

# 근사화된 캐리어 이동 모델을 이용한 MQW LD의 동적 특성 해석

## (Analysis of MQW LD dynamics using an approximate carrier transport model)

具滋容 \* 崔佑榮

(Ja-Yong Koo and Woo-Young Choi)

### 요 약

본 논문에서는 다중 양자 우물 레이저 다이오드의 동적 특성을 해석하기 위해 정공에 의해 캐리어 전송이 주된다는 가정 하에 새로운 형태의 비울방정식을 제시하였다. 제시된 비울방정식을 바탕으로 다중 양자 우물 레이저 다이오드의 직류 과도 응답 및 교류 주파수 응답의 해석을 시도하였다. 이로부터, 정상상태에서 우물간 캐리어 전송 효과의 영향으로 우물마다 캐리어 농도가 불균일함을 확인하였다. 또한 우물의 개수가 많아지면 우물간의 캐리어 전송의 영향으로 변조속도가 제한될 수 있으며, InGaAlAs 전위 장벽이 이러한 점을 개선하는데 유리함을 확인하였다. 고속 직접 변조를 위한 다중 양자 우물 레이저 다이오드의 최적화된 구조 설계시, 본 논문에서 제시된 해석 방법은 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

### Abstract

A new set of MQW LD rate equations is proposed that include the interwell carrier transport effect assuming it is dominated by holes. Solving the rate equations, the DC transient response of MQW was obtained and it was shown that uneven carrier concentrations exist due to the interwell carrier transport effect. In addition, it was found that the large number of quantum wells can limit the LD modulation speed and InGaAlAs barriers with smaller valence band offsets can have larger modulation speeds. It is expected that the proposed rate equations can find useful applications in designing the optimal MQW LD structures for high speed applications.

### I 서 론

레이저 다이오드(LD)의 직접 변조 속도를 향상시키기 위해서는 큰 차동 이득(differential gain), 작은 SCH(separate confinement heterostructure)전송시간, 큰 광자 생명시간 등의 조건을 만족시키는 레이저 구조가 필요하다. 특히, 큰 차동이득을 얻기 위해서는

MQW (Multiple Quantum Well) 구조가 사용되는 데, 그 예로써 GaAs 계열에서는 4개의 QW로 40GHz<sup>[1]</sup>, InP 계열에서는 20개의 QW를 사용하여 30GHz<sup>[2]</sup>의 3-dB 변조속도를 얻을 수 있음이 보고된 바 있다. 그러나 우물의 개수가 많아질 경우 주입된 캐리어가 각 우물까지 전달되는 시간이 길어지며 우물의 위치에 따라 캐리어가 불균일하게 분포하게 된다. 이러한 우물간 캐리어전송의 영향으로 LD의 성능 저하가 생길 수 있으며, 다중 양자 우물 구조의 최적화를 위해서는 이에 대한 정확한 해석이 필요해 진다.

LD 내의 우물간 캐리어 전송을 해석하는 방법으로는 Poisson 방정식과 연속 방정식(continuity Eq.)을

\* 正會員, 延世大學校 電子工學科  
(Dept. of Electronic Eng.,Yonsei University)  
※ 본 연구는 1997년도 교육부 학술연구조성비 (반도체 97-E-3207)에 의하여 연구되었음.  
接受日字:1998年7月20日, 수정완료일:1998年9月28日

직접 푸는 방법<sup>[34]</sup>, Wigner 함수를 이용하는 방법<sup>[5,6]</sup>, 다중 양자 우물의 평균 캐리어 농도를 이용한 방법<sup>[7]</sup> 등이 있다. Poisson 방정식과 연속방정식을 이용하는 방법은 우물 내에서 전자와 정공의 농도변화에 대한 식과 우물 위의 3D 상태에서 전자와 정공의 농도변화에 대한 식, 그리고 광자밀도와 E-field 의 변화에 대한 식 등으로 이루어져 있다. 이 방법은 bipolar transport에서 Coulomb 상호작용을 고려할 수 있고, 우물 위쪽의 3D 상태의 캐리어 농도까지 알 수 있다는 장점이 있지만, 계산이 무척 복잡하며 우물 간 캐리어 전송 효과를 직관적으로 알아보기 힘들다는 단점이 있다. Wigner 함수를 도입한 경우는 불평형 (non-equilibrium) 상태에서 캐리어의 통계적인 분포를 Wigner 함수로써 묘사하고 있는데, 이 방법에서는 공간적으로 연속적인 캐리어의 분포를 알 수 있지만 LD의 변조특성을 구하기 어렵다는 단점이 있다. 또한, 다중 양자 우물의 평균 캐리어 농도를 이용한 방법에서는 단일 양자우물을 묘사하는 비율방정식으로 다중 양자우물을 해석하여 간편한 해석이 가능한 반면에, 각 우물에서의 캐리어 농도를 알 수 없고 우물간 캐리어 전송에 대한 정보를 제공하지 않는다는 단점이 있다.

