

# 액상결정성장에 의한 다중양자우물층 성장 및 Buried Ridge Waveguide Laser Diode 제작에 관한 연구

오 수 환\* · 홍 창 희\*\*

A study on the multiple-quantum-well layer growth and the fabrication of Buried Ridge Waveguide Laser Diode by the Liquid Phase Epitaxy

Su-Hwan Oh · TchangHee Hong

## ABSTRACT

In this research our vertical LPE system was modified in order to grow the InGaAsP/InP layers reproducibly and uniformly, so that its stability improved.

But it is difficult to grow the layer below 100Å even by using the modified system and the above method. This was due to the instability of growth solution caused by rotation of the solution hole during growth. Therefore, we made a new structure of graphite boat in which we do rotate not the solution part but the substrate part. After the growth of MQW layers with the new graphite boat, we could confirm that more than 1/2 of the layer thickness and 1/4 of thickness deviation were decreased. Approximately 40Å or 60Å thickness of 1.3μm InGaAsP and 1.1μm InGaAsP layer are obtained with good quality. It is concluded from these results that the maintenance of the stable condition in solution during growth is the most important factor for the reproducible growth of uniform epitaxial layer by LPE system.

We proposed B-RWG LD of which the ridge width was controlled more easily and planarization is more advantageous than RWG LD. It is possible to make single mode LD having the ridge width of 6~9μm if the lateral difference of the

\* 한국해양대학교 전자통신공학과 박사과정 전자·전산 전공

\*\* 한국해양대학교 전자통신공학과 교수

effective index of refraction is controlled properly. InGaAs/InGaAsP MQW DH wafer was grown with the optimally designed values by CBE.

The blocking layers of MQW B-RWG LD were regrown by LPE, on the ridge stripes formed by chemical wet etching. The blocking layer was formed by 2nd growth(A type) and 3rd growth(B type). It could be found that the characteristics of LD fabricated by 3rd growth were better than those by 2nd growth

The far field pattern was measured in order to know whether it was operated as single mode in the lateral direction or not. It could be seen that the LDs were operated as single mode up to 2.7lth in ridge width of  $5\mu\text{m}$  and 2.4lth in  $7\mu\text{m}$ . It could be confirmed from the above results that the MQW B-RWG LD made by the optimal design was operated as single mode in the lateral direction.

## 1. 서 론

LPE 장치로 고품질의 MQW층을 성장시키기 위하여 기존 장치의 성능을 개선하였다. 특히 LPE 장치의 온도제어 특성과 시스템 안정성을 유지할 수 있도록 LPE 장치를 수정 보완하였다. 개선된 전기로의 온도특성은 원주방향으로  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 로 아주 우수하게 나타났으며, 프랜지 부분과 반응관 등을 수정하여  $10^{-5}$  torr 정도의 고진공을 유지할 수 있게 하였다. 이렇게 개선된 수직형 LPE 장치의 특성을 조사하기 위해 bulk-LD를 제작하여 그 특성을 조사하여 본 결과, 상용의 LPE로 제작한 LD와 비슷한 특성을 가지는 것으로 보아 수정 제작한 LPE 장치의 특성이 우수함을 확인하였다.

개선된 수직형 LPE 장치를 이용하여 MQW층을 성장해 본 결과, 재현성 측면에서 우수한 것으로 확인되었지만,  $100\text{\AA}$  이하의 QW층 성장은 어려웠다. 그 이유는 일반적인 수직형 LPE 장치가 가지는 흑연보트의 구조상 성장용액이 회전을 하게 되므로 성장용액의 rolling에 의해 평형상태가 깨어지기 때문이다. 따라서 이러한 문제점을 해결할 수 있는 구조의 흑연보트를 설계 제작하였고, 흑연보트에 따른 성장특성을 조사해 봄으로써 성장용액의 불안정성이 성장층에 미치는 영향을 확인하여 보았다. 또한 InGaAsP 성장에서 과포화도를 줄이기 위하여 InP 다결정과 단결정 seed가 MQW층 성장에 미치는 영향을 조사하였다. 새로운 구조의 흑연보트를 사용해본 결과  $40\sim 60\text{\AA}$  정도의  $1.3\mu\text{m}$  InGaAsP QW층을 가지는 성장결과를 얻었다.

이렇게 개선된 수직형 LPE 장치가 어느 정도의 양질의 에피층을 성장할 수 있는가를 종합적으로 평가하기 위하여 새로운 구조의 LD의 제작에 사용하여 보았다.

