

# InGaAsP/InP RWG MQW LD의 설계 및 제작에 관한 연구

하홍춘<sup>1)</sup>, 홍창희<sup>2)</sup>

## A Study on the Design and the Fabrication of InGaAsP/InP RWG MQW-LD

Hong Tchoon Ha, Tchang Hee Hong

### Abstract

Recently interest in the fabrication of LD operated by low current is gradually increasing as fabrication techniques of MQW-LD are progressed. In this viewpoint, theoretical estimation for decreasing the amount of threshold current will be helpful to design and make LD in case that active layer of conventional bulk type RWG-LD structure is replaced with MQW structure.

Therefore, the optimum design condition of RWG MQW-LD was obtained from theoretical analysis in order to operate in the weakly index-guided LD, low threshold current and single lateral mode. From the design condition, MQW-DH wafer has been grown by using hand made vertical LPE system, and then ridge pattern has been formed on the wafer through a photolithographic process and lastly RWG MQW-LD has been obtained.

The main contents of this thesis are as follows;

- [1] The lateral effective index step has been obtained in RWG MQW-LD structure. Waveguide mechanism including this index step has been investigated by solving the carrier diffusion equation and lateral wave equation. The maximum width of ridge has been

1) 한국해양대학교 전자통신공학과 석사과정

2) 한국해양대학교 전자통신공학과 교수

obtained to operate in single lateral mode. From these theoretical results, the optimum design condition of RWG MQW-LD have been suggested.

The theoretical conclusions;

- The lateral effective index step,  $\Delta n_L$ , to operate in weakly index-guided LD : 0.015
- Maximum width of ridge to operate in single lateral mode :  $4 \sim 5 \mu\text{m}$  (in case of  $\Delta n_L=0.015$ )
- Width of ridge to operate in low threshold current  
 $4 \mu\text{m}$  (in case of  $\Delta n_L=15 \times 10^{-3}$ )  
 $3 \mu\text{m}$  (in case of  $\Delta n_L=20 \times 10^{-3}$ )

[2] Carried out the growth of MQW-DH wafer with theoretical analysis. Fabricated RWG MQW-LD throughout photolithographic process. And measured I-L characteristic curves to obtain threshold current ( $I_{th}$ ), internal quantum efficiency( $\eta_i$ ), and internal loss( $\alpha_{int}$ ).

The measured results of fabricated RWG MQW-LD;

- Threshold current( $I_{th}$ ) : 41mA ( $L=400 \mu\text{m}$ )
- Internal quantum efficiency( $\eta_i$ ) : 77%
- Internal loss( $\alpha_{int}$ ) :  $18 \text{cm}^{-1}$

## 제 1 장 서론

반도체레이저는 InP, GaAs나 InGaAsP 등 직접천이형 화합물반도체를 사용하고, 전자와 호울(hole)의 재결합에 의해 광자를 방출하는 레이저동작을 하기 때문에 붙여진 이름이다. 또한 pumping 메커니즘에 있어서 전자 및 호울을 주입시키는 방법을 채택하고 있기 때문에 주입형 레이저(injection laser)라 하며, 그리고 pn접합 다이오드로 되어 있기 때문에 LD(Laser Diode or Diode Laser, 이하 LD라 칭함)라 불려지기도 한다.

최근들어 MQW-LD의 제작기술이 향상됨에 따라 고출력 LD의 제작 못지않게 저전류로 동작하는 LD의 제작에 대한 관심도가 갈수록 높아지고 있다. 이러한 시점에서 MQW(Multi-Quantum Well) 구조의 활성층으로 RWG-LD를 만들 경우, 벌크(bulk)형 보다 어느 정도 발진 임계전류를 낮출 수가 있는지 이론적으로 추정해 보는 것은 상당히 의미 있는 일이다. 따라서 이론해석을 통하여 측방향에서의 단일모드 동작, 그리고 낮은 발진 임계전류를 가지기 위한 RWG MQW-LD의 도파로 규격을 계산하여 보았다. 이러한 이론 결과를 기초 설계조건으로 하여 본 실험실에서 구비하고 있는 수직형 LPE 장치를 사용하여 제작

하였으며, 제작된 LD의 특성을 조사하여 보았다.

본 논문은 효율적으로 동작하는 RWG MQW LD를 제작하기 위해 도파로층의 최적 설계조건을 과도방정식으로 구해내어 수직형 LPE 장치로 LD를 제작하였다.

## 제 2 장 RWG-MQW-LD의 최적화 설계

본 연구에서 설계 및 제작하고자 하는 RWG LD는 weakly index guided LD 형태로서 BH 구조와 같은 strongly index guided LD처럼 활성층 자체가 불연속성을 가지는 것과는 달리 굴절율차는 없지만 도파모드에 의해 ridge 영역과 ridge 외부영역에 유효굴절율차를 만들 수 있다. RWG LD에서의 유효굴절율차는 활성층 및 클래드층의 두께에 따라 민감하게 변화하며, 이 크기에 따라 RWG LD는 gain guided 혹은 강하지는 않지만 index guided로 동작하게 된다. 이러한 LD의 구조로 구조로 이론해석을 직접하는 것은 매우 복잡한 일이다. 따라서 이론해석을 간단히 하기 위해 그림 2-1처럼 모델링을 시켰다.

여기서  $d$ 와  $n$ 는 각 층의 두께와 굴절율을 나타낸다. 한편, MQW층으로 이루어진 활성층의 두께는 MQW층의 전체두께로 하였으며, 이때 활성층의 굴절율은 다음 식처럼 정의되는 우물층(well) 및 장벽층(barrier)의 굴절율과 두께의 조합형태로 하였다.

$$n_{\text{MQW}}^2 = \frac{d_{\text{barrier}} n_{\text{barrier}}^2 + d_{\text{well}} n_{\text{well}}^2}{d_{\text{barrier}} + d_{\text{well}}} \quad (2-1)$$

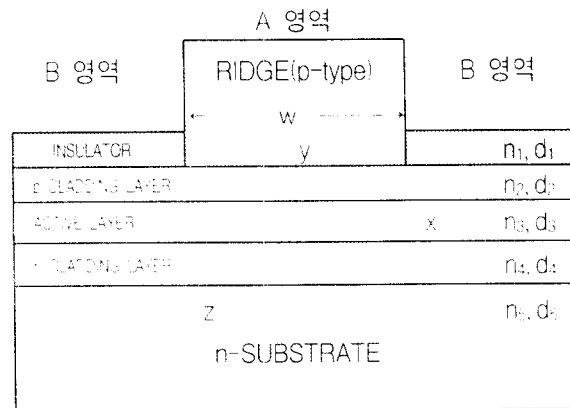


그림 2-1 Ridge waveguide LD의 이론해석을 위한 모델링

여기서  $d_{\text{barrier}}$ ,  $n_{\text{barrier}}$ 는 장벽층의 두께와 굴절율, 그리고  $d_{\text{well}}$ ,  $n_{\text{well}}$ 은 우물층의 두께와 굴절율을 나타낸다. 이 그림에 사용된 모델링은 모든 weakly index-guided LD에 적용될 수 있다. 측방향 유효굴절율차를 구하기 위해서는 2차원 도파문제의 해를 구해야 하는데, 이는 파동방정식으로부터 구할 수 있다. 횡방향 및 측방향의 파동방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{d^2 E_x(y)}{dy^2} + \left\{ k_0^2 n_i^2 - \beta^2(x) \right\} E_x(y) = 0 \quad (2-2)$$

$$\frac{d^2 E_y(x)}{dx^2} + \left[ k_0^2 \{ n_{eq}(x) + \Delta n_{eq}(x) \}^2 - \beta^2(z) \right] E_y(x) = 0 \quad (2-3)$$

식 (2-2)와 (2-3)은 각각 횡방향(transverse) 및 측방향(lateral) 파동방정식으로써, 식 (2-2)에서  $n_i$ 는 각 층의 굴절율을 나타낸다. 그리고  $\beta(x)$ 는 횡방향에서 도파모드의 전파상수로써 다음과 같이 정의된다.

