

1.55 μm SCH MQW LD에서 BARRIER와 SCH 구조의 최적화
Optimization of barrier and SCH structures in 1.55 μm SCH MQW LD

이한상*, 최우영
(연세대학교 전자공학과)

We analyzed the effect of barrier and SCH structures of 1.55 μm SCH MQW LD on the injected carrier collection efficiency and carrier transport. These are important parameters for the high speed operation of LD. Improvement in injected carrier collection efficiency and carrier transport was achieved by using InGaAlAs materials for barrier in SCH MQW LD.

MQW Laser Diode(LD)는 초고속 광통신을 위한 핵심적인 소자이고 이로 인해 LD에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다. 초고속 동작을 위해 LD는 양자 우물 개수, 양자 우물과 전위 장벽 구조등 여러 면에서 최적화 되어야 한다. 본 연구에서는 전위 장벽 구조와 SCH 구조의 최적화를 주입된 carrier의 collection 효율과 carrier transport의 관점에서 시도하였다.

주어진 MQW LD에 대해서 carrier transport 효과가 고려된 rate equation으로부터 주파수 응답 특성을 구할 수 있고 이로부터 MQW LD의 3dB 대역폭을 얻을 수 있다. 각 우물 안에 있는 carrier 밀도가 균일하다고 가정을 하면, MQW LD의 rate equation은 아래와 같이 단일 QW LD의 rate equation과 비슷한 방법으로 모델링될 수 있다. 다른 점은 식 (1)에서 $\tau_{e, sch}$ 대신 주입된 carrier가 각 우물에서 SCH 영역까지 빠져나가는 데 걸리는 시간의 평균값인 $\tau_{e, ave}$ 를 썼고, 식 (2)에서 τ_s 대신에 carrier가 SCH 영역에서 각 우물에 주입되는 데 걸리는 시간의 평균값인 $\tau_{s, ave}$ 를 썼으며, 식 (3)에서 I 대신에 각 우물의 광가득 계수들의 합인 Γ_{total} 를 쓴 점이다.

$$\frac{dN_s}{dt} = \frac{I}{q \cdot V_s} - \frac{N_s}{\tau_s} + \frac{N_w \cdot (V_w/V_s)}{\tau_{e, ave}} \quad (1)$$

$$\frac{dN_w}{dt} = \frac{N_s \cdot (V_s/V_w)}{\tau_{s, ave}} - \frac{N_w}{\tau_n} - \frac{N_w}{\tau_{e, ave}} - \frac{v_g \cdot G(N_w) \cdot S}{1 + \epsilon \cdot S} \quad (2)$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{v_g \cdot G(N_w) \cdot S}{1 + \epsilon \cdot S} \cdot \Gamma_{total} - \frac{S}{\tau_p} \quad (3)$$

$$\tau_{s, ave} = \tau_s + \tau_c + \frac{(n-1)}{2} \cdot \tau_r \quad (4)$$

$$\frac{1}{\tau_r} = \frac{1}{\tau_{e, s}} + \frac{1}{\tau_l} \quad (5)$$

$$\tau_{e, ave} = \tau_{e, sch} + \frac{(n-1)}{2} \cdot \tau_r \quad (6)$$

여기서 τ_s 는 SCH carrier transport time, τ_n 는 bimolecular recombination time, τ_s 는 photon의 life time, τ_c 는 carrier가 양자 우물에 포획되는 시간, τ_r 은 carrier가 한 우물에

서 옆 우물까지 transport되는 시간, $\tau_{e, s}$ 는 양자 우물에 주입된 carrier가 전위 장벽 쪽으로 빠져나가는 데 걸리는 시간, τ_l 는 tunnelling time, $\tau_{e, sch}$ 는 양 끝 양자 우물에서 SCH 영역으로 carrier가 빠져나가는 데 걸리는 시간, n 은 양자 우물수, ϵ 은 gain compression factor이다. 식 (1),(2),(3)을 small-signal 식으로 바꾼 뒤 세 식을 연립하여 풀면 주파수 응답 특성을 구할 수 있다.

본 해석에 사용된 MQW LD는 기본적으로 그림1과 같은 구조를 갖는다. 사용된 양자 우물 물질로는 1% compressive strain이 가해진 InGaAsP를 사용하였다. 전위 장벽 물질로는 strain 보상된 InGaAsP, InGaAlAs를 사용하였고 주입된 carrier의 collection 효율과 transport면에서 최적의 구조를 얻기 위한 시도를 하였다. 우선 InGaAsP를 전위 장벽으로 하는 MQW LD(A형)는 In_{0.77}Ga_{0.23}As_{0.81}P_{0.19}(70 Å thick)/In_{0.59}Ga_{0.41}As_{0.58}P_{0.42}(1% tensile strain, 70 Å thick)로 선택하였고, InGaAlAs를 전위 장벽으로 하는 MQW LD(B형)는 In_{0.75}Ga_{0.25}As_{0.85}P_{0.15}(58 Å thick)/In_{0.38}Ga_{0.32}Al_{0.1}As(1% tensile strain, 58 Å thick)로 선택하였다. 양자 우물 구조는 1.55 μm 의 파장을 가지며 양자 우물 두께가 너무 작지 않도록 선택되었다. 전위 장벽 구조는 전자의 escape로 인한 미분 이득 감소 현상을 막기 위해 ΔE_c 가 0.13eV의 값을 갖도록 결정하였다. SCH 영역은 InP에 격자정합되고 전위 장벽의 E_g 보다 큰 E_g 을 갖는 물질(A형에는 InGaAsP, B형에는 InGaAlAs)을 사용하였다.