본 논문에서는 전자보다는 정공이 LD내 캐리어의 이동과 분포에 주된 영향을 미친다는 가정 하에 기존의 비율 방정식을 확장 해석하여 보다 간편한 방법으로 우물간의 캐리어 전송이 고려된 LD 동적 특성 해석을 시도하였다. 구체적으로 바이어스 전류 인가시 각 우물의 캐리어 농도와 광자밀도의 과도 응답 및 정상상태 응답을 얻었고, 이로부터 소신호 해석을 수행하여 우물간 캐리어 전송이 변조 속도에 미치는 영향을 조사하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 근사화된 캐리어 이동 모델을 이용한 MQW LD의 비율방정식에 관해 설명하였고 III장에서는 이를 이용하여 MQW LD의 과도응답 및 주파수 응답을 시도하였다. 마지막으로 IV장에서는 본 연구의 결과를 정리하였다.

## II 근사화된 캐리어 이동 모델을 이용한 LD 비율 방정식

### 1. 근사화된 캐리어 이동 모델

그림 1은 MQW LD 내에서의 캐리어의 이동을 보

여주고 있다. 그림에서 정공의 이동과정은 실선, 전자의 이동과정은 점선으로 나타내었다. 전자와 정공은 각각 N-cladding, P-cladding층을 통해 SCH영역으로 주입된다. 주입된 캐리어의 대부분은 표동과 확산으로 SCH영역을 통과하게 되고, 일부는 SCH영역에서 radiative 또는 nonradiative 형태로 재결합한다. SCH를 통과한 캐리어는 첫 번째 양자우물에 포획 (capture)되며 열적 여기(thermionic emission) 또는 터널링(tunneling)에 의해 인접우물로 전달되거나, radiative 또는 nonradiative 재결합을 하게된다.

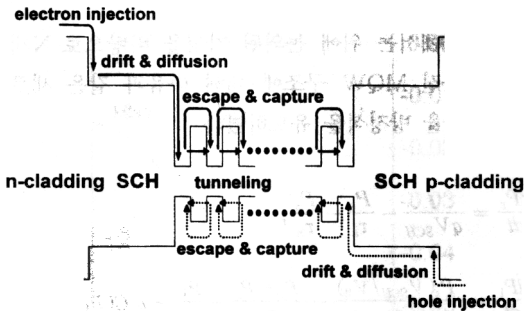


그림 1. MQW LD 내의 캐리어 이동  
Fig. 1. Carrier transport in MQW LD.

서론에서 밝힌 바와 같이 다중 양자 우물 구조에서의 캐리어의 이동을 해석하는 방법에는 여러 가지가 있으며, 각각의 방법이 그 고유의 장단점을 지니고 있다. 본 논문에서는 보다 간편하면서도 정확한 해석을 위해 캐리어 전송에 있어서 다음과 같은 사항을 가정하였다.

첫째, 캐리어 전송 과정 및 분포에는 정공이 주요한 영향을 미친다. 정공은 유효질량이 크기 때문에 우물에 포획된 후에는 쉽게 빠져나올 수 없어 인접 우물로의 전송이 어려우나, 전자는 유효 질량이 작아서 확산, 정공과의 coulomb 상호작용 등에 의해 공간적으로 균일하게 분포하기 쉽다. 이 가정은 bipolar 전송을 자세하게 해석한 연구 결과<sup>[35]</sup>와 비교할 때 큰 무리가 없음을 알 수 있다.

둘째, SCH로부터 주입된 캐리어는 모두 첫 번째 우물에 포획되며 인접한 우물로 순차적으로 전달된다. 정공이 양자 우물에 포획되는 평균 시간은 100Å 이하의 길이를 갖는 GaAs/AlGaAs 양자우물의 경우 0.3 psec 이하이며<sup>[8]</sup>, 이 시간은 다른 과정이 일어나는 평균 시간 보다 훨씬 짧다. 그러므로, SCH로부터 주

입된 캐리어 모두가 첫 번째 양자우물에 포획된다고 큰 무리 없이 가정할 수 있다. 일단 우물에 포획된 캐리어는 터널링이나 열적 여기에 의해 인접 우물로 전달되는데, 터널링으로 한 개 이상의 전위장벽을 지나서 캐리어가 전송될 확률은 매우 희박하며<sup>[9]</sup>, 열적 여기 되어 전위장벽을 통과하는 캐리어도 짧은 포획 시간 때문에 곧바로 인접 우물에 포획되기 때문에 한 개 이상의 전위장벽을 한번에 뛰어넘어 전송될 확률도 크지 않다. 이러한 가정은 다중 양자 우물을 해석한 다른 방법<sup>[10]</sup> 과도 일치한다.