새로운 구조의 Buried Ridge Waveguide(B-RWG) LD를 제안하고자 한다. B-RWG

LD는  $3\mu\text{m}$  이하의 ridge shape 형성 후 1회의 재성장으로 저전류 고효율 LD제작이 가능하다는 이점이 있다. 또한 B RWG LD는 유효굴절률의 측방향차를 성장된 에피층의 두께로 조절할 수 있기 때문에 RWG LD보다 단일모드로 동작할 수 있는 ridge 폭을 크게 할 수 있어 고출력으로 동작하는 LD제작이 가능하다. 그러므로 본 연구에서는 고출력 및 저전류로 동작하는 B RWG LD 제작에 초점을 맞추었으며, LD를 제작하기 전에 B RWG LD를 최적화 설계하였다.

이와 같이 최적화 설계된 값을 이용하여 CBE 방법으로 MQW DH 웨이퍼를 성장하였으며, 화학 에칭에 의해 ridge 모양을 형성하였다. 그리고 개선된 수직형 LPE 장치를 이용하여 2차 및 3차 재성장을 하여 B RWG LD를 제작하였다. 제작된 B RWG LD의 특성을 조사하여 설계 결과와 비교하여 보았으며, 아울러 본 장치의 성능을 종합적으로 평가하였다.

## 2. 수직형 LPE 장치의 성능개선

### 2.1 수직형 LPE 장치의 설계 및 제작

수정 전 수직형 LPE 장치에서 가장 중요한 점은 성장용액이 회전하면서 기판과 접촉하여 성장이 일어나므로 흑연보트의 원주방향 온도특성이 균일해야 한다는 것이다. 그러나 원주방향의 최대온도편차는 약  $\pm 1^\circ\text{C}$  정도로서 여러 층을 성장시킬 경우 같은 조성의 성장용액을 사용하더라도 과포화도의 차이에 의하여 성장층의 조성이 변화할 수 있으며, 또한 성장율의 차이를 가져올 수 있다<sup>11</sup>. 그리고 성장용액의 온도가 기판보다 높을 경우에는 이미 성장된 층이 meltback될 가능성이 있으며, 이러한 온도 편차에 의해 성장층간의 계면 불확실도가 증가하여 MQW층과 같이 백 Å이하를 제어하여야 할 경우에는 심각한 영향을 미칠 수 있다. 그래서 균일한 성장층의 두께를 얻기가 어렵게 된다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 전기로를 수정 보완한 결과 원주방향의 온도편차가  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  정도로 안정된 값을 가짐을 알 수 있다. 온도편차는 통상적인 수평형 LPE에서의 온도편차  $\pm 1^\circ\text{C}$ 보다 10배 정도 좋은 값으로서, 제작된 전기로의 성능은 상용화된 장치의 온도특성으로 알려진  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 보다도 5배 정도 더 좋은 성능을 가진 것으로 판단된다.

일반적으로 열손상을 줄이는데는 cover crystal를 쓰는 방법이 가장 일반적인 방법으로서 사용의 간편성 때문에 많이 사용되고 있다. Cover crystal 중에서는 GaAs single crystal의 거친 면을 사용하는 것이 가장 좋은 것으로 알려져 있는데, 이 경우 InP 기판과 GaAs cover crystal의 상호 작용에 의해 비교적 열적 안정성이 뛰어난 얇은 InGaAsP층을 형성시키기 때문에  $650^\circ\text{C}$ 까지는 거의 열손상이 없는 것으로 알려져

있다. 그리고 (111)B InP cover crystal도 상당히 좋은 열손상 억제 특성을 갖는 것으로 보고되어 있다<sup>2),3)</sup>.

본 연구에서도 cover crystal을 사용하는 방법을 선택하였으며, 흑연보트의 성장용액 홀더에 cover crystal을 장착할 수 있는 구조를 가지도록 하였다. 그림 2.1에 이러한 개념에 의해 설계 제작된 흑연보트가 나타나 있다.

그림 2.1에 나타난 흑연보트는 여러 번의 수정 작업을 통해 얻어진 성장특성과 시스템과의 조화를 고려한 것으로서 좌측의 것이 성장용액 홀더이며, 우측이 기판 홀더이다. 그림에 나타난 흑연보트에 사용되는 기판의 크기는 9.5mm × 9.5mm이며, cover crystal이 크면 클수록 기판의 열손상을 효율적으로 방지할 수 있으므로 최대한의 크기를 확보하여 13mm × 14mm가 되도록 하였다. 그러나 제 3장에서 기술되는 성장결과에서 보여주듯이, 기판이 고정된 상태에서 성장용액이 회전하는 구조로 인하여 성장시 성장용액의 불안정성이 발생하고, MQW층과 같은 얇은 층을 균일하게 성장시켜야 하는 경우에는 문제점을 가지게 된다.

따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 기판이 회전하는 구조를 가진 그림 2.2과 같은 흑연보트를 설계 제작하였다. 기판과 cover crystal의 크기는 그림 2.1의 경우와 동일하며, 왼쪽 흑연보트가 성장용액 홀더로서 3단 구조를 하고 있다. 이렇게 제작할 경우 성장시 성장용액의 안정성을 최대한 확보할 수 있다.

