacitance due to the packaging is taken into account.

Keywords: Optical transmitter, PSPICE modeling, Rate equation, InGaAsP laser diode

OCIS codes: (140.2020) Diode lasers; (140.5960) Semiconductor lasers; (230.5590) Quantum-well, -wire and -dot devices; (060.0060) Fiber optics and optical communications

### I. 서 론

최근 반도체 발광소자 기술은 빠르게 발달 되고 있다. 특히 광통신용 광원으로서의 레이저 다이오드는 장거리 광통신뿐만 아니라 차세대 광증계기, FTTH 등의 가입자 망, 차량용 지능형 교통망, 유비쿼터스 센서네트워크 등에도 활용되고 있다<sup>[1]</sup>. 그러나 레이저 다이오드는 통상적인 다이오드와는 달리 전류주입량이 늘어날 경우 발광으로 인하여 전류-전압 특성이 달라지며, 특히 스위칭 속도가 증가할수록 현저한 차이를 나타낸다. 현재 산업계에서 보편적으로 활용하고 있는 회로 설계 툴인 PSPICE 혹은 Cadence CAD 툴에는 이러한 특성을 효율적으로 반영하는 레이저 다이오드 용 라이브러리가 보급되지 못하고 있는 실정이다. 발광 특성을 고려

하지 않고 기존 상용프로그램을 이용하여 구동회로를 설계하여 시제품을 개발할 경우 필연적으로 여러 번의 시행착오를 거치게 될 것이다. 본 논문에서는 레이저 다이오드의 이러한 발광특성을 원리적이고 효율적으로 고려하여 주입전류레벨에 따라 변화되는 레이저 다이오드의 PSPICE 용 등가회로 모델을 개발하였다<sup>[2-7]</sup>. 본 논문에서 제안된 방법의 특징은 다중 비율방정식으로부터 직접 유도한 회로모델을 사용함으로써 레이저 다이오드의 동작특성을 완벽하게 반영할 수 있으며, 아울러 비율방정식에 필요한 파라미터 역시 다중 양자우물의 광이득 특성을 자기충족법으로 해석하여 도출해냄으로써 보다 실제적으로 양자우물구조에 따른 레이저 특성의 변화를 실제 회로에 반영할 수 있다는 점이다<sup>[8]</sup>. 이 방법을 통하여 1550 nm InGaAsP 레이저 다이오드의 등가회로

<sup>†</sup>E-mail: wave@hongik.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

모델을 구현하였고, 이를 바탕으로 하여 드라이버 IC 및 레이저 다이오드를 포함하는 광송신기 전체 회로를 PSPICE를 이용하여 구현하였다. 그리고 이를 측정값과 비교 분석 하였다.

## II. 레이저 다이오드 회로 모델링을 위한 비율 방정식

기존의 레이저 다이오드 등가회로 모델은 비 발광 결합과 이득포화를 포함하여 RLC를 이용한 소신호 모델이었다<sup>[3, 4]</sup>. 또 다른 등가회로 모델은 SCH(Separate Confinement Hetero structure) 영역과 QW(Quantum Well) 영역의 2단계 및 3단계 비율 방정식을 해석한 모델이었다<sup>[5, 6]</sup>. 본 논문에서는 Gateway 영역을 포함한 등가회로 모델을 제시하였고, QW 영역에서 발광 결합 시간 및 비 발광 결합 시간까지 고려하여 1550 nm InGaAsP MQW(Multiple QW) 레이저 다이오드의 등가회로 모델을 제시하였다.