## 2. 비율 방정식

본 논문에서는 위에 논의된 가정을 바탕으로 N개의 우물을 가진 MQW 구조에 대해 다음과 같은 새로운 형태의 비율 방정식을 유도하였다.

$$\frac{dP_s}{dt} = \frac{I}{qV_{SCH}} - \frac{P_s}{\tau_s} - \frac{P_s}{\tau_n} \quad (1)$$

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{P_s(V_{SCH}/V_w)}{\tau_s} - \frac{P_1 - P_2}{\tau_c} - \frac{P_1}{\tau_n} - v_g G(P_1)(1 - \epsilon S)S, \quad (2)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{P_1 - P_2}{\tau_c} - \frac{P_2 - P_3}{\tau_c} - \frac{P_2}{\tau_n} - v_g G(P_2)(1 - \epsilon S)S, \quad (3)$$

$$\frac{dP_{n-1}}{dt} = \frac{P_{n-2} - P_{n-1}}{\tau_c} - \frac{P_{n-1} - P_n}{\tau_c} - \frac{P_{n-1}}{\tau_n} - v_g G(P_{n-1})(1 - \epsilon S)S, \quad (4)$$

$$\frac{dP_n}{dt} = \frac{P_{n-1} - P_n}{\tau_c} - \frac{P_n}{\tau_n} - v_g G(P_n)(1 - \epsilon S)S, \quad (5)$$

$$\frac{dS}{dt} = \Gamma v_g (G(P_1) + \dots + G(P_n))(1 - \epsilon S)S - \frac{S}{\tau_p} + \frac{\Gamma B}{\tau_n} (P_1 + \dots + P_n) \quad (6)$$

위에서  $P_s$ 는 SCH에서 정공의 농도,  $P_1, \dots, P_n$ 는 양자우물에서의 정공의 농도,  $S$ 는 광자 밀도,  $I$ 는 주입된 전류,  $V_{SCH}$ 는 SCH의 체적,  $V_w$ 는 양자우물의 체적,  $v_g$ 는 group velocity,  $\Gamma$ 는 광가득계수,  $\epsilon$ 는 gain compression factor 이다.  $\tau_s$ 는 SCH transport time,  $\tau_n$ 은 bimolecular recombination time,  $\tau_p$ 는 광자의 life time,  $\tau_c$ 는 interwell carrier

transport time이다.  $G$ 는 광 이득이고 다음 절에서 설명된 방법으로 계산된 결과를 로그함수로 근사화하여 사용하였다. 우물간의 전송은 열적 여기, 전위 장벽에서의 확산 및 다음 우물로의 포획, 터널링을 고려하여  $\tau_c = [1/(\tau_{ther} + \tau_{bar} + \tau_{cap}) + 1/\tau_{tun}]^{-1}$  로 모델링하였고, 우물로부터 SCH로의 열적 여기는 고려하지 않았다

위의 비율방정식에 대해 살펴보면 다음과 같다. 좌변은 SCH와 각각의 우물에서의 정공의 농도 그리고 광자 밀도의 시간에 대한 변화율을 나타내며 우변에는 그 값들의 증가분 및 감소분이 고려되어 있다. 정공 농도에 대한 식에는 bimolecular recombination으로 인한 감소분이  $P/\tau_n$ 으로, 광출력에 의한 감소분은  $v_g G(P_{n-1})(1 - \epsilon S)S$  로 표현되어 있다. 인접우물로의 정공 전송은, 예를 들어 식(5)에서  $(P_{n-2} - P_{n-1})/\tau_c - (P_{n-1} - P_n)/\tau_c$  로 표현되어 있는데, 이것은 다시  $P_{n-2}/\tau_c - 2P_{n-1}/\tau_c + P_n/\tau_c$  로 쓸 수 있으며, 인접 우물에서 전송되어 들어오는 증가분  $(P_{n-2}/\tau_c + P_n/\tau_c)$ 과 인접 우물로 빠져나가는 감소분  $(-2P_{n-1}/\tau_c)$ 의 합으로 볼 수 있다. 본 논문에서는 위의 N+2차 비선형 연립 방정식을 Runge-Kutta 방법을 이용하여 수치적으로 해석하여 전류가 인가되었을 때 우물마다의 정공 농도 및 광자밀도에 대한 시간응답을 구하였다.

변조 응답(modulation response)을 얻기 위한 소신호 해석법은 다음과 같다. 우선 식(1)~(6)의 비율 방정식의 모든 변수를 다음과 같이 바꾸어 준다<sup>[11,12]</sup>.  $I = I_0 + i \cdot e^{j\omega t}$ ,  $P_s = P_{s0} + p_s \cdot e^{j\omega t}$ ,  $P_1 = P_{10} + p_1 \cdot e^{j\omega t}$ ,  $\dots$ ,  $P_n = P_{n0} + p_n \cdot e^{j\omega t}$ ,  $S = S_0 + s \cdot e^{j\omega t}$ ,  $G(P_1) = G_{10} + g_{10} \cdot p_1 \cdot e^{j\omega t}$ ,  $\dots$ ,  $G(P_n) = G_{n0} + g_{n0} \cdot p_n \cdot e^{j\omega t}$ . 여기서,  $I_0, P_{s0}, P_{10}, \dots, P_{n0}, G_{10}, \dots, G_{n0}$ 는 정상상태에서의 값들이며 위의 비율방정식을 적분하여 얻을 수 있다. 그리고, 모든 변수를 소신호 변수들로 정리하면 N개의 우물을 가진 다중 양자 우물 레이저 다이오드에 대해 다음과 같은 소신호 비율 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dp_s}{dt} = \frac{i}{qV_{SCH}} - \frac{p_s}{\tau_s} - \frac{p_s}{\tau_n} \quad (7)$$

