

안정화를 향상시킨 양자우물 레이저 다이오드의 회로 모델링에 관한 연구

이 승 우, 최 우 영

연세대학교 전자공학과 반도체 연구실

요약

본 논문에서는 광통신 시스템의 송신단에서 중요한 역할을 하는 레이저 다이오드(LD)의 등가회로 모델에 대해서 연구하였다. 기존의 방법을 이용한 등가회로 모델과 본 연구에서 제안한 모델의 차이점을 통해 등가회로 모델의 안정성을 살펴보고, 새로운 모델을 이용하여 L-I 특성, 대신호 응답과 소신호 응답에 대해 HSPICE를 사용하여 안정적으로 시뮬레이션할 수 있음을 확인하였다.

I. 서론

기존의 LD의 등가회로 모델[1,2]은 비울방정식을 이용하여 회로적으로 모델링하였다. [1]의 등가회로 모델은 기본적인 RLC 회로를 이용하여 모델링하였으나, 이는 대신호 응답을 얻는데 적당하지 않다. 또한, [2]의 등가회로 모델은 L-I 특성과 대신호에 대해서 시뮬레이션하였고, [3]에서는 동일한 모델을 이용하여 소신호 주파수 응답을 통해 전달시간의 효과에 대해서 시뮬레이션하였다. 그러나, 본 연구에서 비울방정식을 이용하여 회로를 구성한 결과, SPICE를 이용한 시뮬레이션에서 안정성 문제가 있음을 확인하였다. 그리고, 이러한 문제점은 [4]에서 설명한 수치적인 증거를 이용하여 쉽게 알 수 있다. 따라서, LD를 안정적인 등가회로 모델로서 사용하기 위해서는 비울방정식의 변형이 필수적이고, 본 연구에서는 이를 이용하여 새로운 등가회로 모델을 제시한다. 또한, 제시한 등가회로 모델이 정확하고, 안정적임을 확인하기 위해 L-I 특성, 대신호 응답과 소신호 응답 등에 대해서 HSPICE를 이용하여 시뮬레이션하였다.

II. 기존의 모델링

먼저, 단일 양자우물(SQW) LD에서 캐리어 밀도와 광자 밀도의 다이내믹스를 나타내는 비울방정식은 다음과 같다.[5]

$$\frac{dN_{SCH}}{dt} = \frac{I}{qV_{SCH}} - \frac{N_{SCH}}{\tau_r} - \frac{N_{SCH}}{\tau_{nb}} + \frac{N_w(V_w/V_{SCH})}{\tau_s} \quad (1)$$

$$\frac{dN_w}{dt} = \frac{N_{SCH}(V_{SCH}/V_w)}{\tau_r} - \frac{N_w}{\tau_n} - \frac{N_w}{\tau_w} - \frac{N_w}{\tau_s} - g_o(N_o - N_w)(1 - \epsilon S) \quad (2)$$

$$\frac{dS}{dt} = \Gamma g_o(N_o - N_w)(1 - \epsilon S) \cdot S - \frac{S}{\tau_p} + \Gamma \beta \frac{N_w}{\tau_n} \quad (3)$$

여기서, I는 주입된 전류, S는 광자 밀도를 나타내고, N<sub>SCH</sub>, N<sub>w</sub>는 SCH영역과 QW에서 캐리어 밀도를 표현한다. 그리고, V<sub>SCH</sub>, V<sub>w</sub>는 각각 SCH영역과 QW의 체적을 나타낸다. 나머지는 비울방정식에서 일반적으로 쓰이는 값을 의미한다.

위의 비울 방정식을 변형하기 위해 식(1)에 qV<sub>SCH</sub>를 곱하고 식(2)와 식(3)에는 qV<sub>w</sub>를 곱한 후 식을 변형하면 다음과 같은 변형된 식을 얻을 수 있다.

$$I = \tau_r \frac{dI_{SCH}}{dt} + \left(1 + \frac{\tau_r}{\tau_{nb}}\right) \cdot I_{SCH} - I_{FB} \quad (4)$$

$$I_{SCH} - I_{FB} = \tau_n \frac{dI_w}{dt} + I_w \cdot \left(1 + \frac{\tau_n}{\tau_w}\right) + I_{gain} \quad (5)$$

$$I_{gain} + \beta I_w = \frac{qV_w}{\Gamma} \cdot \frac{dS}{dt} + \frac{qV_w}{\Gamma} \cdot \frac{S}{\tau_p} \quad (6)$$