모델링 한 레이저 다이오드는 InGaAsP SCH MQW 구조로서 그림 1에 도시되어 있다<sup>[2]</sup>. 이 구조는 10 nm의 QW 3개 층을 가지고 있으며, 계산에 사용된 활성 층(Active layer)의 길이는 300um이다. 레이저 다이오드 양단에 걸어준 입력 전류에 의해 주입된 전자와 정공은 클래딩(Cladding) 영역에서 SCH 영역을 거쳐 QW 영역에 도달한다. 이때, 전자와 정공은 SCH 영역에서 QW 영역에 포획되는 시간이 존재하고, 이러한 시간을 고려하기 위해 가상으로 그림 1과 같이 Gateway 영역을 고려해 준다. 이러한 과정을 거치면서 QW 영역에 포획된 전송자 대부분이 바뀌게 되지만, 이 중 일부는 열적 여기에 의해 QW 영역 밖으로 빠져나가게 된다.

레이저 다이오드의 변조 특성을 설명해주는 전송자와 광자의 움직임은 다음과 같은 비율 방정식으로 나타낼 수 있다<sup>[2, 7]</sup>.

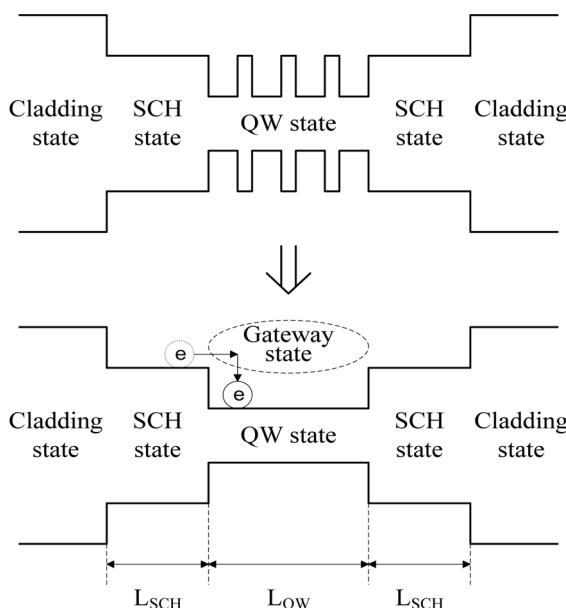


FIG. 1. The band structure of the InGaAsP MQW laser diode.

식 (1)은 SCH영역의 전송자에 대한 비율 방정식이고, 식 (2)는 Gateway영역의 전송자 비율 방정식, 식 (3)은 QW영역의 전송자 비율 방정식, 식 (4)는 광자에 대한 비율 방정식이다.

$$\frac{dN_S}{dt} = \frac{I_i}{q} - \frac{N_S}{\tau_{ns}} - \frac{N_S}{\tau_D} + \frac{N_G}{\tau_G} \quad (1)$$

$$\frac{dN_G}{dt} = \frac{N_S}{\tau_D} - \frac{N_G}{\tau_G} - \frac{N_G}{\tau_{nG}} - \frac{N_S}{\tau_G} + \frac{N_W}{\tau_{ESC}} \quad (2)$$

$$\frac{dN_G}{dt} = \frac{N_S}{\tau_D} - \frac{N_G}{\tau_G} - \frac{N_G}{\tau_{nG}} - \frac{N_S}{\tau_G} + \frac{N_W}{\tau_{ESC}} \quad (3)$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\Gamma v_g G(n_w) S}{1 + \varepsilon_p S} - \frac{S}{\tau_P} + \beta \frac{N_w}{\tau_{rw}} \quad (4)$$