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{p_s(V_{SCH}/V_w)}{\tau_s} - \frac{p_1 - p_2}{\tau_c} - \frac{p_1}{\tau_n} - \frac{v_g \cdot g_{10} \cdot S_0}{1 + \epsilon \cdot S_0} p_1 - \frac{v_g \cdot G_{10}}{(1 + \epsilon \cdot S_0)^2} \cdot s \quad (8)$$

$$\frac{p_1 - p_2}{\tau_c} - \frac{p_2 - p_3}{\tau_c} - \frac{p_2}{\tau_n} - \frac{v_g \cdot g_{20} \cdot S_0}{1 + \epsilon \cdot S_0} \quad (9)$$

$$p_2 - \frac{v_g \cdot G_{20}}{(1 + \epsilon \cdot S_0)^2} \cdot s$$

$$\frac{p_{n-2} - p_{n-1}}{\tau_c} - \frac{p_{n-1} - p_n}{\tau_c} - \frac{p_{n-1}}{\tau_n} \quad (10)$$

$$- \frac{v_g \cdot g_{(n-1)0} \cdot S_0}{1 + \epsilon \cdot S_0} \cdot p_{n-1} - \frac{v_g \cdot G_{(n-1)0}}{(1 + \epsilon \cdot S_0)^2} \cdot s$$

$$\frac{p_{n-1} - p_n}{\tau_c} - \frac{p_n}{\tau_n} - \frac{v_g \cdot g_{n0} \cdot S_0}{1 + \epsilon \cdot S_0} \cdot p_n - \frac{v_g \cdot G_{n0}}{(1 + \epsilon \cdot S_0)^2} \quad (11)$$

$$\frac{ds}{dt} = \Gamma v_g \left\{ \frac{S_0}{1 + \epsilon S_0} (g_{10} p_1 + \dots + g_{n0} p_n) + \frac{S_0}{(1 + \epsilon S_0)^2} (G_{10} \dots + G_{n0}) \right\} - \frac{s}{\tau_p} + \frac{\Gamma B}{\tau_n} (p_1 + \dots + p_n) \quad (12)$$

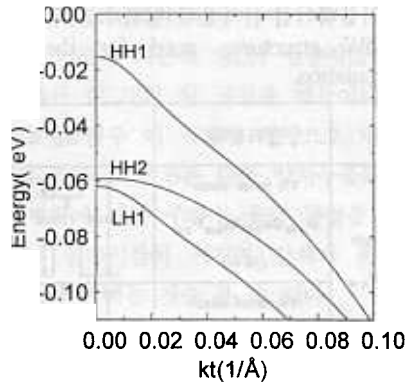
위의 N+2차 선형 연립방정식을 다시 상태변수 형태 (state-variable form)로 정리하여 변조 주파수  $\omega$ 에 대한 광자의 출력 변화를 얻을 수 있다.

3. 광 이득

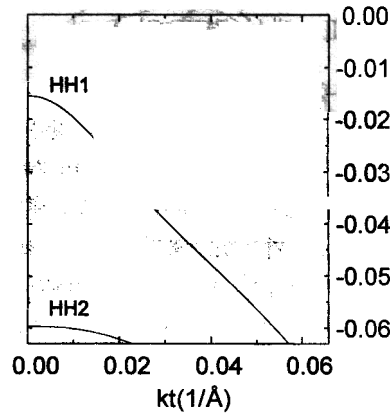
MQW LD의 자세한 동적 해석을 위해서는 정확한 광이득 값이 필요하며, 본 논문에서는 다음과 같은 밀도 행렬을 수치적으로 해석하여 광이득을 구하였다<sup>[13]</sup>.

$$G(\omega) = \frac{\omega \mu c}{n_r V} \sum_{\sigma} \sum_{l,m} \sum_{k_{\parallel}} \frac{|\hat{\epsilon} \cdot M_{lm}^{\sigma}(k_{\parallel})|^2 (f_c - f_{v\sigma})(\hbar/\tau_m)}{\{E_l^{\sigma}(k_{\parallel}) - E_m^{\sigma}(k_{\parallel}) + E_c - \hbar\omega\}^2 - (\hbar/\tau_m)^2} \quad (13)$$