$$\beta(x) = k_0 n_{eq}(x) \quad (2-4)$$

여기서  $k_0 = 2\pi/\lambda$ 로써, 진공중의 파수를 나타낸다. 그리고  $n_{eq}(x)$ 는 횡방향의 도파모드가 느끼는 등가굴절율로서 그림 2-1의 A영역에서는  $n_{eq} + \Delta n_L$ , B영역에서는  $\Delta n_{eq}$ 로  $\Delta n_L$ 은 횡방향 도파로 문제를 풀면 얻어지는 측방향 유효굴절율차이다. 그리고  $\Delta n_{eq}(x)$ 는 주입된 캐리어의 개수  $N$ 에 의해  $x$ 방향으로 발생하는 굴절율 변화를 나타내는 것으로 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta n_{eq}(x) = \frac{\Gamma_T}{2n_{eq}(x)} \left[ j \frac{n_2}{k_0} \frac{1 - \Gamma_T}{\Gamma_T} \alpha_c - j \frac{n_3}{k_0} \left\{ (aN - b) - \alpha_{fc} N - j a a N \right\} \right] \quad (2-5)$$

식 (2-5)에서 우변의 첫 번째 항은 p형 클래드층의 흡수에 의한 활성층의 굴절율 변화를 나타내는 것으로  $n_2$  및  $\alpha_c$ 는 각각 p형 클래드층의 굴절율 및 흡수계수이며,  $\Gamma_T$ 는 횡방향 광가둠계수로 다음과 같이 정의된다.

$$\Gamma_T = \int_0^{d_3/2} |E_x(y)|^2 dx / \int_0^\infty |E_x(y)|^2 dx \quad (2-6)$$

여기서  $d_3$ 은 활성층의 두께를 나타낸다. 식 (2-5)의 두번째 항은 주입캐리어 밀도 변화에 따른 활성층의 굴절율 변화로서  $a$ 는 선폭퍼짐계수(linewidth enhancement factor or linewidth broadening factor)라 하며, 주입캐리어에 의한 이득변화에 따른 굴절율의 변화로  $-2k_0 \times (\partial n /$

$\beta = \alpha + j\gamma$ 로  $\beta$ 와  $\alpha$ 는 실수이며,  $\gamma$ 는  $\beta$ 의 허수부이다. 여기서  $\alpha$ 는  $\beta$ 의 실수부이고,  $\gamma$ 는  $\beta$ 의 허수부이다.  $\beta$ 는  $\alpha$ 와  $\gamma$ 를 이용하여 다음과 같이 정의된다.

$$\beta(z) = k_0 n + j \frac{\alpha}{2} \quad (2.7)$$

여기서  $n$ 과  $\alpha$ 는 두께가  $d$ 이고 폭이  $w$ 인 직각 도파로에 의해 주어지는 등가굴절율과 흡수계수이다. 일반적으로 모드해석은 임계전류치 이상에서 다루게 되며, 이때 레이저가 발진할 때는 영역에서 이득이 흡수보다 훨씬 큰 값을 가지므로 흡수계수  $\alpha$ 는 무시할 수가 있다.

## 2.1 횡모드해석

식 (2.2)는 각각의 slab도파로는 RWG 소자 제작에 사용되는 클래드층이 하나인지 두개 인지에 따라 4개 혹은 5개의 층으로 구성되는데, 본 논문에서는 그림 2.1처럼 5개의 도파로를 사용하여 횡모드 해석을 하였다. 단, 이론해석의 간편화를 도모하기 위하여 A 및 B영역에서 광이  $d_1$ 층까지 거의 같힌다고 가정을 하였다.

식 (2.2)의 횡방향 파동방정식을  $n_1$ 와  $d_1$ 에 대해서 풀면 전파상수  $\beta$ 값을 구할 수 있다. 그림 2.1과 같은 구조를 가지는 레이저에서  $\beta$ 는  $|x|=w/2$ 를 경계로 하여  $n_1$ 이 달라지기 때문에 두개의 영역으로 분리된다. 따라서 측방향 유효굴절율차는 다음과 같이 구해진다.

$$\Delta n_{eff} = \frac{\beta_m - \beta_{out}}{k_0} \quad (2.8)$$

여기서  $\beta_m$ 과  $\beta_{out}$ 는 그림 2.1에서 각각 A영역과 B영역의 전파상수를 나타낸다. 따라서 A영역과 B영역에 대한 전파상수를 구하면 측방향 유효굴절율차를 이 식에 의해서 구할 수 있다. 이렇게 구해진 결과를 그림 2.2에 나타내었다. 이 그림에서 ridge층의 굴절율  $n_1=3.22$ , 두께  $d_1=2\mu m$ , p형 및 n형 cladd층의 굴절율  $n_2=3.33$ , 그리고 MQW층은 식 (2.1)의 관계식에 의해서  $n_3=3.43$ 이며, n형 기판층의 굴절율  $n_4=3.22$ , 두께  $d_5=100\mu m$ 로 하여 계산을 하였다. 그리고  $n_1$ 은  $|x|=w/2$ 를 경계로 하여 바뀌게 되는데, 이때 절연층 SiNx의 굴절율  $n_1=1.90$ 로 하였다.

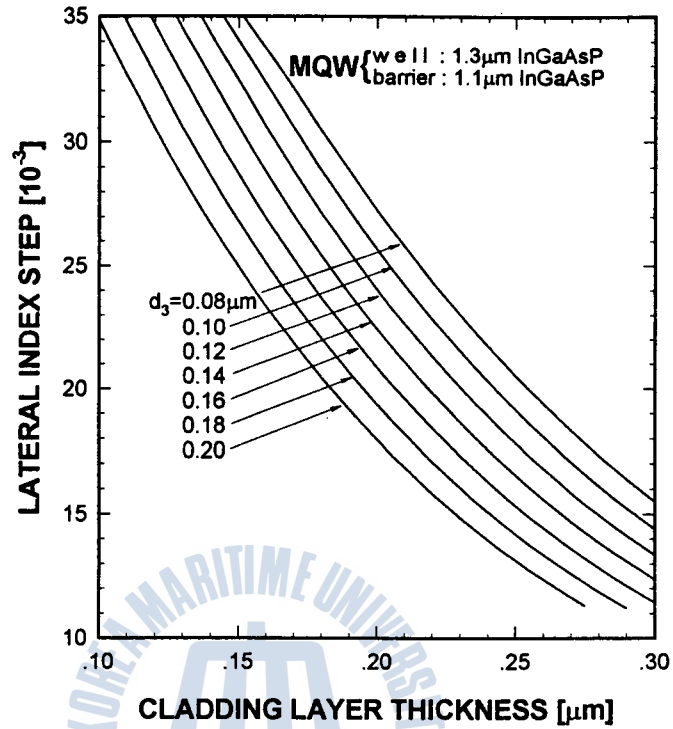


그림 2-2 활성층 두께와 클래드층 두께에 따른 측방향 유효굴절율차

$N = \log_2 N$  (2kba)로 정의되며, 일광 (antiguinding) 파라메타라고도 한다. 이 식을 이용하여 (2-1) 식과 같은 축방향(longitudinal) 전파상수를 나타내는 것으로 다음과 같이 정의된다.

$$\beta(z) = k_0 n + j \frac{\alpha}{2} \quad (2-7)$$

여기서  $n$ 와  $\alpha$ 는 두께가  $d$ 이고 폭이  $w$ 인 직각 도파로에 의해 주어지는 등가굴절율과 흡수계수이다. 일반적으로 모드해석은 임계전류치 이상에서 다루게 되며, 이때 레이저가 발진할 허용 영역에서 이득이 흡수보다 훨씬 큰 값을 가지므로 흡수계수  $\alpha$ 는 무시할 수가 있다.

## 2-1 횡모드해석

식 (2-2)는 각각의 slab도파로는 RWG 소자 제작에 사용되는 클래드층이 하나인지 두개인지에 따라 4개 혹은 5개의 층으로 구성되는데, 본 논문에서는 그림 2-1처럼 5개의 도파로를 사용하여 횡모드 해석을 하였다. 단, 이론해석의 간편화를 도모하기 위하여 A 및 B영역에서 광이  $d_1$ 층까지 거의 갇힌다고 가정을 하였다.