여기서  $\tau_{ns}$ 는 SCH에서 비 발광 결합 시간 상수이고,  $\tau_D$ 는 SCH 영역에서 Gateway 영역으로의 운반 시간 상수이다.  $\tau_G$ 는 Gateway 영역에서 전송자의 수명 시간 상수이고,  $\tau_{nG}$ 는 Gateway 영역에서 비 발광 결합 시간 상수이며,  $\tau_{ESC}$ 는 유도 발광 되지 않고 QW 영역에서 다시 Gateway 영역으로 열 방출되는 시간 상수이다.  $\tau_C$ 는 Gateway 영역에서 QW영역으로의 포획 시간 상수이고,  $\tau_{rw}$ 는 QW 영역에서의 비발광 결합시간상수이다.  $\tau_D$ 는 SCH 영역에서 Gateway 영역으로의 운반 시간 상수이고,  $\tau_P$ 는 광자 수명 시간 상수이다.  $v_g$ 는 그룹 속도,  $\varepsilon_p$ 는 이득 억압 계수,  $\Gamma$ 는 광 기돌 계수,  $\beta$ 는 비 발광 상수,  $G(n_w)$ 는 레이저 다이오드의 이득(Gain)이다. 또한  $I_i$ 는 주입된 전류,  $N_S$ ,  $N_G$ ,  $N_W$ 는 전송자 수(Carrier Number),  $S$ 는 광자(Photon)이다.

다음은 (1)-(4) 식에서 전송자 수로 표현된 각 영역의 비율 방정식에 특정한 상수를 곱하여 등가전압에 관한 식으로 도출한 것이다.

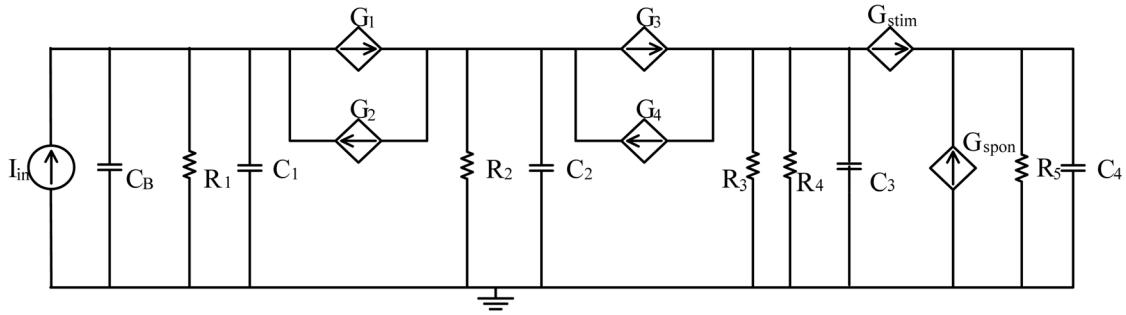
$$I_i = C_1 \frac{dV_1}{dt} + \frac{V_1}{R_1} + G_1 - G_2 \quad (5)$$

$$C_2 \frac{dV_2}{dt} = G_1 - G_2 - \frac{V_2}{R_2} - G_3 + G_4 \quad (6)$$

$$C_3 \frac{dV_3}{dt} = G_3 - G_4 - \frac{V_3}{R_3} - \frac{V_3}{R_4} - G_{stim} \quad (7)$$

$$C_4 \frac{dV_4}{dt} = G_{stim} - \frac{V_4}{R_5} + G_{spont} \quad (8)$$

여기서 각 전압과 원래 전송자 및 광자와의 관계는 아래와 같다.



In : Injection Current , G : Dependent Current Source , R : Resistance , C : Capacitor

FIG. 2. The PSPICE equivalent circuit model derived from the four-level rate equations.