이러한 흑연보트들의 성장특성의 비교는 3장에서 다루기로 한다.

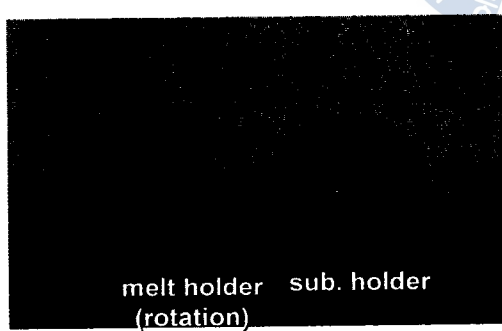


그림 2.1 수정 전 흑연보트의 사진

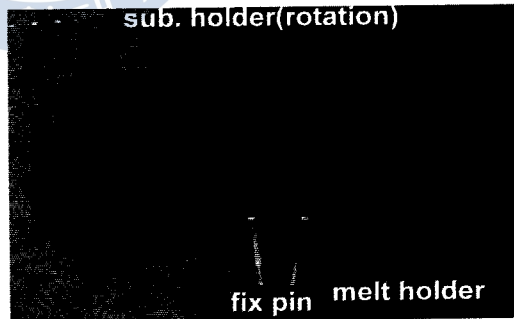


그림 2.2 수정된 흑연보트의 사진

## 2.2 개선된 수직형 LPE 장치의 특성평가

본 절에서는 개선된 수직형 LPE 장치의 성능을 확인하기 위해 가장 간단한 구조인 bulk-LD를 제작하여 보고, 그 성능에 따라 개선된 LPE 장치의 특성을 평가해 보고자 한다.

그림 2.3에 제작된 전면전극형 bulk-LD의 단면사진을 나타내었다. 이 그림에서 보듯이 활성층인 1.3 $\mu\text{m}$  InGaAsP층의 두께는 0.25 $\mu\text{m}$ 이며 InP buffer층은 약 2.4 $\mu\text{m}$ , p<sup>-</sup>-InGaAs는 0.37 $\mu\text{m}$ 로 나타났다.

제작된 반도체레이저의 pn접합의 상태와 저항의 크기를 알아보기 위하여 전류 대 전압(I-V)특성을 조사하였다. 여기서 pn접합이 적절하지 못하면 반도체레이저의 양자 효율 및 수명에 직접적인 영향을 미치게 되어 실제 소자로서 사용할 수가 없게 된다. 이러한 pn접합은 반도체레이저의 제작초기부터 여러 가지 연구가 이루어졌는데, 도핑 농도와 pn접합의 위치에 따라 소자의 성능이 결정된다는 사실이 알려져 있다<sup>4)</sup>.

그림 2.4는 수정된 LPE 장치로 제작된 bulk-LD의 I-V 특성을 나타낸다. 조사한 샘플은 다른 2개의 웨이퍼에서 50여 개의 샘플을 임의로 추출해서 조사하여 본 결과와 거의 같은 경향을 보였다. 순방향 임계전압이 0.8V, 역방향 항복전압이 5V 전후로서 1.3 $\mu\text{m}$  InGaAsP/InP LD가 가지는 일반적인 상용화된 소자의 특성과 같은 값을 가짐을 알 수 있다.

LD의 I-L추정을 위한 실험에서는 활성층에서 발생하는 Joule열의 영향을 배제하기 위하여 간이 mount 상에서 펄스 주기 1ms, 펄스 폭 1 $\mu\text{s}$ 인 0.1% duty cycle을 사용하여 발진실험을 행하였다.

그림 2.5에는 제작된 bulk LD 활성층의 내부양자효율과 내부손실을 구하기 위해 광전사 길이에 따른 외부양자효율의 역수를 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 내부양자효율  $\eta_i=77\%$ 로서 캐리어의 주입 효율이 양호하며, 활성층의 에피 특성이 우수하여 비방광 재결합과 같은 현상이 거의 일어나지 않는 것으로 추정할 수 있다. 그리고 내부손실은  $\alpha_{im}=28\text{cm}^{-1}$ 로서 상용의 LD의 내부손실의 30 $\text{cm}^{-1}$ 과 비슷한 성질을 가짐을 알 수 있다.

그림 2.6는 측정된 온도에 따른  $T_{3/4}$ 의 변화를 나타낸 것이다. 이 그림에서 실선은  $T_{3/4}$ 를 58K로 계산한 이론 곡선이다. Bulk 상태의 InGaAsP/InP LD의  $T_{3/4}$ 는 50~75K라고 알려져 있는 것과 거의 비슷한 값을 가지고, 현재까지 LPE로 제작된 QW-LD의 경우 값과 비교해 보면 거의 평균값에 가까움을 알 수 있다.