식 (2-2)의 횡방향 파동방정식을  $n$ 와  $d$ 에 대해서 풀면 전파상수  $\beta$ 값을 구할 수 있다. 그림 2-1과 같은 구조를 가지는 레이저에서  $\beta$ 는  $|x|=w/2$ 를 경계로 하여  $n_1$ 이 달라지기 때문에 두개의 영역으로 분리된다. 따라서 축방향 유효굴절율차는 다음과 같이 구해진다.

$$\Delta n_{eff} = \frac{\beta_{in} - \beta_{out}}{k_0} \quad (2-8)$$

여기서  $\beta_{in}$ 과  $\beta_{out}$ 는 그림 2-1에서 각각 A영역과 B영역의 전파상수를 나타낸다. 따라서 A영역과 B영역에 대한 전파상수를 구하면 축방향 유효굴절율차를 이 식에 의해서 구할 수 있다. 이렇게 구해진 결과를 그림 2-2에 나타내었다. 이 그림에서 ridge층의 굴절율  $n_1=3.22$ , 두께  $d_1=2\mu m$ , p형 및 n형 cladd층의 굴절율  $n_2=3.33$ , 그리고 MQW층은 식 (2-1)의 관계식에 의해서  $n_3=3.43$ 이며, n형 기판층의 굴절율  $n_5=3.22$ , 두께  $d_5=100\mu m$ 로 하여 계산을 하였다. 그리고  $n_1$ 은  $|x|=w/2$ 를 경계로 하여 바뀌게 되는데, 이때 질연층 SiNx의 굴절율  $n_1=1.90$ 로 하였다.

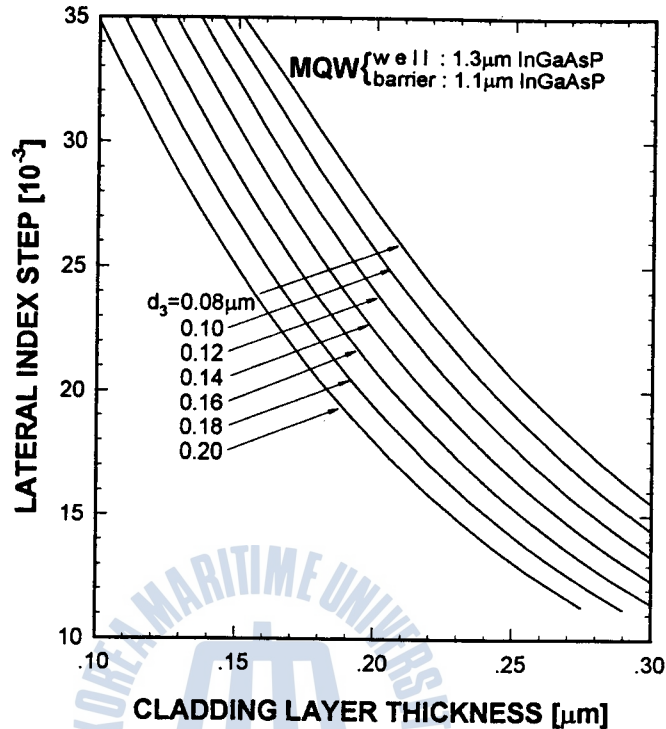


그림 2-2 활성층 두께와 클래드층 두께에 따른 측방향 유효굴절율차

이러한 측방향 유효굴절율차 크기에 따라 LD는 gain-guided 혹은 index-guided로 동작하게 되는데 일반적으로 활성층이 bulk형인 경우에 0.005 정도일 때, index-guided LD로 동작한다고 발표되어 있다. 한편, RWG-LD의 도파메카니즘을 결정짓는 요소는 도파모드의 회절, 주입 캐리어에 의한 모드의 defocusing, 그리고 굴절율차에 따른 모드의 focusing 작용이다. 식 (2-5)에서 이득계수  $a$ 값이 defocusing 작용에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. Bulk형과 MQW형의 이득계수  $a$ 값에 차이가 있으므로, RWG MQW-LD가 index-guided LD로 동작하기 위한 측방향 유효굴절율차의 값은 bulk형과 다를 것으로 생각된다. 따라서 측방향 유효굴절율차  $\Delta n_L$ 값에 따른 파동방정식을 풀어 RWG MQW-LD의 동작특성을 이론적으로 해석하여 보았다.

## 2-2 측모드해석

먼저 식 (2-3)을 간단하게 표현하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial^2 E(x)}{\partial x^2} - \gamma_c^2 E(x) = 0 \quad (2-9)$$



$$\text{단, } \gamma_i^2 = (\alpha_i + j\beta_i)^2 = -k_o^2(n_r + jn_i) = \{k_o n_i(-n_r) + (-jn_i)\}^2 \quad (2-10)$$

$$n_r = \left( n_{eq}^2(x) - \frac{n_a}{k_o} \Gamma_T a a N \right) - n_i^2 \quad (2-11)$$

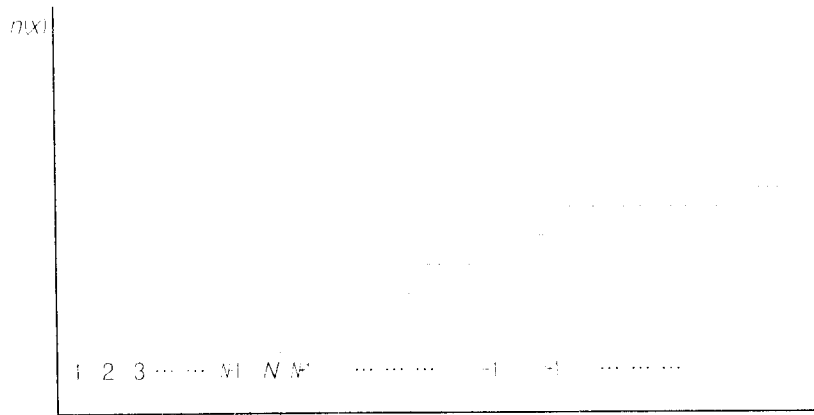
$$\bar{n}_i = -\frac{\Gamma_T}{k_o} \left[ n_a \left\{ (aN - b) - \alpha_{fc} N \right\} - \frac{1 - \Gamma_T}{\Gamma_T} n_i \alpha_c \right] \quad (2-12)$$

식 (2-9)에서  $\gamma_i$ 는 복소전파상수로서,  $\alpha_i$ 는 감쇄정수,  $\beta_i$ 는 위상정수이다. 그리고 식 (2-11)과 (2-12)은 각각 활성층에서 주입캐리어에 의한 굴절율의 변화로서 실수부의 변화 및 허수부의 변화를 나타낸다.

식 (2-9)을 해석하기 위해서 먼저 굴절율 분포를 알아야 하는데, 캐리어 확산방정식으로 부터 알 수 있다. 식 (2-9)~(2-12)로부터 알 수 있듯이 이 식을 해석적으로 풀기란 매우 힘든 일이다. 그 이유는 복소전파상수  $\gamma_i$ 값은 캐리어 분포에 따라 비선형적으로 변화하기 때문이다. 따라서 굴절율분포 형태를 그림 2-3처럼 미소구간으로 나누어, 이 미소구간 내에서 굴절율 분포가 일정하다고 가정하면 식 (2-9)을 해석적으로 풀 수 있다. 그림 2-3처럼 굴절율 분포가 주어지면 식 (2-9)과 (2-10)은 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2 E_i}{\partial x^2} - \gamma_i^2 E_i = 0 \quad (2-13)$$

$$\gamma_i = \alpha_i + j\beta_i \quad (2-14)$$



Δx      w/2  
 그림 2-3 굴절율 분포의 미소분할

여기서  $i$ 는 그림 2-3에서 나타낸 바와 같이 미소구간의 번호를 나타낸다. 식 (2-13)와 (2-14)에서 각각의 미소구간에 대해서 복소전파상수  $\gamma_i$ 가 임의의 상수값을 가지므로 이 식은 쉽게 풀어진다. 이 식의 해는 다음과 같은 파동함수로 주어진다.

$$E_i = A_i e^{\pm \gamma_i x} = A_i (\cos \beta_i x \pm j \sin \beta_i x) e^{\pm \alpha_i x} \quad (2-15)$$

여기서  $x_i = i \Delta x$ 이며,  $\Delta x$ 는 미소구간의 폭이다. 한편,  $x = \infty$ 이면  $E_i = 0$ 이므로 식 (2-15)의 최종 해는 다음과 같이 주어진다.

$$E_i = A_i (\cos \beta_i x - j \sin \beta_i x) e^{-\alpha_i x} \quad (2-16)$$

여기서 각각의 분할구간의 경계면, 즉  $i-1$ 번째와  $i$ 번째의 경계면에서  $\text{Re}[E]$ 와  $\text{Re}[dE/dx]$ 가 연속이어야 한다. 이러한 경계조건을 대입하여 정리하면 다음과 같은 관계식이 얻어진다.