### Optical Transmitter Equivalent Circuit

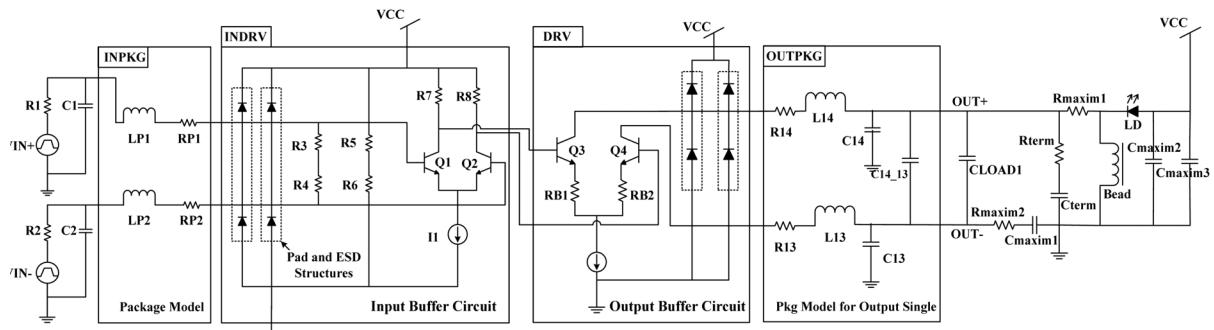


FIG. 3. Optical transmitter equivalent circuit with maxim 3296 driver IC and the LD.

$$V_1 = R_1 \frac{q}{\tau_{ns}} N_s = \frac{q}{C_1} N_s \quad (9)$$

$$V_2 = R_2 \frac{q}{\tau_{nG}} N_G = \frac{q}{C_2} N_G \quad (10)$$

$$V_3 = R_3 \frac{q}{\tau_{nW}} N_W = \frac{q}{C_3} N_W \quad (11)$$

$$V_4 = R_p \frac{q}{\tau_p} S = \frac{q}{C_p} S \quad (12)$$

$$G_{stim} = \frac{\Gamma v_g G(qC_3 V_3 / V_{QW}) C_p V_4}{1 + \varepsilon_p C_p V_4 / q} \quad (13)$$

$$G_{spon} = \beta \frac{V_3}{R_4} \quad (14)$$

여기서  $V_{QW}$ 는 QW 영역의 체적을 말한다. 다층 비율 방정식을 이용하여 유도한 레이저 다이오드 등가회로 모델은 그림 2에 도시 되어 있다. 이 등가회로에 사용된 변수들은 표 1과

TABLE 1. Parameters used in the PSPICE Equivalent Circuit Elements

Parameter	Unit	Value
G1		$(\tau_{ns}/\tau_D)*V_1$
G2		$(\tau_{nG}/\tau_G)*V_2$
G3		$(\tau_{nG}/\tau_C)*V_2$
G4		$(\tau_{nW}/\tau_{ESC})*V_3$
G_stim		$\{\Gamma v_g G(V_3)S\}/1 + \varepsilon_p S$
G_spon		$(\beta^* V_3)/(\tau_{nW}/\tau_{nW})$
C1	F	$\tau_{ns} = 1 \times 10^{-9}$
C2	F	$\tau_{nG} = 1 \times 10^{-9}$
C3	F	$\tau_{nW} = 0.35 \times 10^{-9}$
C4	F	$\tau_p = 1.7638 \times 10^{-12}$
R <sub>1,2,3,4</sub>	Ω	1, 1, 1 $\tau_{nW}/\tau_{nW}$
G(V <sub>3</sub> )	Ω	$G_0 * (C_3 * V_3 / qV_Q - n_l)$
G <sub>0</sub>	cm <sup>2</sup>	$4.59 \times 10^{16}$
n <sub>l</sub>	cm <sup>-3</sup>	$2.39 \times 10^{19}$
V <sub>Q</sub>	cm <sup>3</sup>	$9 \times 10^{-12}$
τ <sub>D</sub>	ps	48.26
τ <sub>G</sub>	ps	1
τ <sub>C</sub>	ps	0.18
τ <sub>ESC</sub>	ps	200
τ <sub>W</sub>	ps	300

같다<sup>[2, 7]</sup>.

그림 3은 LD를 구동하기 위한 Driver IC까지 포함한 전체 광 송신기(Optical transmitter)를 등가회로로 모델링 한 것이다. 실험에 사용한 Driver IC는 Maxim3296을 사용하였으며 입력단과 출력단 등가회로는 제조사 사양을 참조하였다.

### III. 특성 측정 실험과 등가회로의 비교

1Gbps와 2Gbps 팬스 패턴이 입력 신호로 인가되었을 때의 레이저 다이오드의 출력 값을 측정한 결과가 그림 4와 그림 5에 나타내었다.