### 3. InGaAsP/InP MQW 결정성장

LPE 장치에 의해서 MOCVD나 MBE와 비슷한 에피층을 성장할 수 있다면, MQW 구조의 광소자 연구에 대단히 유익할 것으로 생각한다. 그래서 본 논문의 2장에서는 이러한 관점에서 LPE 장치를 개선하였다.

한편, 수직형 LPE 장치의 경우, 반응관이 수직으로 세워져 있다. 그러므로 흑연보트

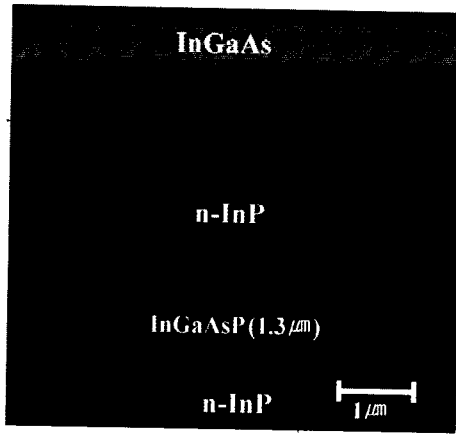


그림 2.3 bulk-LD의 SEM 단면사진

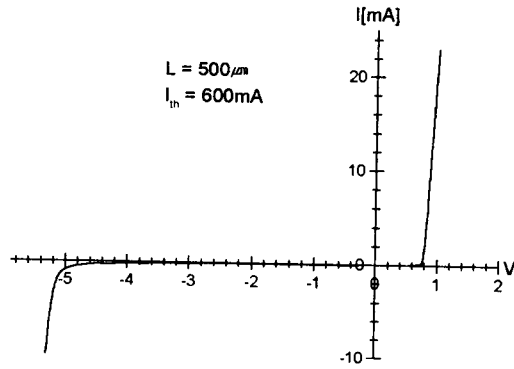


그림 2.4 Bulk-LD의 I-V특성

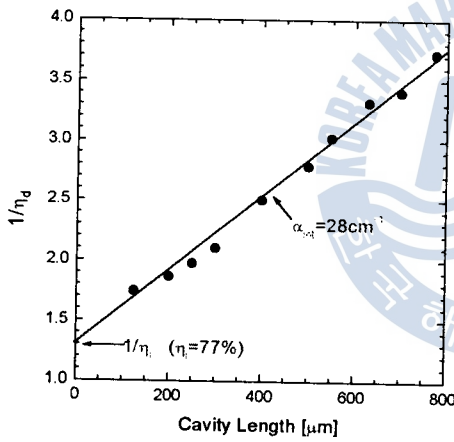


그림 2.5 내부양자효율 및 내부손실측정

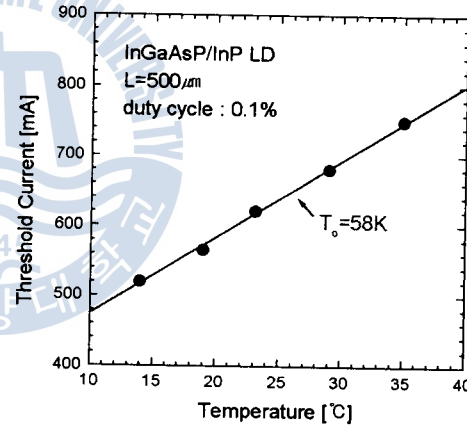


그림 2.6 Bulk-LD의 온도에 따른 Ith의 변화

의 윗부분인 용액홀더의 회전에 의해 성장이 일어난다. 이와 같이 흑연보트의 구조상 성장용액이 회전을 하게 되므로 성장용액의 rolling에 의해 평형상태가 깨어질 수 있다는 문제점을 가지고 있음을 확인하였다.

따라서 이러한 문제점을 해결할 수 있는 구조의 흑연보트를 설계 제작하였고, 흑연보트에 따른 성장특성을 조사해 봄으로써 성장용액의 불안정성이 성장층에 미치는 영향을 확인하여 보았다.

본 연구에서는 이와 같이 조사한 성장특성과 개선된 LPE 장치를 이용하여 어느 정도까지 재현성 있는 MQW층을 성장할 수 있는지를 조사하여 보았다.