$$\alpha_1 + \sum_{i=2}^{\infty} \beta_{i-1} \tan(\beta_{i-1} x_{i-1}) = \alpha_{\infty} + \sum_{i=2}^{\infty} \beta_i \tan(\beta_i x_{i-1}) \quad (2-17)$$

식(2-10)~(2-12)를 사용하여 식 (2-17)의 고유치방정식을 풀면 두께가  $d_3$ 이고 폭이  $w$ 인 직각도파로에 의해 유지되는 등가굴절율을 구할 수 있다. 이와 같이 얻어진 등가굴절율로부터 식 (2-15)의 계수  $A_i$ 의 관계식을 구할 수 있다. 계수  $A_i$ 와  $A_{i+1}$ 의 관계는  $i$ 번째와  $i+1$ 번째의 분할경계에서  $E$ 와  $E_{i+1}$ 이 같다는 조건으로부터 구할 수 있으며, 그 관계식은 다음과 같다.

$$A_{i+1} = A_i (\cos \beta_i x_i / \cos \beta_{i+1} x_i) e^{-(\alpha_i - \alpha_{i+1})x_i} \quad (2-18)$$

식 (2-18)을 (2-16)에 대입하면 전계분포식을 얻을 수 있다.

$$E_{i+1} = E_i \frac{1}{\cos \beta_{i+1} x_i} \cos \beta_{i+1} x_{i+1} e^{-\alpha_{i+1} \Delta x} \quad (2-19)$$

### 2-3 측방향 유효굴절율차에 따른 동작특성

지금까지 전개한 식과 계산결과들은 RWG MQW-LD가  $\Delta n_L$  값에 따른 동작특성을 설명하는데 사용된다. 그러나 소자의 파라메타 값에는 다소 불확실성이 존재하고, 또한 에피특성에 따

라 이득 값이 변하기 때문에 동작특성을 정확하게 설명하기에는 다소 어려운 점이 있다. 그러나 앞에서 언급한 도파 메커니즘 변화에 대한 정성적인 특성은 레이저 공진기 내부의 주 모드에 의한 회절, focusing, 그리고 defocusing의 상호작용으로부터 기인하는 것이므로 이러한 현상과 관련되지 않는 파라메타에 의해 동작특성이 크게 변하지 않는 것으로 생각된다.

먼저 각각의 선폭퍼짐계수  $\alpha$ 에 대해 측방향 유효굴절율차  $\Delta n_L$ 에 따른 임계전류의 변화를 그림 2-4에 나타내었다. 이 그림에서 측방향 유효굴절율차가 작은 영역에서 임계전류의 변화가 급준함을 알 수 있는데, 이는 index-guided에 의한 모드의 focusing과 주입된 캐리어에 의한 defocusing의 상호작용으로 일어나는 것으로 생각된다. 그리고  $\Delta n_L$ 이 증가함에 따라 임계전류치가 빠르게 감소한다. 어느 임계값 이상에서 그 변화 폭이 완만하게 되며, 이때 완만하게 변하는 지점을 gain-guided 동작에서 index-guided 동작으로 변환되는 임계 유효굴절율차라고 하며, 이 임계값 이상에서는 순수한 index-guided로 동작하게 된다. 이 그림으로부터 임계값은 약 0.015 정도이다. 그리고 선폭퍼짐계수  $\alpha$  값에 따라 이 임계값의 크기가 약간 변하지만 그 폭이 그리 크지 않는 이유는 index-guided 영역에서 주입된 캐리어에 의한 측모드의 defocusing 작용이 비교적 작기 때문이다.

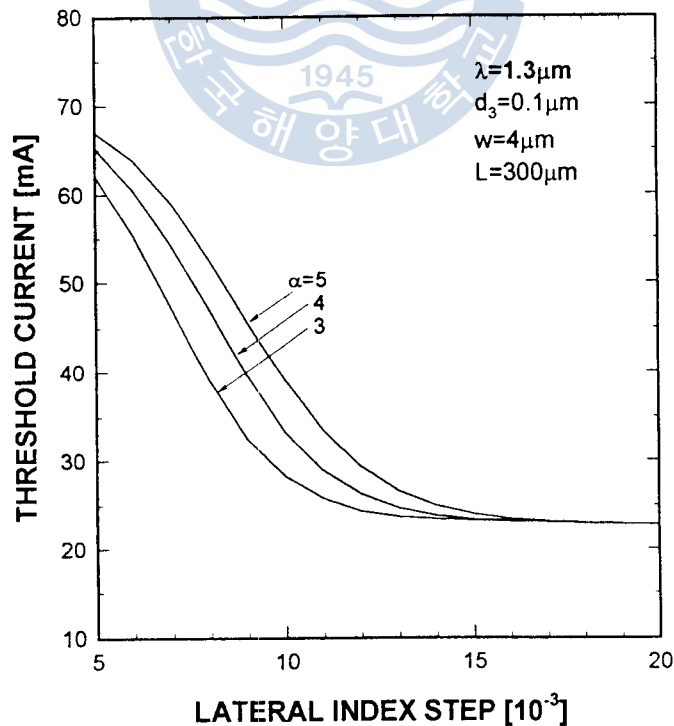


그림 2-4 측방향 유효굴절율차에 따른 임계전류의 변화

그림 2-5는 각각의  $\Delta n_L$ 의 변화에 대해서 ridge 폭에 따른 발진 임계전류 값의 변화를 나타내었다.  $\Delta n_L$ 값이 0.01, 0.015, 0.02, 그리고 0.03일 때, ridge 폭이 각각 약  $5\mu\text{m}$ ,  $3\sim 4\mu\text{m}$ ,  $2.5\sim 3\mu\text{m}$ , 그리고  $2\sim 2.5\mu\text{m}$ 로 한다면 임계전류치를 최소로 됨을 알 수 있다.

이러한 사실들을 종합하여 볼 때, 효율적으로 동작하는 RWG MQW-LD를 제작하기 위해서는 측방향 유효굴절율차  $\Delta n_L$ 의 임계값 이상이 되도록 활성층 및 클래드층 두께를 제어해야 하며, 임계전류치가 최소로 되면서 측방향에서 단일모드로 동작하도록 ridge 폭을 설계해야 한다. 예를 들어 측방향 유효굴절율차를 0.02 정도 되는 RWG MQW-LD (well :  $1.3\mu\text{m}$  InGaAsP, barrier :  $1.1\mu\text{m}$  InGaAsP)를 제작하고자 하는 경우, 그림 2-2에서 알 수 있듯이 활성층의 두께가  $0.1\mu\text{m}$ 라고 하였을 때, 상하의 클래드층 두께는 약  $0.2\mu\text{m}$ 로 한다면 이 값을 충분히 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그리고 ridge 폭은 측방향에서의 단일모드 발진조건과 그림 2-5의 폭에 따른 임계전류치 변화로부터  $3\mu\text{m}$  정도로 설계하면 측방향에서 단일모드로 동작함과 동시에 저전류로 동작하는 LD를 실현시킬 수 있다. 그러나 LD 제작의 관점에서 볼 때, ridge 폭을  $3\mu\text{m}$ 이하로 제작하는 것은 상당히 어렵다. 따라서 임계전류면에서 다소 특성이 떨어지더라도 ridge 폭을 제작 가능한  $4\sim 5\mu\text{m}$ 로 하기 위해서는 그림 2-5에서 알 수 있듯이 측방향 유효굴절율차를 약  $15 \times 10^{-3}$ 정도가 되도록 도파로를 설계해야 한다.