이 경우 PSPICE 회로 해석 결과와 1차적으로 비교하였을 때 차이가 나는 점을 발견하였는데, 그 이유는 레이저 다이오드의 패키징 시 발생하는 기생 소자 값을 고려하지 않은 것으로 추정할 수 있다. 그러므로 그림 2의 등가회로에서 기생 커패시터  $C_B$ 의 값을 정해줄 수 있는데, 이 값을 각각 0.1pF, 1pF, 10pF, 50pF, 100pF 등으로 바꾸어 가면서 레이저 다이오드의 출력 값을 변화를 얻어내었다. 이 등가회로를 그림 3의 LD 부분의 sub-circuit으로 구성하여 전체 광송신기의 출력신호를 도시한 결과를 그림 6과 그림 7에 나타내었다.



FIG. 4. Measured input and output waveforms of the optical transmitter at 1Gbps.

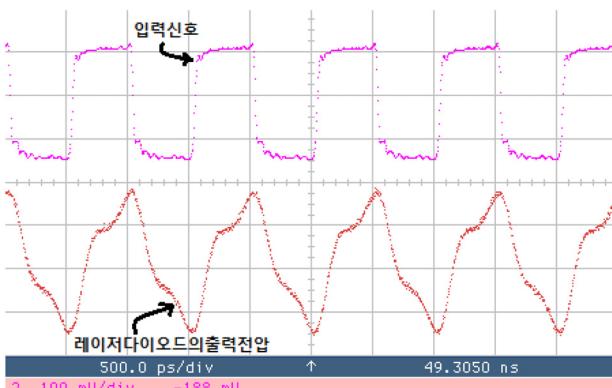


FIG. 5. Measured input and output waveforms of the optical transmitter at 2 Gbps.

먼저 1 Gbps의 경우 그림 4의 측정 신호 파형과 그림 6의 PSPICE 출력 신호를 비교하여볼 때 기생 커패시터  $C_B$ 의 값을 50pF으로 하였을 때 비교적 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 다음으로 같은 회로를 2 Gbps로 동작하였을 경우에도 그림 5의 측정 신호 파형과 그림 7의 PSPICE 출력 신호를 비교하여볼 때 기생 커패시터  $C_B$ 의 값이 50pF인 경우 비교적 서로 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 그러므로 제작된 광송신기에서 구동 IC와 LD 자체의 등가회로를 본 논문에서 제안한 PSPICE로 구현하여 그 출력 값을 실험 치와 비교하였을 때 패키징 과정에서 야기되는 기생 커패시터 값만 책정해 주게 되면 실제 광송수신기를 보다 완벽하게 PSPICE 등가회로로 구현할 수 있음을 보여주게 되었다.

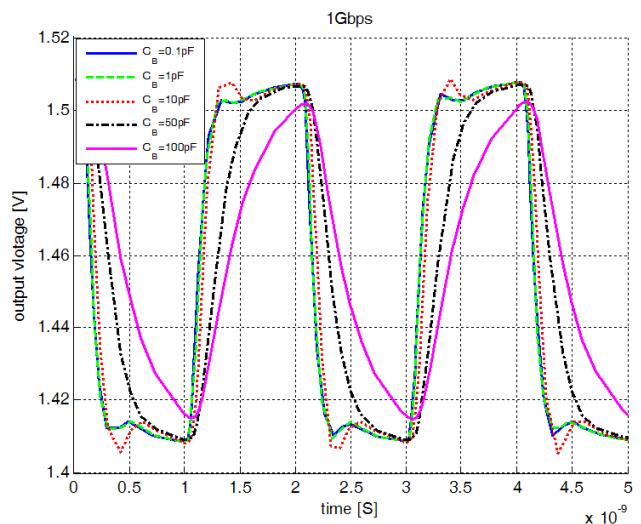


FIG. 6. PSPICE output plots of the optical transmitter at 1Gbps for various  $C_B$  values.