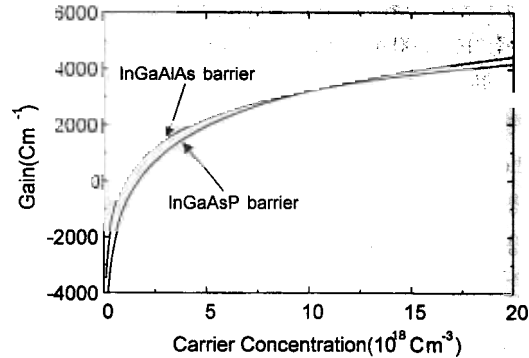
여기서,  $\omega$ 는 광자의 각속도,  $\mu$ 는 투자율,  $n_r$ 은 굴절률,  $c$ 는 광속,  $\epsilon_0$ 는 자유공간에서의 유전율,  $\sigma$ 는 Hamiltonian의 위쪽과 아래쪽 block을 나타내고,  $\eta$ 는 spin state,  $l$ 과  $m$ 은 부밴드의 index,  $\hat{\epsilon}$ 은 빛의 편광을 나타내는 단위 벡터,  $M_{lm}^{\sigma}$ 는 쌍극자 모멘트,  $E_l^{\sigma}(k_{\parallel})$ 와  $E_m^{\sigma}(k_{\parallel})$ 은 각각 전도대의 1번째 부밴드와 가전자대의 m번째 부밴드의 에너지,  $E_c$ 는 밴드갭,  $V$ 는 양자우물의 체적,  $\tau_{in}$ 은 intraband relaxation time을 나타낸다. 쌍극자 모멘트와 의사 Fermi준위는 에너지 밴드 구조로부터 얻어지며 본 연구에서 가전자대의 에너지 밴드구조는  $k \cdot p$ 이론으로부터 가전자대 혼합효과를 고려하여 해석하였다. 그림 2에는 표 1에 나와 있는 QW 구조에 대한 가전자대 밴드 구조와 이로부터 얻어진 광이득 계산 결과를 보여주고 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 2. (a) 70 Å In<sub>0.77</sub>Ga<sub>0.23</sub>As<sub>0.81</sub>P<sub>0.19</sub>/In<sub>0.59</sub>Ga<sub>0.41</sub>As<sub>0.58</sub>P<sub>0.42</sub> 양자우물에서의 E-k관계 (b) 70 Å In<sub>0.77</sub>Ga<sub>0.23</sub>As<sub>0.81</sub>P<sub>0.19</sub>/In<sub>0.38</sub>Ga<sub>0.51</sub>Al<sub>0.11</sub>As 양자우물에서의 E-k관계 (c) 1.55 μm의 파장에서 캐리어 농도 변화에 따른 광이득 변화  
Fig. 2. (a) E-k relation for 70 Å In<sub>0.77</sub>Ga<sub>0.23</sub>As<sub>0.81</sub>P<sub>0.19</sub>/In<sub>0.59</sub>Ga<sub>0.41</sub>As<sub>0.58</sub>P<sub>0.42</sub> QW (b) E-k relation for 70 Å In<sub>0.77</sub>Ga<sub>0.23</sub>As<sub>0.81</sub>P<sub>0.19</sub>/In<sub>0.38</sub>Ga<sub>0.51</sub>Al<sub>0.11</sub>As QW (c) Optical gain as function of carrier concentration at 1.55 μm.

표 1 시뮬레이션에 사용된 양자우물 구조  
Table 1 QW structures used for the simulation.

양자우물	전위장벽	밴드구조
1% compressive strain $\text{In}_{0.77}\text{Ga}_{0.23}\text{As}_{0.81}\text{P}_{0.19}$ (70 Å)	1% tensile strain $\text{In}_{0.59}\text{Ga}_{0.41}\text{As}_{0.58}\text{P}_{0.42}$ (70 Å)	
	1% tensile strain $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.61}\text{Al}_{0.11}\text{As}$ (70 Å)	

III. 해석 결과 및 논의

1. 해석에 사용된 구조 및 파라미터

본 연구에서는 표 1에 나타난 것과 같은 두 가지 구조의 전위장벽을 가진 MQW LD를 비교하였다. 차동이득을 최대한 높이기 위하여 양자우물에는 compressive strain을 가하였고, MQW구조에서의 strain relaxation을 방지하기 위해 전위장벽에는 tensile strain을 가하였다. 표 1에 나와있는 두 구조의 전위장벽은 서로 다른 가전자대 offset을 가지고 있어서 정공의 전송 시간이 각기 다르며 이것이 MQW LD의 동적 특성에 미치는 영향을 비교 연구할 수 있다. 양자우물과 전위 장벽의 길이는 모두 70Å이며, SCH의 길이는 800Å, cavity의 길이는 250μm로 하였다. 4원 화합물의 물질상수는 Vegard의 법칙에 준하여 선형 근사화하여 사용하였고, band offset은 model solid theory<sup>[14]</sup>를 이용하여 구하였다. 비울방정식에 사용되는 시정수들의 값은 [11]에 나와있는 방법을 이용하여 구하였다.

2. MQW LD의 DC 과도응답 특성

전위 장벽의 높이가 선형적으로 증가하면 열적 여기 시간이 지수 함수적으로 증가하므로 이에 따라 우물간 캐리어 전송 시간( $\tau_c$ )도 증가하게 된다. 전위 장벽의 높이가 낮은 경우 정공이 더 빨리 모든 우물들에 끌려 분포할 수 있게 되며, 이는 곧 광출력 응답에 영향을 미치게 된다. 그림 3은 바이어스 전류 10mA를 인가했을 때 광출력의 시간에 대한 변화를 나타내고 있다. 전위 장벽의 높이가 낮은 InGaAlAs 전위장벽의 경우 우물간 캐리어 전송 시간이 작기 때문에 더 빨리 정상상태에 도달하며 turn-on delay도 작은 것을 볼

수 있다.