그림 2 는 MQW LD에서 양자 우물수(N_w)가 7개일 때, 위에서 제시된 rate equation으로부터 $\tau_{s, ave}$ 의 변화에 따른 대역폭의 변화물 보인 것으로 $\tau_{s, ave}$ 가 증가할수록 3dB 대역폭이 low frequency rolloff로 인하여 줄어드는 것을 알 수 있다. 그림 3 은 $N_w = 7$ 인 경우 SCH의 E_g 의 변화에 따른 A형, B형의 주입 carrier의 collection 효율($\frac{1}{1 + \tau_{s, ave}/\tau_{e, ave}}$)을 구한 것이다. $\tau_{s, ave}$ 가 작고 $\tau_{e, ave}$ 가 크게 되면, 주입된 carrier의 collection 효율이 커져서 유효 미분 이득이 증가하게 된다. B형이 A형보다 carrier collection efficiency면에서 더 좋을 수 있다. 이것은 B형 전위 장벽의 E_g 가 더 작아서 같은 E_g 의 SCH 물질을 쓰더라도 전위 장벽과 SCH의 ΔE_g 가 B형이 더 크기 때문이다. 그림 4 는 양자 우물수에 따른 A, B형 각각의 $\tau_{s, ave}$ 의 변화물 나타낸 것으로 ΔE_c 는 비슷하지만 ΔE_c 가 더 작은 전위 장벽 층을 사용한 B형이 inter well transport time(τ_r)이 훨씬 작기 때문에 양

자 우물수가 증가함에 따라 우수함을 볼 수 있다. 이 결과와 그림 2의 결과를 종합하면 carrier transport만을 고려한 3dB 대역폭은 B형이 훨씬 더 크고 이 대역폭 차이는 양자 우물수가 많을수록 더 커짐을 알 수 있다.

효율 관점에서 MQW LD layer의 최적화 방법을 알 수 있었다. 위의 결과에 의하면 1.55 μ m SCH MQW LD에서 전위 장벽 물질로 InGaAlAs를 쓰는 것이 carrier transport면에서 유리하고, 전위 장벽과 E_g가 다른 SCH 사용할 때 carrier collection 효율면에서도 더 유리한 것을 알 수 있다.

위의 연구에서 carrier transport와 주입 carrier collection

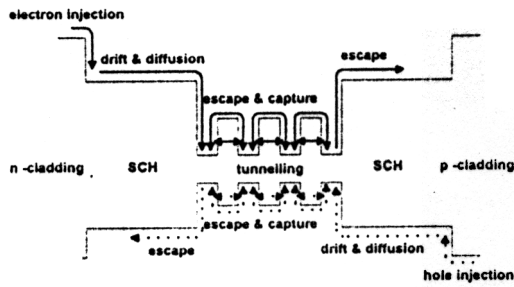


그림 1. SCH MQW LD 의 구조와 carrier transport 과정

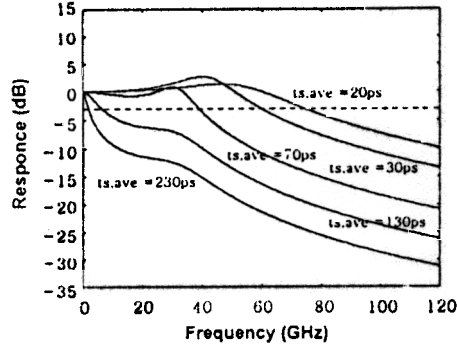


그림 2. I_{th} = 15mA, I_{bias} = 30mA, 양자 우물수 = 7 일때 carrier transport time 에 따른 주파수 응답 특성

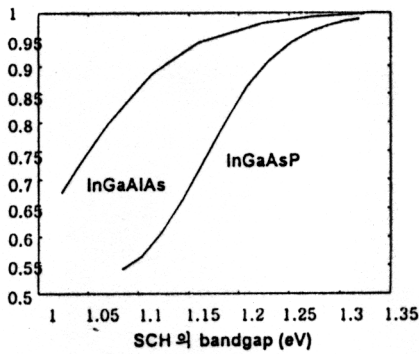


그림 3. 전위 장벽 물질로 InGaAlAs, InGaAsP 를 사용하였을 경우 SCH 의 bandgap 변화에 따른 두 LD 의 carrier collection efficiency 비교

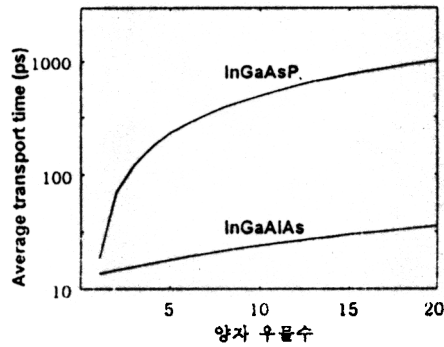


그림 4. 전위 장벽 물질로 InGaAlAs, InGaAsP 를 사용하였을 때 SCH MQW LD 에서 양자 우물수에 따른 두 LD 의 average transport time 비교