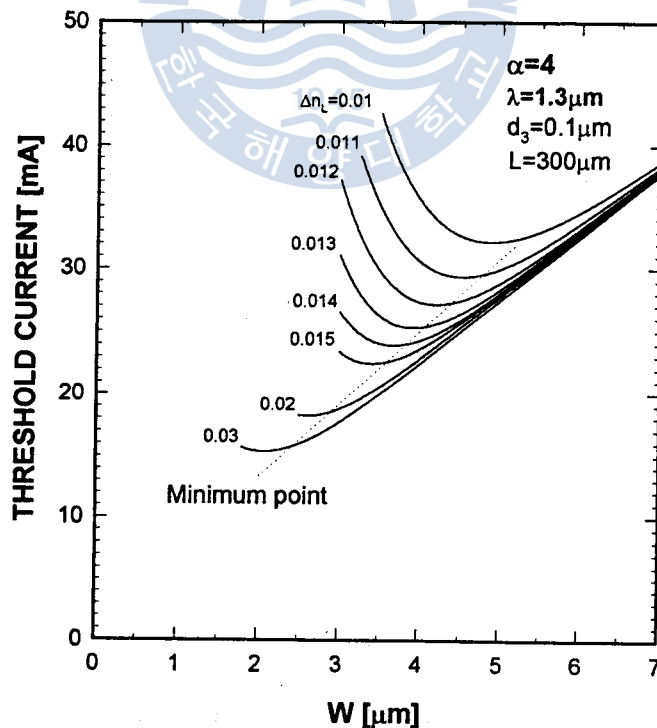


그림 2-5 Ridge폭에 따른 임계전류의 변화

### 제 3 장 RWG MQW-LD의 제작 및 특성평가

본 연구에서는 MOCVD나 MBE의 경우에 비해 에피층 균일도나 계면 확실도가 문제가 되기는 하지만 자체 설계 제작된 수직형 LPE 장치를 사용하여 MQW DH 웨이퍼 성장을 행하였다. 이와 같이 성장된 웨이퍼로 RWG MQW LD를 제작하여 보았다.

#### 3.1 성장장치

일반적으로 III-V족 화합물 반도체를 성장시키는 방법으로는 LPE(Liquid Phase Epitaxy), VPE(Vapor Phase Epitaxy), MBE(Molecular Beam Epitaxy), MOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 등이 있다. 본 연구에서는 RWG MQW LD를 제작하기 위한 MQW DH 웨이퍼 성장을 위하여 수직형 LPE를 사용하였는데, 이 장치에 대한 개략도를 그림 3-1에 나타내었다. 기본적으로 LPE 장치는 전기로와 온도제어 장치, 진공장치, H<sub>2</sub> purifier, 흑연보트(graphite boat)와 흑연보트의 구동장치, 그리고 석영반응관 등으로 구성된다.

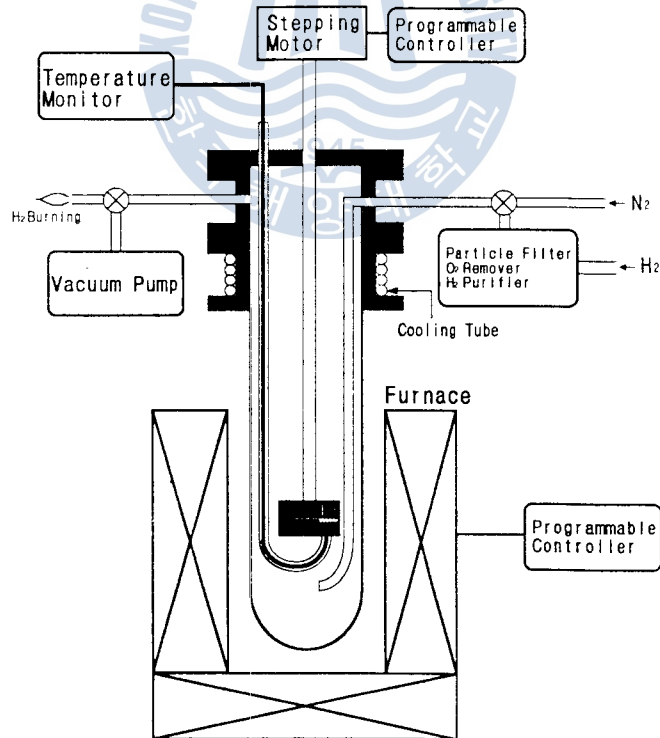


그림 3-1 수직형 LPE 장치의 개략도

## 3-2 MQW DH 웨이퍼 및 RWG MQW LD 제작

2장에서 언급했듯이 RWG MQW-LD가 index-guided로 동작하는 측방향 유효굴절률차를 얻기 위해서 도파로층의 두께조절이 중요하다. 한편, LPE 장치의 특성상 두께제어에 대한 재현성이 떨어지므로 정밀한 성장조건의 제어가 필요하다. 따라서 수회의 실험을 걸쳐 성장시간에 따른 결정성장의 두께를 조사하였다. 한편, LPE에서 2상 용액법으로 성장을 할 경우 초기 성장속도는 성장직전의 열적경로(thermal history), 그리고 항상 고체상태로 존재하는 InP seed가 성장용액의 과포화도를 줄여주는 역할을 하기 때문에 냉각속도와 초기 과포화도에 의해 결정된다. 초기성장속도는 InP의 경우는 냉각속도에만 의존하지만 InGaAsP의 경우는 용액의 과포화도와 냉각속도에 의존하기 때문에 초기 과포화도를 줄여주고 냉각속도를 느리게 하여 준다면 초기성장속도를 상당히 낮출 수 있을 것으로 생각된다.

그림 3-2의 (a)는 냉각속도가 0.1°C/min, (b)는 0.6°C/min으로 하여 InP와 InGaAsP를 각각 1초씩 성장시킨 MQW층의 단면사진이다.

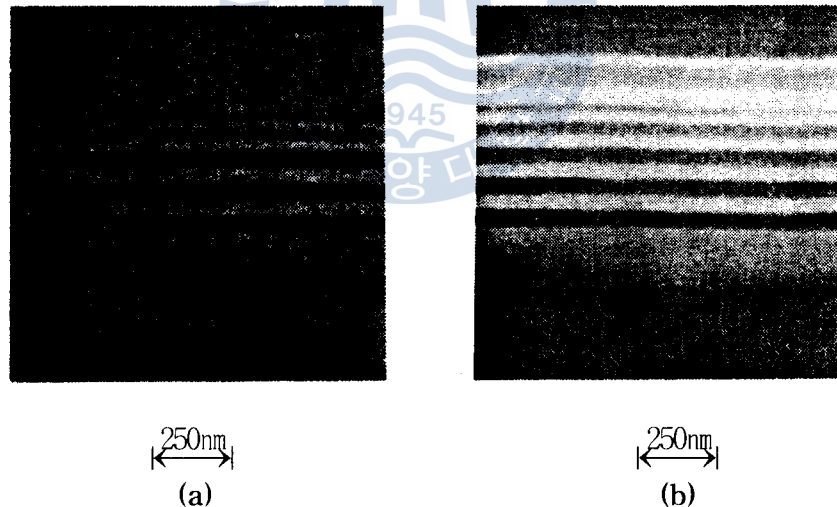


그림 3-2 성장된 MQW웨이퍼의 SEM 단면사진 I

(a) 냉각속도 : 0.1°C/min (b) 냉각속도 : 0.6°C/min

이 그림에서 밝은 부분은 InP층이며, 어두운 부분은 InGaAsP층을 나타낸다. 두 그림에서 알 수 있듯이 냉각속도에 따라 성장층의 두께차이가 거의 없고, QW의 층이 올라 갈수록 얇아지는 것으로 보아 초기 과포화도에 의해 이와 같은 결과가 나온 것으로 생각된다.

따라서, 실험결과를 보면, 성장된 MQW층 두께와 well층의 폭은 최적의 조건에서 얻어질 수 있는 분할 실험실의 전이로써 PID 파라미터를 계속 조정하여 증착의 불균일도를 줄여보았다.

PID 파라미터를 계속정한 조건하에서 냉각속도를  $0.4^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 으로 하고, 처음의 3층은 각각 1초씩, 그리고 나머지 2층은 각각 2초씩 성장시킨 MQW층의 단면사진을 그림 3-3에 나타내었다. 이 그림으로부터 성장된 MQW층의 전체두께가 약  $3000\text{\AA}$ 이므로 하나의 QW층 두께는 약  $600\text{\AA}$  정도가 된다. 그리고 InGaAsP와 InP층 두께비가 약 1 : 2 이므로 well층인 InGaAsP 두께는 약  $200\text{\AA}$ , barrier층인 InP 두께는 약  $400\text{\AA}$  정도임을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 분할 실험실의 LPE 장치로도 MQW층 성장이 아주 양호하게 됨을 확인할 수 있었다.