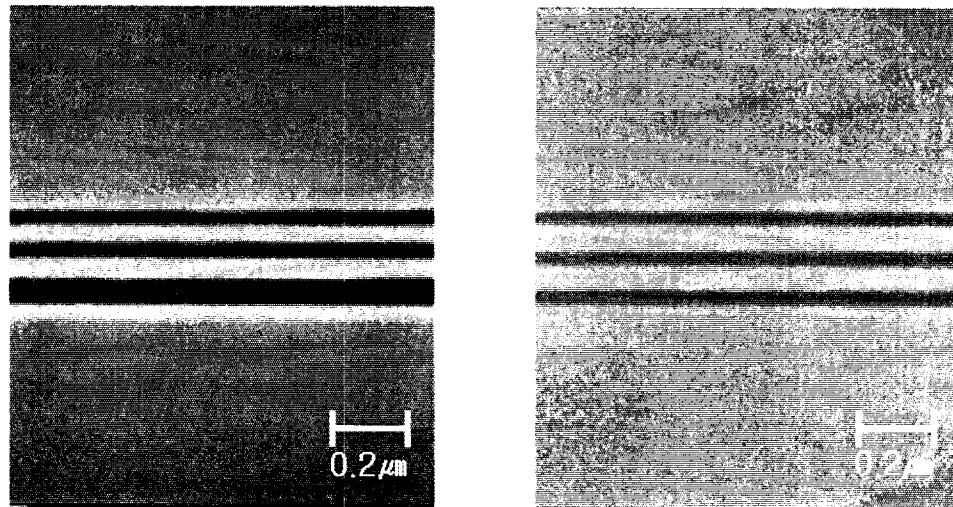
### 3.1 전기로의 온도특성에 따른 성장특성

수정 전의 LPE 장치와 수정 후의 LPE 장치로 성장된 에피층의 특성을 비교하기 위하여, 성장온도 630°C, 냉각속도 0.4°C/min로 하여 발진파장 1.3 $\mu$ m InGaAsP와 InP를 1초간 3회 왕복 성장시키고 그 결과를 비교 검토하여 보았다.

이렇게 성장된 단면을 선택 식각하여 관찰한 SEM 사진이 그림 3.1에 나타나 있다.

그림 3.1에서 어둡게 나타난 부분이 발진파장 1.3 $\mu$ m를 가진 InGaAsP이며, 밝게 보이는 부분은 InP층이다. 그림 (a)는 수정 전의 LPE 장치로 성장된 에피층으로서 1초간 3회 반복 성장시켜 본 결과인데 두께의 균일도가 좋지 않음을 알 수 있으며, (b)는 수정 후의 LPE 장치로 성장된 에피층으로 1초간 3회 왕복성장시킨 결과인데 (a)에 비해 두께 균일도가 향상되었음을 보여준다. 이러한 결과는 원주 방향의 온도 불균일도의 향상에 의해 성장층의 균일도가 좋아진 것으로 생각된다. 그러나 수십 회의 실험결과 성장된 MQW층의 재현성이 어느 정도 향상되었으나, 성장층의 두께가 200~400Å 정도로 두꺼우며 이보다 더 얇은 성장층을 얻기 힘들다는 사실을 알 수 있었다. 그 이유는 수직형 LPE 장치는 구조적으로 성장시 성장용액을 담은 용액 홈이 회전하게 되어서 성장용액의 불안정성에 의한 것으로 생각된다.

위와 같은 성장결과는 수직형 LPE 장치가 가지는 구조적인 문제점으로 볼 수가 있다. 그 이유는 수직형 LPE 장치는 구조적으로 성장시 성장용액을 담은 용액 홈이 회전하게 되어 있다 그래서 성장시 성장용액의 회전에 의해 rolling현상 등으로 얇고 재



(a) 수정 전 LPE 장치(그림 2.1)에 의한 성장결과      (b) 수정 후 LPE 장치(그림 2.3)에 의한 성장결과

그림 3.1 각 LPE 장치의 성장결과

현상 있는 성장이 어려운 것이다. 따라서 새로운 구조의 흑연보트 제작이 불가피하였다. 성장용액이 회전하는 구조가 아니라 성장용액의 안정성을 확보하기 위해 기판이 회전하는 구조의 흑연보트 제작을 해야함을 알 수 있다.

### 3.2 흑연보트에 따른 성장특성

앞장에서 언급하였듯이 LPE방법에 의한 결정성장에 있어서 흑연보트는 그 구조나 형태에 따라 성장의 좋고 나쁨을 결정하는 가장 중요한 요인으로 작용한다.

일반적으로 수직형 LPE 장치의 흑연보트는 성장용액이 회전하는 구조로 그림 2.1과 같이 두 부분으로 구성되어 있다. 성장용액이 회전하는 흑연보트는 성장 시간이 긴 경우에는 문제가 되지 않으나 MQW과 같이 성장 시간이 짧은 경우에는 성장용액의 굴림(rolling)으로 인하여 성장용액의 평형상태가 깨어진다. 따라서 성장속도가 불규칙적이면서, 마치 끝머리 과도성장(edge overgrowth)과 마찬가지로 성장률이 증가하여 얇고 재현성 있는 결과를 얻기 어렵다.