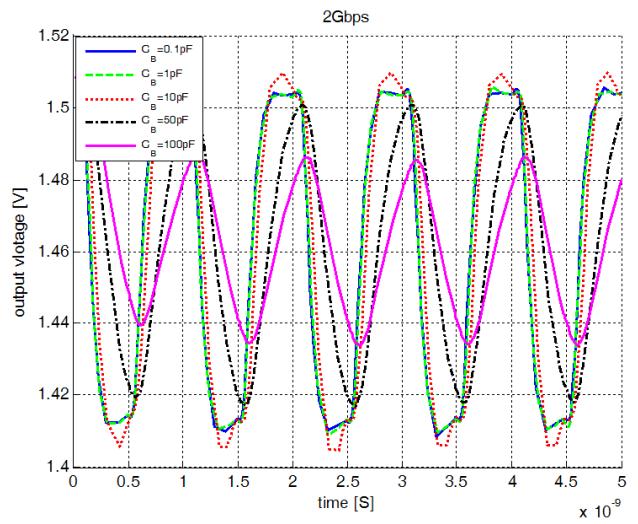


FIG. 7. PSPICE output plots of the optical transmitter at 2Gbps for various  $C_B$  values.

## IV. 결 론

본 논문에서는 4단계의 다층 비율 방정식을 통하여 레이저 다이오드의 등가회로 모델을 구현하였다. 이를 LD 구동 IC의 등가회로 및 패키징 시 야기되는 기생 커패시터 값과 결합하여 실제 광송신기 전체의 PSPICE 용 등가회로를 구현하였다. 이 등가회로의 PSPICE 출력 값을 여러 주파수에서 제작된 광송신기의 측정파형과 비교하여 등가회로 모델의 타당성을 보여주었다. 이렇게 제안된 LD 및 광송신기 전체의 PSPICE 모델은 광송신 회로의 설계 및 최적화 과정에서 시행착오를 줄이고 보다 최적화된 회로 구현에 필수적인 모델이 될 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 한국연구재단 일반 연구자 지원사업의 지원으로 이루어졌음을 밝힙니다.

## References

1. J. I. Shim, J. C. Yi, and J. Kim, *Fundamentals of Modern Semiconductor Light Emitting Devices* (Books Hill, Seoul, Korea, 2008), Chapter 3.
2. D. W. Lim, H. U. Cho, H. K. Sung, Y. M. Jhon, and J. C. Yi, "A PSPICE circuit modeling of strained AlGaN laser diode based on the multilevel rate equations," *J. Opt. Soc. Korea* **13**, 386-391 (2009).
3. M. Morishita, T. Ohmi, and J. Nishizawa, "Impedance characteristics of double hetero structure laser diodes," *Solid State Electronics* **22**, 951-962 (1979).
4. J. Katz, S. Margalit, C. Harder, D. Wilt, and A. Yariv, "The intrinsic electrical equivalent circuit of a laser diode," *IEEE J. Quantum Electronics* **17**, 4-7 (1981).
5. L. V. T. Nguyen, A. J. Lowery, P. C. R. Gurney, and D. Novak, "A time-domain model for high-speed quantum-well lasers including carrier transport effects," *IEEE J. Quantum Electronics* **1**, 494-504 (1995).
6. D. McDonald and R. F. O'Dowd, "Comparison of two-and three-level rate equations in the modeling of quantum-well lasers," *IEEE J. Quantum Electronics* **31**, 1927-1934 (1995).
7. B. P. C. Tsou and D. L. Pulfrey, "A versatile SPICE model for quantum-well lasers," *IEEE J. Quantum Electron.* **33**, 246-254 (1997).
8. J. C. Yi, H. U. Cho, and Y. M. Jhon, "Self-consistent analysis of the relative intensity noise characteristics in the strained AlGaN laser diodes with a high frequency circuit modulation effects," *J. Opt. Soc. Korea* **12**, 42-48 (2008).