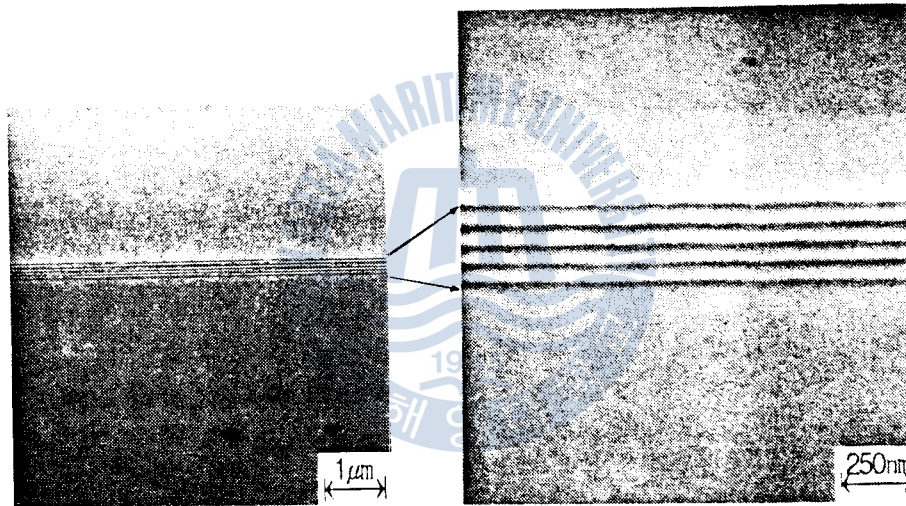


그림 3-3 성장된 MQW 웨이퍼의 SEM 단면사진 II

이러한 실험결과를 바탕으로 하여 본 논문에서는 그림 3-4와 같이 온도프로그램을 작성하였으며, 이때 냉각속도는  $0.4^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 으로 하였다. 각각의 구간에 대한 시간들은 index-guided LD로 동작하기 위한 도파로를 실현시키기 위해 여러번의 실험을 통해서 얻어진 최적의 결과들이다.

예로 ridge 폭을 제작가능한  $4\sim 5\mu\text{m}$ 로 하기 위해서는 측방향 유효굴절율차가 약 0.015가 되어야 함을 2장에서 밝혔는데, MQW층을 3층으로 하면 그림 3-3에서 추론할 수 있듯이 1초 동안 성장되는 InGaAsP의 두께는 약  $200\text{\AA}$  정도가 되므로  $1.1\mu\text{m}$ 와  $1.3\mu\text{m}$ 으로 이루어진 MQW층 두께는 약  $0.12\mu\text{m}$  ( $200\text{\AA} \times 6$ )가 되며,  $1.1\mu\text{m}$  InGaAsP 클래드층을 2초와 2분 정도 성장시켰을 경우 각각  $400\text{\AA}$ 과  $0.25\mu\text{m}$  정도가 성장됨을 여러번의 실험결과로부터 알 수 있었



다. 따라서 식 (2-8)로부터 계산하면 측방향 유효굴절율차는 약 0.015 정도가 된다.

본 연구에서 그림 3-4의 온도프로그램을 사용하여 MQW-DH 웨이퍼를 제작하였으며, photolithography 공정을 통하여 RWG MQW-LD를 제작하였다. 제작된 LD의 단면사진을 그림 3-5에 나타내었다.

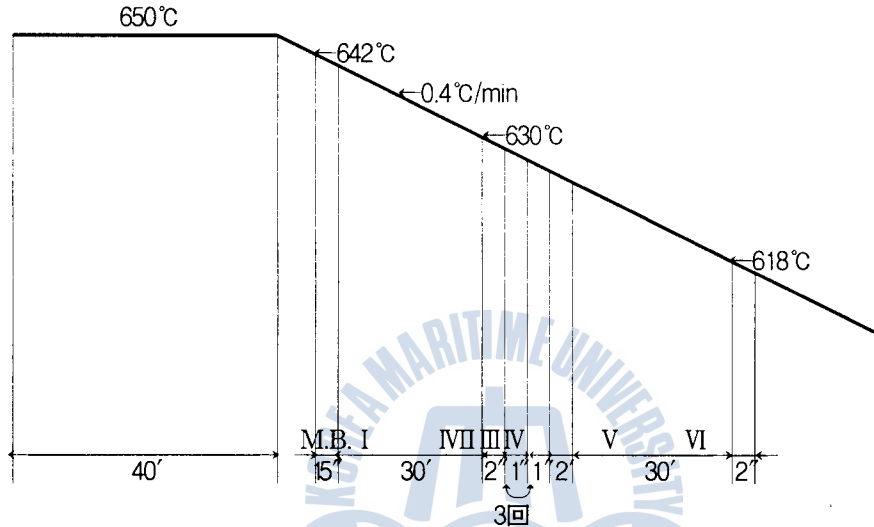


그림 3-4 MQW-DH웨이퍼 성장을 위한 온도프로그램

MB : Meltback      I : n-InP      II : InGaAsP(1.3 $\mu$ m)      III : InGaAsP(1.1 $\mu$ m)  
 IV : InGaAsP(1.1 $\mu$ m)      V : p-InP      VI : p<sup>-</sup>-InGaAs

### 3-2 RWG MQW-LD의 특성평가

본 연구에서는 제작된 RWG MQW-LD에서 여러개의 샘플을 추출하여 여러개의 길이에 대한 I-L특성을 조사하여 그림 3-6에 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있듯이 출력광이 5mW에 이르기까지 mode-hopping에 의한 kink현상이 나타나지 않는 것으로부터 제작된 RWG MQW-LD가 단일모드로 동작함을 알 수 있었다. 그리고 임계전류밀도  $J_{th}$ 는 그림으로부터 대략 2~2.5KA/cm<sup>2</sup> 임을 알 수 있다. 일반적인 MQW의 발진 임계전류밀도 2~3KA/cm<sup>2d</sup>과 비교해 볼 때, RWG MQW-LD의 제작이 비교적 잘 되었음을 알 수 있었다.

제작된 RWG MQW-LD가 단일 측모드로 동작하고 발진 임계전류 등을 고려해 보면, 이 론 계산에서 측방향 유효굴절율차가 0.012 정도임을 추정할 수있다. 그러나 LD의 leakage



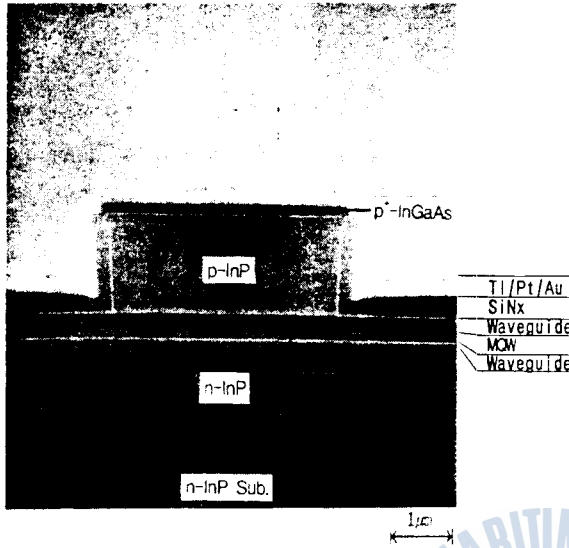


그림 3-5 제작된 RWG MQW-LD의 단면사진

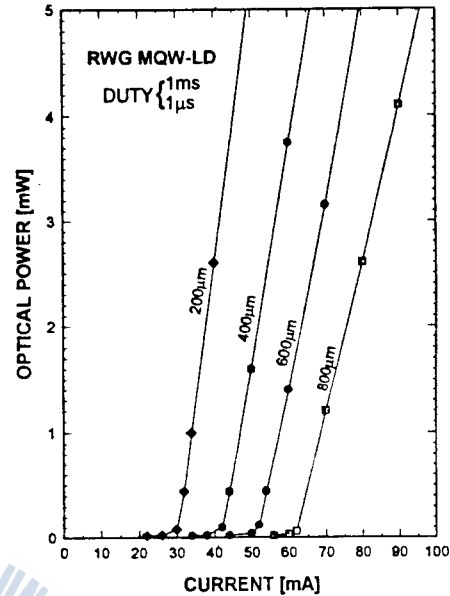


그림 3-6 I-L 특성

current까지 고려하게 되면 제작된 LD가 index guided LD로 동작하기 위한 측방향 유효 굴절율차가 0.015 이상인 것으로 예상된다.