따라서 그림 2.2과 같이 3부분으로 이루어진 기판이 회전하는 구조의 흑연보트를 제작하였다. 이러한 흑연보트 구조에 따른 성장특성을 알아보기 위하여 그림 3.1의 (b)와 같은 성장조건으로 성장을 행하여, 각층의 center와 edge 두 부분으로 나누어 성장된 평균두께와 편차를 조사한 결과를 표3.1에 나타내었는데, 그림 2.1(수정 전)의 흑연보트를 사용한 실험은 200회 이상을 실험한 데이터이며, 그림 2.2(수정 후)의 흑연보트를 사용한 실험은 80회 이상을 실험한 데이터이다. 성장 두께의 평균값과 표준편차를 정리하여 표 3.1에 나타내었다.

본 연구에서는 성장용액이 회전하여 성장용액의 과포화 상태가 달라지며, 성장용액이 rolling 함으로서 대류현상과 흡사한 현상을 가지게 되어 edge overgrowth 현상이 두드러지게 나타나는 것으로 생각된다. 그림 2.1의 흑연보트의 경우 성장층간의 두께 편차가 아주 크고 성장층의 평균두께도 두꺼우며, 나중에 성장된 층일수록 평균두께가 감소함을 알 수 있다. 이러한 현상은 성장용액의 rolling에 의해 평형상태가 깨어져 초기 과포화도가 크게 되어 처음 성장된 층이 나중에 성장된 경우에 비해 두껍게 성장되기 때문으로 추정할 수 있다.

반면 그림 2.2의 흑연보트를 사용한 경우 각 층의 균일도 뿐만 아니라 성장층의 평균두께 역시 상당히 감소하여 그림 2.1의 흑연보트를 사용한 경우보다 평균두께는 1/2, 두께 편차는 1/3이상 줄어들었음을 확인하였다. 또한 최소 성장 두께로 성장된 MQW층을 그림 3.2에 나타내었다.

또한 LPE로 MQW층의 성장이 어느 정도까지 가능한지를 확인하기 위하여 성장온도 590℃, 냉각속도 0.4/min로 하여 성장해 본 결과를 그림 4.5에 나타내었다.



〈표 3.1〉 MQW층의 평균두께 및 표준편차

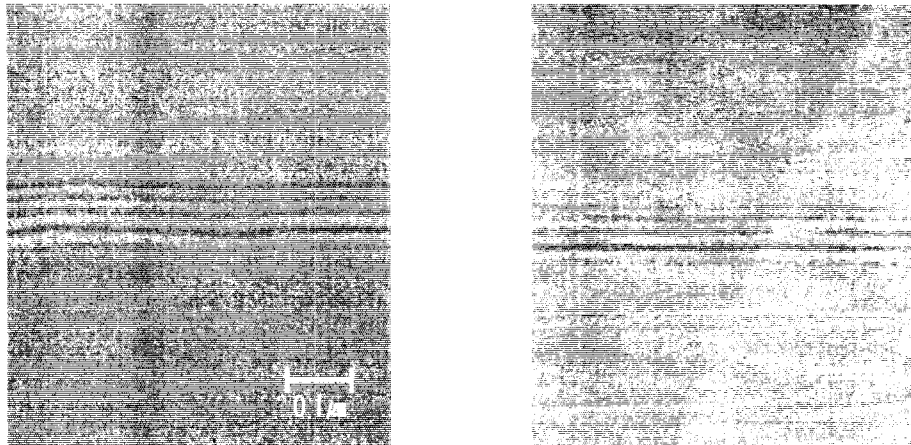
성장층	지 점	edge		center	
		평 균	표준편차	평 균	표준편차
first layer		455	155	348	110
second layer		354	120	343	113
third layer		284	98	282	82

(a) 그림 2.2의 흑연보트 사용(단위 Å)

성장층	지 점	edge		center	
		평 균	표준편차	평 균	표준편차
first layer		189	44	180	39
second layer		159	28	153	27
third layer		143	27	141	27

(b) 그림 2.2의 흑연보트 사용(단위 Å)

그림 (a)는 1.3 $\mu\text{m}$  InGaAsP/InP층을 성장한 결과로서 성장층의 두께가 약 40~60Å이며 성장된 각 층의 재현성과 계면특성이 아주 뛰어남을 알 수 있다. 그리고 그림 (b)는 1.1 $\mu\text{m}$  발진파장을 가지는 InGaAsP층을 성장한 SEM 단면사진으로 성장된 InGaAsP층의 두께가 약 40~60Å 정도로 나타났다. 이러한 실험결과는 현재까지 알려진 바에 의하면, LPE 장치로 성장이 가능한 계면특성이 InGaAsP/InGaAs의 경우 90Å이며 InGaAsP/InGaAsP의 경우 100Å이하로 성장이 거의 불가능하다고 알려져 있는 기존의 실험결과를 능가하는 것이라 할 수 있다.