여기서, I<sub>SCH</sub>, I<sub>w</sub>는 각각 qV<sub>SCH</sub>N<sub>SCH</sub>/τ<sub>r</sub>와 qV<sub>w</sub>N<sub>w</sub>/τ<sub>n</sub>이다. I<sub>FB</sub>는 τ<sub>n</sub>I<sub>w</sub>/τ<sub>s</sub>이고, I<sub>gain</sub>은 qV<sub>w</sub>g<sub>o</sub>(N<sub>w</sub> - N<sub>o</sub>)(1 - εS)에 해당한다. 위의 변형된 관계식을 이용하여 회로를 구성하면 그림 1과 같다. 기존의 모델링 방법[3]과는 달리 I<sub>w</sub>와 I<sub>SCH</sub>를 전류가 아닌 전압의 관점에서 회로를 구성하였다. 예를 들면, 식(4)에서 (1 + τ<sub>r</sub>/τ<sub>nb</sub>)<sup>-1</sup>은 저항으로 생각하고, τ<sub>r</sub>은 커패시터로 간주하여 모델링할 수 있으며, 절점 I<sub>SCH</sub>는 양단의 전압으로 모델링할 수 있다. 그러나, 기존의 모델[3]과 유사한 그림 1의 등가회로 모델은 [4]에서 언급한 바와 같이 안정성의 문제를 지니고 있다. 즉, 그림 2와 같이 비울 방정식의 정상상태에서 주입 전류에 대해서 광자밀도가 두 개의 해를 갖는 영역이 존재한다. 그러므로, 이를 해결하기 위해 비울방정식의 변형이 필요하다.

III. 제안한 모델링

위의 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 S = (m + δ)<sup>2</sup>θ와 N<sub>w</sub> = N<sub>o</sub>exp(V<sub>j</sub>/nV<sub>T</sub>)의 관계식을 비울 방정식 (1)~(3)에 대입하였다.[4] 먼저, 정상상태에서 그림 3과 같이 주입 전류에 대해 두 개의 해가 존재하는 문제점을 해결할 수 있음을 확인하였다. 그리고, 등가회로 모델을 구성하기 위해 다음과 같은 변형된 식을 얻었다.

$$I = \tau_r \frac{dI_{SCH}}{dt} + \left(1 + \frac{\tau_r}{\tau_{nb}}\right) \cdot I_{SCH} - I_{FB} \quad (7)$$

$$I_{SCH} - I_{FB} = I_{D1} + I_{D2} + I_{C1} + I_{C2} \quad (8)$$

$$2\tau_p \frac{dI_m}{dt} + I_m = I_1 + I_2 \quad (9)$$

여기서, I<sub>D1</sub>, I<sub>D2</sub>, I<sub>C1</sub>, I<sub>C2</sub>, I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>는 [5]에 자세히 설명되어 있다. 위의 식(7)~(9)를 이용하면 그림 4와 같이 등가회로 모델을 구성할 수 있다. 특히, 그림 4의 회로는 두 개의 다이오드식을 이용하는 데 I<sub>D1</sub>은 일반적인 다이오드식에 해당하는 전류이고, I<sub>D2</sub>는 다이오드와 확산 커패시터가 연결된 다이오드식에 해당하는 전류를 표현한 것이다.

IV. 시뮬레이션 및 결론

제안한 모델의 안정성을 확인하기 위해서 HSPICE를 이용하여 SCH In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As/GaAs SQW LD의 파라미터 값을 이용하여 시뮬레이션하였다. 먼저, L-I 특성을 시뮬레이션하여 약

2.4mA의 문턱전류 값을 얻었다. 그림 5와 그림 6은 각각 인가한 펄스의 바이어스 전류의 변화에 대한 대신호 펄스 응답과 SCH 길이의 변화에 따른 소신호 주파수 응답을 나타낸다. 이들 시뮬레이션을 통해 광출력의 relaxation 오실레이션은 바이어스 전류의 함수 관계임을 알 수 있다. 그리고, SCH 길이를 통해 캐리어 전달시간이 변화하고 이는 공진 주파수와 3dB 대역폭에 영향을 미침을 확인하였다. 또한, 제안한 LD 등가회로 모델은 LD 구동회로 및 패키징에서 유용하게 쓰일 것이다.