#### 제 4 장 결론

본 연구에서는 InGaAsP/InP RWG MQW LD를 제작하기 앞서 이론해석으로부터 RWG MQW LD의 도파로규격에 따른 측방향 유효굴절율차와 index-guided LD로 동작하는 임계 유효굴절율차의 값, 그리고 이러한 굴절율차에 따른 측방향에서의 단일모드 발진조건과 임계전류를 최소로 하기 위한 ridge 폭을 구하여 도파로를 설계하였다. 그리고 본 실험실에서 갖추고 있는 수직형 LPE 장치로 이러한 설계규격에 맞도록 RWG MQW LD를 제작하였다. 그리고 I-L 특성으로부터 RWG MQW LD의 동작특성을 조사하였다.

이러한 과정을 통해 얻은 본 연구의 결과를 정리해 보면 다음과 같다.

- 1) 순수한 index guided LD로 동작하기 위한 측방향 임계 유효굴절율차 값은 일반적인 bulk층 보다는 약 2배 정도 큰 값인 약 0.015이었다. 그리고 이 값은 ridge 폭에 민감하게 변하지 않음을 알 수 있었다.
- 2) Index guided로 동작하는 임계 유효굴절율차의 값을 가지는 LD가 측방향으로 단일모드로 동작하기 위해서는 ridge 폭은 약  $4\sim 5\mu\text{m}$  이하가 되어야 함을 알 수 있었다.

- 3) Index guided LD로 동작하는 영역, 즉 측방향 유효굴절율차  $\Delta n_{\perp} \approx 0.015$ 일 때, ridge 폭을 약  $4 \sim 5 \mu\text{m}$  정도로 하면 임계전류값이 최소로 된다.
- 4) 제작된 RWG MQW-LD의 I-L 특성으로부터 임계전류밀도, 내부양자효율, 그리고 내부손실을 측정된 결과 다음과 같이 얻었다.

- 측방향에서 단일모드 동작
- 임계 전류(  $I_{th}$  ) :  $41\text{mA}$  (  $L=400\mu\text{m}$  )
- 내부양자효율(  $\eta_i$  ) :  $77\%$
- 내부 손 실(  $\alpha_{int}$  ) :  $18\text{cm}^{-1}$

이러한 결과들을 종합해 보면, LPE로 제작된 RWG MQW-LD의 특성은 MOCVD에서 얻을 수 있는 특성과 거의 비슷한 수준을 얻을 수 있으며, 또한 MQW층을 가지는 광소자



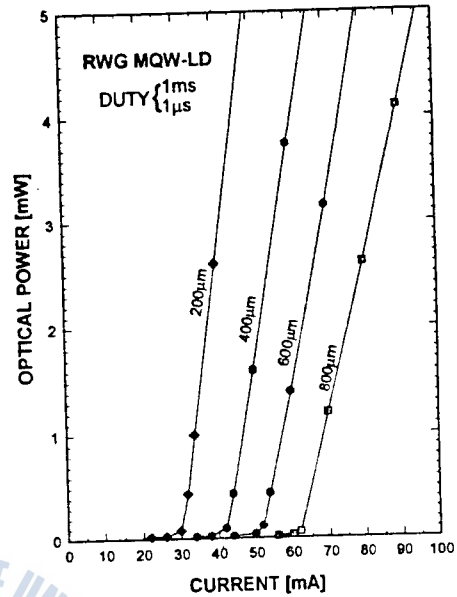
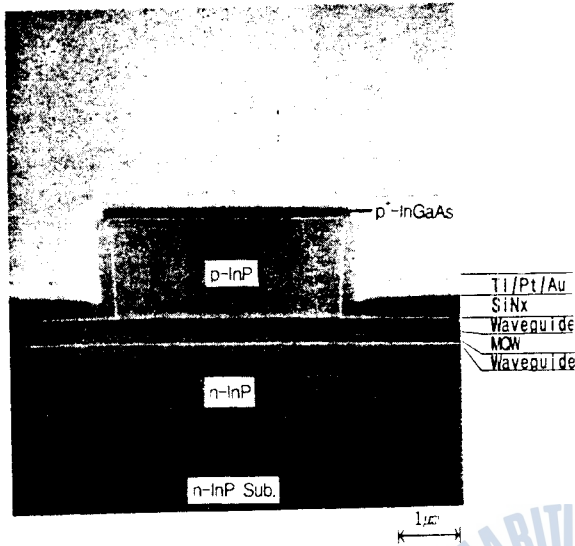


그림 3-5 제작된 RWG MQW-LD의 단면사진

그림 3-6 I-L 특성

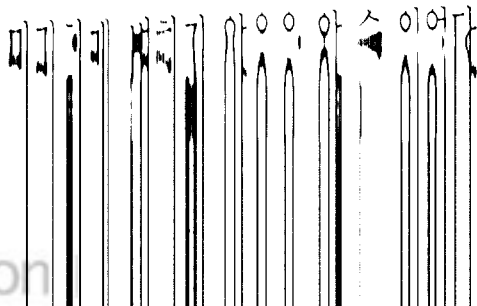
current까지 고려하게 되면 제작된 LD가 index guided LD로 동작하기 위한 측방향 유효 굴절율차가 0.015 이상인 것으로 예상된다.

### 제 4 장 결론

본 연구에서는 InGaAsP/InP RWG MQW-LD를 제작하기 앞서 이론해석으로부터 RWG MQW LD의 도파로규격에 따른 측방향 유효굴절율차와 index-guided LD로 동작하는 임계 유효굴절율차의 값. 그리고 이러한 굴절율차에 따른 측방향에서의 단일모드 발진조건과 임계전류를 최소로 하기 위한 ridge 폭을 구하여 도파로를 설계하였다. 그리고 본 실험실에서 갖추고 있는 수직형 LPE 장치로 이러한 설계규격에 맞도록 RWG MQW LD를 제작하였다. 그리고 I L 특성으로부터 RWG MQW-LD의 동작특성을 조사하였다.

이러한 과정을 통해 얻은 본 연구의 결과를 정리해 보면 다음과 같다.

- 1) 순수한 index guided LD로 동작하기 위한 측방향 임계 유효굴절율차 값은 일반적인 bulk층 보다는 약 2배 정도 큰 값인 약 0.015이었다. 그리고 이 값은 ridge 폭에



- 3) Index guided LD로 동작하는 영역, 즉 측방향 유효굴절율차  $\Delta n_e \approx 0.015$ 일 때, ridge 폭을 약  $4 \sim 5 \mu\text{m}$  정도로 하면 임계전류값이 최소로 된다.
- 4) 제작된 RWG MQW-LD의 I-L 특성으로부터 임계전류밀도, 내부양자효율, 그리고 내부손실을 측정한 결과 다음과 같이 얻었다.

- 측방향에서 단일모드 동작
- 임계 전 류(  $I_{th}$  ) : 41mA (  $L=400\mu\text{m}$  )
- 내부양자효율(  $\eta_i$  ) : 77%
- 내부 손 실(  $\alpha_{int}$  ) :  $18\text{cm}^{-1}$



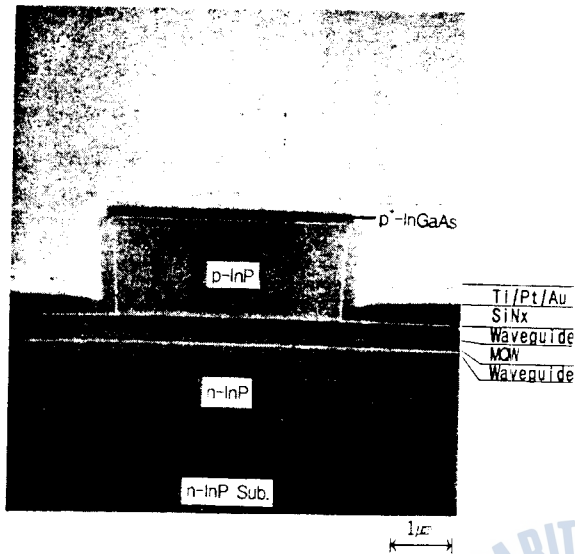


그림 3-5 제작된 RWG MQW-LD의 단면사진

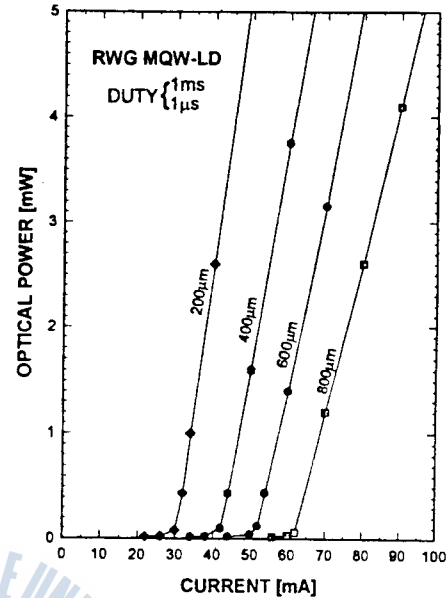


그림 3-6 I-L 특성

current까지 고려하게 되면 제작된 LD가 index guided LD로 동작하기 위한 측방향 유효 굴절율차가 0.015 이상인 것으로 예상된다.