(a) 1.3 $\mu\text{m}$  InGaAsP/InP MQW layer의 성장결과 (b) 1.1 $\mu\text{m}$  InGaAsP/InP MQW layer의 성장결과

그림 3.2 수정된 흑연보트에 의한 성장결과(성장온도 : 590 $^{\circ}\text{C}$ )

## 4. MQW Buried RWG LD 최적화 설계

### 4.1 MQW B-RWG LD의 모델링

RWG LD는 weakly index-guide LD 형태로서 BH 구조와 같은 strongly index-guide LD처럼 활성층 자체가 불연속성을 가지는 것과는 달리, 굴절률차는 없지만 도파모드에 의해 ridge 영역과 ridge 외부 영역에 유효굴절률차를 만들 수 있다. RWG LD에서의 유효굴절률차는 활성(active)층 및 클래드(clad)층의 두께에 따라 민감하게 변화하며, 그 크기에 따라 RWG LD는 gain-guide 혹은 강하지는 않지만 weakly index-guide로 동작하게 된다<sup>8)</sup>.

이러한 weakly index-guide LD는 횡도파 모드에 관련된 필드에 대해 폭방향으로 다른 환경을 도입한 것으로, 이와 같은 원리를 이용한 여러 구조의 LD가 발표되었다<sup>9)</sup>. 그림 5.1에 weakly index-guide LD 구조의 대표적인 예인 RWG LD를 나타내었다. RWG LD는 한번의 에피성장으로 사진식각 공정을 통해 ridge 구조를 만든 것이다. 이러한 weakly index-guide LD 중 RWG LD가 현재 널리 사용되고 있으며, 1회의 에피 성장으로 저전류 고효율의 LD를 제작할 수 있다는 이점이 있으나, 그림에서 알 수 있듯이 ridge 폭을  $3\mu\text{m}$ 이하로 할 경우 사진식각 공정 후 전극증착이 어렵기 때문에  $3\mu\text{m}$  이하의 RWG LD 제작이 어려우며, 제작을 하더라도 제작된 LD의 수율(yield)이 낮기 때문에 통상  $4\sim 5\mu\text{m}$  정도의 ridge 폭을 가지는 RWG LD를 제작하고 있는 실정이다<sup>10)</sup>. 그래서 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위해 그림 4.2와 같은 구조를 가진 B-RWG LD를 제안하고자 한다. 그림 4.2에서 알 수 있듯이  $3\mu\text{m}$ 이하의 ridge shape 형성 후 1회의 재성장으로 저전류 고효율 LD제작이 가능하다는 이점이 있다. 또한 B-RWG LD는 유효굴절률의 측방향차를 성장된 에피층의 두께로 조절이 가능하기 때문에 RWG LD보다 단일모드로 동작 할 수 있는 ridge 폭을 조절할 수 있어 고효율로 동작하는 LD제작이 가능하다. 그래서 본 연구에서는 LD를 제작하기 이전에 최적화 설계를 하여 여러 파라메타를 추출하고 단일모드 동작, 저전류 동작, 고효율로 동작하는 MQW B-RWG LD를 설계하고자 한다.

그림 4.2와 같은 구조의 이론 해석을 정확하게 하기란 매우 어려운 일이다. 그 이유는 도파로층 구조가 복잡하여 하나 하나의 층에 대한 모드 분포를 구하는 일이 상당히 번거로운 일이며, 활성층이 MQW으로 이루어져 있을 때 이것에 대한 모드해석 또한 힘들다. 따라서 이론 해석을 간단히 하기 위해서 그림 4.2의 구조를 그림 4.3처럼 간단한 형태로 모델링시켰다<sup>11)</sup>.

그림 4.4는 전류차단층의 두께와 선택식각층의 두께 변화에 따른 유효굴절률의 측방향차를 구하기 위해 활성층과 도파로층의 두께를 각각  $0.1\mu\text{m}$ 로 고정하여 계산하였다.

활성층이 InGaAs/InGaAsP(1.25 $\mu$ m)인 경우이다. 계산된 결과를 보면 클래드층의 두께가 얇을수록 선택식각층의 두께가 두꺼울수록, 굴절률차가 크게 남을 알 수 있다. 이와 같이 MQW B-RWG LD의 경우 유효굴절률의 측방향차를  $d_2$ ,  $d_3$ 층의 두께로 적절히 조절할 수 있음을 알 수 있다. 그러므로 MQW RWG LD보다 측방향에서 단일모드로 동작 및 고출력으로 동작하는 LD를 제작할 수 있는 이점이 있음을 확인하였다.