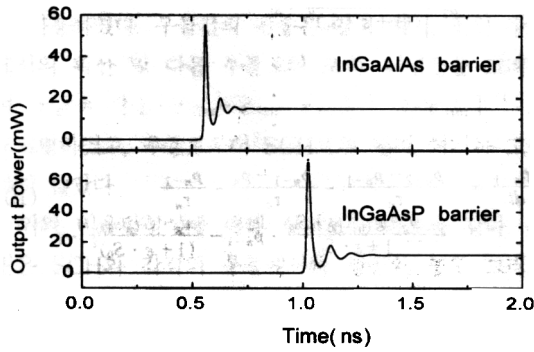
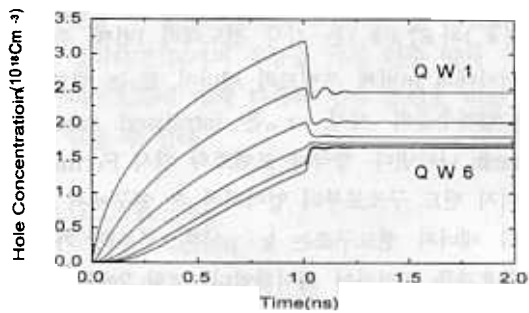


그림 3.  $t=0$ 에서  $I_{Bias}=10\text{mA}$ 를 인가했을 때 광출력의 시간에 대한 응답

Fig. 3. Transient response of optical power for  $I_{Bias}=10\text{mA}$ .

정상상태에 도달한 후에도 유한한 우물간 캐리어 전송 시간의 영향으로 우물마다 캐리어 농도가 다르게 된다. 그림 4는 bias 전류 인가시 각 우물에서 정공 농도의 시간에 대한 변화를 보여주고 있다. 그림에서 높은 농도를 나타내는 선이 P접합에 가까운 우물(QW1)에 해당한다. InGaAlAs 전위장벽의 경우(그림 4(b)), 전류의 주입이 일어나면 모든 우물의 정공 농도가 동시에 증가하며, 정상상태에서도 우물간의 정공 농도가 비교적 균일한 것을 볼 수 있다. 그러나, InGaAsP 전위장벽의 경우(그림 4(a)), 우물간의 캐리어 전송이 일어나는 평균 시간이 길기 때문에 전류의 인가 후 N접합에 가까운 우물(QW6)의 농도는 주입된 전류에 대하여 빨리 반응하지 못하는 경향을 보인다. 하지만 시간이 경과함에 따라 QW1~QW3에서 생성된 광자의 영향으로 QW4~QW6의 정공 농도가 높아지면서 정상상태에 이르는 현상을 볼 수 있다.



(a)

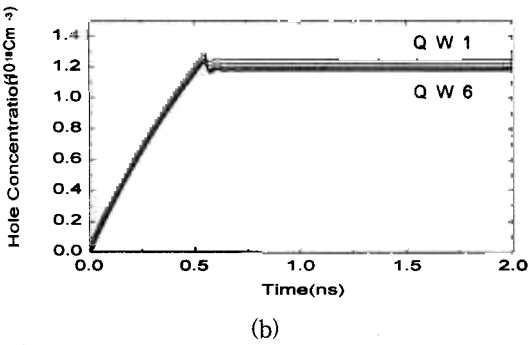


그림 4. (a)  $t=0$ 에서  $I_{Bias}=10mA$ 가 인가되었을 때 우물 내의 정공농도의 시간에 대한 변화(InGaAsP/InGaAsP, 우물수: 6) (b)  $t=0$ 에서  $I_{Bias}=10mA$ 가 인가되었을 때 우물에서 정공 농도의 시간에 대한 변화 (InGaAsP/InGaAlAs, 우물수: 6)  
 Fig. 4. (a) Transient response of hole concentrations for  $I_{Bias}=10mA$ . (6 InGaAsP/InGaAsP wells) (b) Transient response of hole concentrations for  $I_{Bias}=10mA$ . (6 InGaAsP/InGaAlAs wells)

3. MQW LD의 주파수 응답 특성

2장에서 언급한 대로 LD의 동적 특성의 직류 해석과 교류 해석의 방법이 서로 다르다. 본 논문의 모든 주파수 응답 특성 해석 결과는 먼저 직류 해석을 하여 정상상태의 해를 구한 후, 이를 바탕으로 한 소신호 해석으로부터 얻은 것이다.