참고문헌

- [1] S. C. Kan and K. Y. Lau, "Intrinsic equivalent circuit of quantum-well lasers," IEEE Photon. Tech. Letters, vol. 4, no. 6, pp. 528-530, 1992.
- [2] M. F. Lu, J. S. Deng, C. Juang, M. J. Jou and B. J. Lee, "Equivalent circuit model of quantum-well lasers," IEEE J. of Quantum Electron., vol. 31, no. 8, pp. 1418-1422, 1995.
- [3] M. F. Lu, C. Juang, M. J. Jou and B. J. Lee, "Study of carrier transport effects on quantum well lasers using a SPICE simulator," IEE Proc.-Optoelectronics, vol. 142, no. 5, pp. 237-240, 1995.
- [4] S. A. Javro and S. M. Kang, "Transforming Tucker's linearized laser rate equations to a form that has a single solution regime," J. of Lightwave Tech., vol. 13, no. 9, pp. 1899-1904, 1995.
- [5] 이승우, 김대욱, 최우영, "양자우물 레이저 다이오드의 등가회로 모델," 전자공학회논문지, 32권(D), 1호, 1998, 게재 예정.

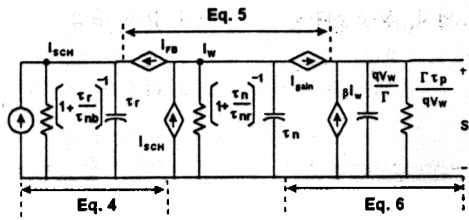


그림 1. 기존 모델링 방법을 이용한 QW LD의 등가회로 모델.

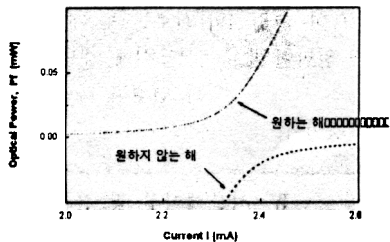


그림 2. 정상상태에서의 주입 전류와 광출력의 관계

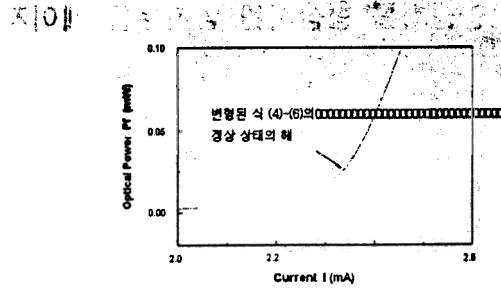


그림 3. 변형된 식(4)-(6)의 정상상태에서의 해

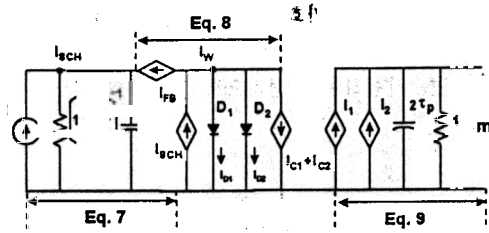


그림 4. 안정성을 향상시킨 QW LD의 등가회로 모델.

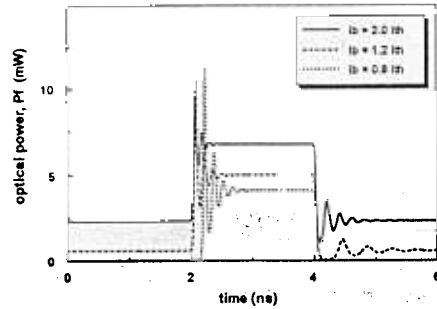


그림 5. 제안한 등가회로 모델의 펄스 응답.

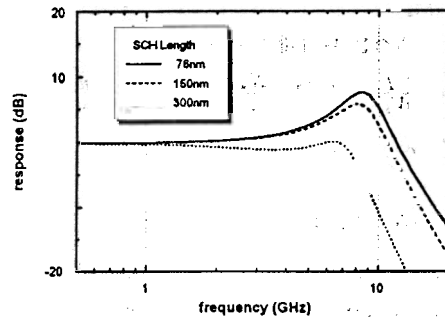


그림 6. 제안한 등가회로 모델의 주파수 응답.