## 제 4 장 결론

본 연구에서는 InGaAsP/InP RWG MQW LD를 제작하기 앞서 이론해석으로부터 RWG MQW LD의 도파로규격에 따른 측방향 유효굴절율차와 index-guided LD로 동작하는 임계 유효굴절율차의 값, 그리고 이러한 굴절율차에 따른 측방향에서의 단일모드 발진조건과 임계전류를 최소로 하기 위한 ridge 폭을 구하여 도파로를 설계하였다. 그리고 본 실험실에서 갖추고 있는 수직형 LPE 장치로 이러한 설계규격에 맞도록 RWG MQW LD를 제작하였다. 그리고 I L 특성으로부터 RWG MQW LD의 동작특성을 조사하였다.

이러한 과정을 통해 얻은 본 연구의 결과를 정리해 보면 다음과 같다.

- 1) 순수한 index guided LD로 동작하기 위한 측방향 임계 유효굴절율차 값은 일반적인 bulk층 보다는 약 2배 정도 큰 값인 약 0.015이었다. 그리고 이 값은 ridge 폭에 민감하게 변하지 않음을 알 수 있었다.
- 2) Index guided로 동작하는 임계 유효굴절율차의 값을 가지는 LD가 측방향으로 단일모드로 동작하기 위해서는 ridge 폭은 약  $4\sim 5\mu\text{m}$  이하가 되어야 함을 알 수 있었다.

- 3) Index guided LD로 동작하는 영역. 즉 측방향 유효굴절율차  $\Delta n_{\perp} \approx 0.015$ 일 때, ridge 폭을 약  $4 \sim 5 \mu\text{m}$  정도로 하면 임계전류값이 최소로 된다.
- 4) 제작된 RWG MQW-LD의 I-L 특성으로부터 임계전류밀도, 내부양자효율, 그리고 내부손실을 측정한 결과 다음과 같이 얻었다.

- 측방향에서 단일모드 동작
- 임계 전류(  $I_{th}$  ) : 41mA (  $L=400\mu\text{m}$  )
- 내부양자효율(  $\eta_i$  ) : 77%
- 내부 손 실(  $\alpha_{int}$  ) :  $18\text{cm}^{-1}$

이러한 결과들을 종합해 보면, LPE로 제작된 RWG MQW-LD의 특성은 MOCVD에서 얻을 수 있는 특성과 거의 비슷한 수준을 얻을 수 있으며, 또한 MQW층을 가지는 광소자 제작에 LPE 방법을 활용하더라도 전혀 문제가 없다는 사실을 확인할 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- 1) 조호성, "수직형 LPE 장치에 의한 InGaAsP/InP MQW-LD 제작에 관한 연구," 한국해양대학교 대학원논문집, 제 16권, 1994.
- 2) K.Oe and K.Sugiyama, "GaInAsP/InP double-heterostructure lasers prepared by a new LPE apparatus," *Jpn.J.Appl.Phys.*, Vol.15, pp.1740~1741, 1976.
- 3) J.J.Hsieh, "Thickness and surface morphology of GaAs LPE layers grown by supercooling, step-cooling, equilibrium-cooling and two-phase solution techniques," *J.Cryst.Growth*, Vol.27, pp.49~61, 1974
- 4) G.H.B.Thompson, *Physics of Semiconductor Laser Devices*, New York : Wiley, 1980.ch.6.
- 5) H.Kawaguchi and T.Kawakami, "Transverse mode control in an injection laser by a strip loaded waveguide," *IEEE J.Quantum electron.*, Vol.QE-13, pp.556~559, 1977.
- 6) I.P.Kaminow, R.E.Nahory, M.A.Pollack, L.W.Stulz, and J.C.Dewinter, "Single-mode CW ridge waveguide laser emitting at  $1.55\mu\text{m}$ ," *Electron.Lett.*, Vol.15, pp.763~765, 1979.
- 7) R.A.Sammut, and I.M.Skinner, "Effective index models for MQW waveguides," *Optics Comm.*, Vol.76, pp.213~216, 1990.
- 8) G.P.Agrawal and N.K.Dutta, *Long-Wavelength Semiconductor lasers*, New York : Van Nostrand Reinhold Company, 1986, ch.2.

- 9) M.Asada, "Theoretical linewidth enhancement factor  $\alpha$  of GaInAsP/InP lasers," *Trans.IECE of Japan*, Vol.**E-68**, No.8, pp.518 ~ 520, 1985.
- 10) I.P.Kaminow, L.W.Stulz, J.S.Ko, A.G.Dentai, R.E.Nahory, J.C.Dewinter, and R.L.Hartman, "Low threshold InGaAsP ridge waveguide lasers at  $1.3\mu\text{m}$ ," *IEEE J.Quantum Electron.*, Vol.**QE-19**, pp.1312 ~ 1319, 1983.
- 11) G.P.Agrawal, "Lateral analysis of quasi-index-guided injection lasers : transition from gain to index guiding," *J.Lightwave Tech.*, Vol.**LT-2**, pp.537 ~ 543, 1983.
- 12) D.P.Wilt and A.Yariv, "A self-consistent static model of the double hetrostructure," *IEEE J.Quantum Electron.*, Vol.**QE-17**, pp.1941 ~ 1949, 1981.
- 13) G.P.Agrawal, "Fast-fourier-transform based beam-propagation model for stripe-geometry semiconductor lasers : Inclusion of axial effects," *J.Appl.Phys.* Vol.**56**, No.11, pp.3100 ~ 3109, 1984.
- 14) M.C.Amann and B.Stegmüller, "Threshold current analysis of InGaAsP-InP ridge waveguide lasers," *IEE Proc.*, Vol.**133**, No.6, pp.341 ~ 348, 1986.
- 25) M.Ueno, R.Lang, S.Matsumoto, H.Kawano, T.Furuse, and Sakuma, "Optimum designs for InGaAsP/InP ( $\lambda=1.3\mu\text{m}$ ) planoconvex waveguide lasers under lasing conditions," *IEE Proc.*, Vol.**129**, No.6, pp.218 ~ 228, 1982.
- 16) Y.Arakawa, K.Vahala and A.Yariv, "Quantum noise and dynamics in quantum well and quantum wire lasers," *Appl.Phys.Lett.*, Vol.**45**, pp.950 ~ 952, 1984.
- 17) Y.Arakawa and A.Yariv, "Theory of gain, modulation response, and spectral linewidth in AlGaAs quantum well lasers," *IEEE J.Quantum Electron.*, Vol.**QE-21**, pp.1666 ~ 1674, 1985.
- 18) Y.Arakawa, K.Vahala and A.Yariv, "Dynamic and spectral properties in semiconductor lasers with quantum well and wire effects," *2nd Int.Conf.Modulated semiconductor Structures, Kyoto, Japan*, 1985.
- 19) Y.Sasai, N.Hase, M.Ogura, and T.Kajiwara, "Fabrication and lasing characteristics of  $1.3\mu\text{m}$  InGaAsP multi-quantum-well lasers," *J.Appl.Phys.*, Vol.**59(1)**, pp.28 ~ 31, 1986.
- 20) E.Kuphal, "Phase diagrams of InGaAsP, InGaAs and InP lattice-matched to (100) InP," *J.Crystal Growth*, Vol.**67**, pp.441 ~ 457, 1984.
- 22) W.Y.Lum and A.R.Clawson, "Thermal degradation of InP and its control in LPE growth," *J.Appl.Phys.*, Vol.**50**, pp.5296 ~ 5301, 1979.