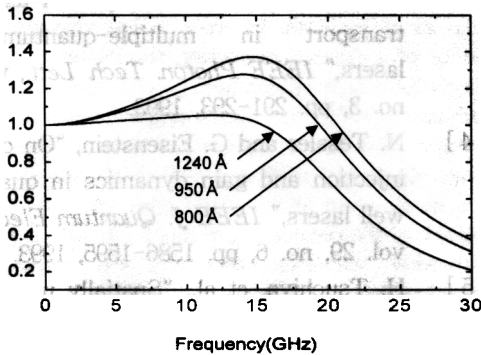


그림 5. SCH 길이의 변화에 따른 주파수 응답 특성 (InGaAsP/InGaAsP 우물수:9  $I_{bias}=18mA$ )  
 Fig. 5. Frequency responses for various SCH length.(9 InGaAsP/InGaAsP wells  $I_{bias}=18mA$ )

양자우물 LD의 경우 SCH 전송의 영향으로 low frequency roll off 현상과 유효 미분 이득(effective differential gain) 감소 현상이 생기게 되며 이것은 변조 대역폭에 심각한 영향을 줄 수 있다고 알려져 있

다<sup>[11]</sup>. 또한, SCH의 길이가 길어지면 SCH 전송시간( $\tau_s$ )이 커지게 되는데, SCH 전송시간은 주파수 응답 특성에서 한 개의 실 극점을 만들어내며 SCH 전송시간이 클 경우 이 극점의 영향으로 변조 대역폭이 작아지게 된다. 그림 5는 다중 양자우물의 경우 SCH 길이의 변화에 따른 주파수 응답 특성을 보인 그림이다. SCH 전송시간이 커지면 감쇄가 커지면서 변조 대역폭이 작아 지는 것을 볼 수 있다.

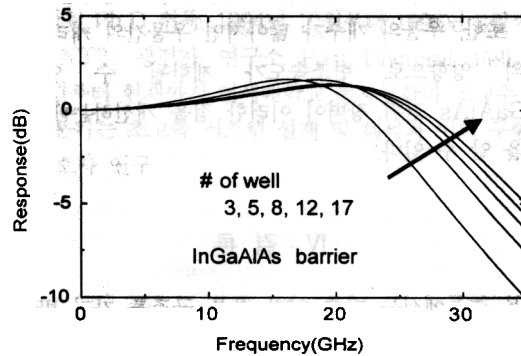
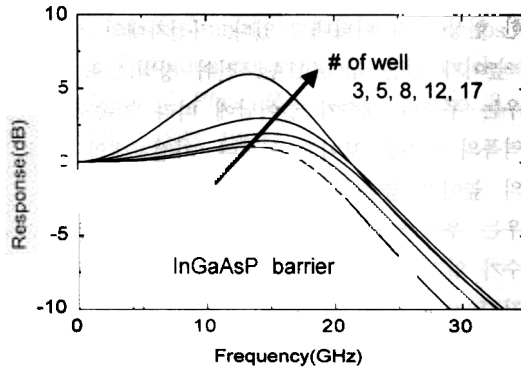


그림 6. 양자 우물 개수의 변화에 따른 변조 대역폭의 변화 (광출력:40mW)  
 (a) InGaAsP 전위 장벽 (b) InGaAlAs 전위 장벽  
 Fig. 6. Modulation responses as function of well numbers (Optical power:40mW).  
 (a) InGaAsP barrier (b) InGaAlAs barrier

양자우물의 개수가 증가하면 미분이득과 광 가둠계수가 증가하기 때문에 변조 대역폭(3dB point)이 넓어진다. 그러나, 이것은 우물간 캐리어 전송 효과를 고려하지 않았을 때의 현상이며 우물간의 불균일한 캐리어 분포의 영향으로 실제로는 일정한 개수 이상의 양

자 우물에 대해서는 미분 이득의 증가 경향이 포화 특성을 보이게 된다. 즉, 일정한 개수 이상의 우물을 가진 구조에 대해서는 우물간 캐리어 전송이 영향을 미쳐서 우물의 개수가 증가해도 변조 대역폭의 증가 경향이 둔화된다. 이때, 우물간 캐리어 전송이 빠른 구조가 더 넓은 대역폭을 갖게 되며 우물수의 증가에 따른 변조 대역폭의 증가 경향도 더 좋은 특성을 나타내게 된다. 그림 6은 광출력이 일정할 때 양자우물 개수의 변화에 따른 변조대역폭의 변화를 그린 그림으로써 이러한 현상을 잘 나타내고 있다. 가전자대의 전위 장벽의 높이가 낮은 InGaAlAs 전위 장벽(그림 6(b))의 경우는 우물의 개수가 늘어남에 따라 지속적인 변조 대역폭의 증가를 보이고 있으나, 가전자대의 전위 장벽의 높이가 높은 InGaAsP 전위장벽(그림 6(a))의 경우는 우물간 캐리어 전송시간이 크기 때문에 우물 개수가 일정 개수 이상 증가하면 변조 대역폭이 증가하지 않으며 공진 주파수는 오히려 떨어지는 현상을 보이고 있다. 이는 P접합 영역에서 멀리 떨어진 우물일수록 그 정공 농도가 주입된 정공에 대해 빨리 반응할 수 없기 때문에 일어나는 현상이라고 해석할 수 있다. 또한, 우물의 개수가 많아지면 우물간의 캐리어 전송의 영향으로 변조속도가 제한될 수 있으며, InGaAlAs 전위 장벽이 이러한 점을 개선하는데 유리함을 알 수 있다.

#### IV 결 론

본 논문에서는 다중 양자 우물 구조를 가진 반도체 레이저 다이오드의 직류 응답 및 직접 변조 특성을 해석하였다. 해석 방법으로는 정공의 열적 여기와 확산 및 터널링에 의한 우물간 캐리어 전송이 고려된 비율 방정식을 사용하였다. 이 방법은 Poisson 방정식이나 통계적인 해석을 도입한 기존의 방법들 보다 간단하면서도, 우물간의 캐리어 전송에 대한 직관적인 접근이 가능하다는 장점이 있다. MQW LD에서는 우물의 개수가 증가함에 따라 우물간 캐리어 전송 시간의 영향이 커진다. 우물간 캐리어 전송시간이 크면 turn-on delay가 늘어나고 relaxation oscillation이 커지며 정상상태에서 우물간 캐리어 농도도 불균일해진다. 이는 곧 주파수 응답에도 영향을 미치게 되어 변조대역폭의 감소를 가져온다. 우물간 캐리어 전송시간을 줄이려면 전위장벽의 길이를 줄이거나 전위장벽의 높이

를 낮추어야 한다. 이를 위해서는 InGaAsP계열의 전위장벽보다 InGaAlAs계열의 전위장벽을 사용하는 것이 유리하다. 본 논문에서 사용된 방법은 사용된 가정으로 말미암아 절대적인 정확성을 기대할 수는 없으나 정성적인 경향 파악 및 상대적인 비교에는 유용하게 사용될 수 있다. 고속 직접 변조를 위한 레이저 다이오드의 최적화된 구조 설계시, 본 논문에서 제시된 다중 양자 우물 레이저 다이오드에 대한 해석 방법은 우물 개수와 우물간 캐리어 전송문제에 관한 최적화 기법으로 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] S. Weisser, et al., "Damping-limited modulation bandwidth up to 40GHz in undoped short-cavity  $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ -GaAs multiple-quantum-well lasers," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 8, no. 8, pp. 608-610, 1996.
- [2] Yasuhiro Matsui, et al., "30-GHz Bandwidth 1.55  $\mu\text{m}$  strain-compensated InGaAlAs-InGaAsP MQW laser," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 9, no. 1, pp. 25-27, 1997.
- [3] N. Tessler and G. Eisenstein, "Transient carrier dynamics and photon-assisted transport in multiple-quantum-well lasers," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 5, no. 3, pp. 291-293, 1993.
- [4] N. Tessler and G. Eisenstein, "On carrier injection and gain dynamics in quantum well lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 6, pp. 1586-1595, 1993.
- [5] H. Tsuchiya, et al., "Spatially ununiform gain in MQW lasers caused by nonequilibrium carrier transport," *Physica*, vol. B227, pp. 411-414, 1996.
- [6] H. Tsuchiya and T. Miyoshi, "Bipolar quantum-transport modeling of carrier injection into a SCH-quantum-well laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 32, no. 5, pp. 865-872, 1996.
- [7] T. Fukusima, et al., "High-speed dynamics in InP based multiple quantum well lasers," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 32,

- no. 1a, pp. 70-83, 1993.
- [8] H. Schneider and K. v. Klitzing, "Thermionic emission and Gaussian transport of holes in a GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As multiple-quantum-well structure," *Phys. Rev.*, vol. B38, no. 9, pp. 6160-6165, 1988.
- [9] Herbert Kroemer and Hiroshi Okamoto, "Some design considerations for multi-quantum-well lasers," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 23, no. 8, pp. 970-974, 1984.
- [10] R. Nagarajan, et al., "Effects of carrier transport on high-speed quantum well lasers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 59, no. 15, pp. 1835-1837, 1991.
- [11] R. Nagarajan, et al., "High speed quantum-well lasers and carrier transport effects," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 28, no. 10, pp. 1990-2007, 1992.
- [12] Shun Lien Chuang, *Physics of optoelectronic device*. John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [13] D. Ahn, et al., "Optical gain in a strained-layer quantum-well laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 24, no. 12, pp. 2400-2406, 1988.
- [14] Chris G. Van de Walle, "Band lineups and deformation potentials in the model-solid theory," *Phys. Rev.*, vol. B39, no. 3, pp. 1871-1883, 1989.

---

 저 자 소 개
 

---

## 具 滋 容(正會員)

1970년 10월 16일생. 1996년 2월 중앙대학교 전기공학과 졸업. 1998년 8월 연세대학교 대학원 전자공학과 석사 졸업. 현재 LG전자 근무

## 崔 佑 榮(正會員)

1988년 5월 Massachusetts Institute of Technology 의 EECS Department B.S. 및 M.S. 취득. 1994년 5월 동대학원 Ph.D 취득. 1994년 10월부터 1995년 8월까지 일본 NTT 광전자 연구소 Post-Doctoral Fellow. 1995년부터 현재까지 연세대학교 전자공학과 조교수. 주 관심 분야는 초고속 시스템 설계 및 해석과 이의 구현을 위한 소자 연구