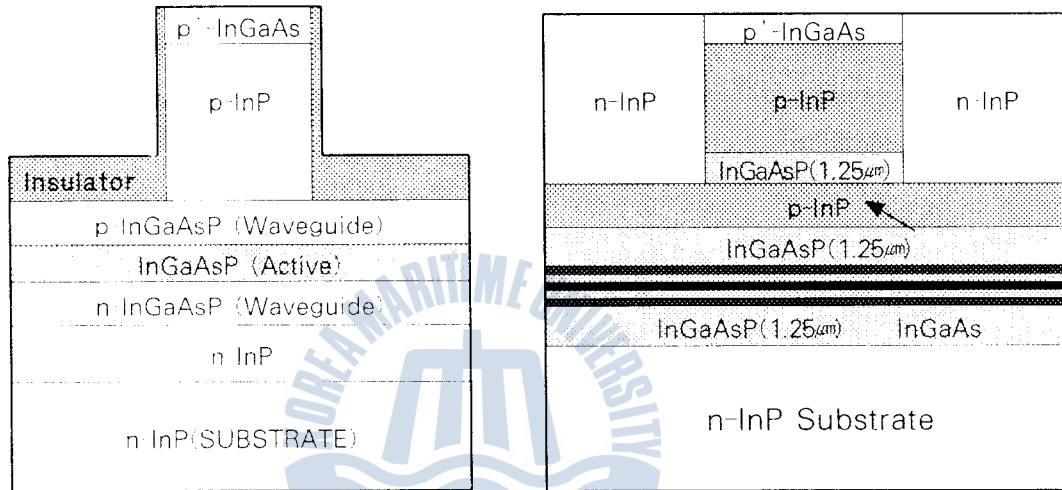


그림 4.1 Ridge Waveguide LD의 구조

그림 4.2 Buried Ridge Waveguide LD의 구조

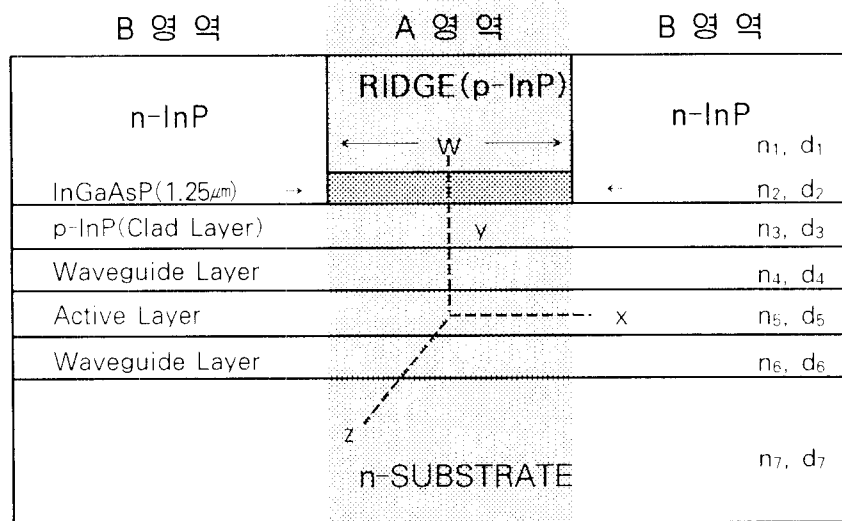


그림 4.3 Buried Ridge Waveguide LD의 이론해석을 위한 모델링

이러한 결과로부터 성장층 두께 변화에 따라 그림 4.3의 A영역 및 B영역에서의 전파정수 즉, 등가굴절률이 변화하게 되고, 상대적으로 굴절률이 큰 A영역(ridge영역)이 B영역의 등가굴절률보다 큰 폭으로 증가하게 되므로 측방향에서의 등가굴절률차는 증가하게 된다. 따라서 도파모드는 A영역에서는 InP층으로 퍼지게되며, B영역에서는 A영역보다 굴절률이 적기 때문에 더 많이 퍼지게 된다

## 4.2 측방향 단일모드 발진조건

그림 4.5에 단일모드로 동작하기 위한 유효굴절률의 측방향차에 따른 ridge 폭의 최대값을 나타내었다. 이 그림으로부터 유효굴절률의 측방향차가 크면 클수록 단일모드로 발진하기 위한 ridge 폭이 감소함을 알 수 있다. 그리고 선폭퍼짐계수  $\alpha$  값은 유효굴절률의 측방향차가 작을 경우에는 큰 영향을 미치나, 유효굴절률의 측방향차가 큰 영역에서는 그 영향이 감소함을 알 수 있다. 그림 4.5의 결과로부터 유효굴절률의 측방향차를 적절히 조절한다면 6~9 $\mu\text{m}$ 의 ridge 폭을 가지면서 단일모드로 동작하는 LD 제작이 가능함을 알 수 있다.

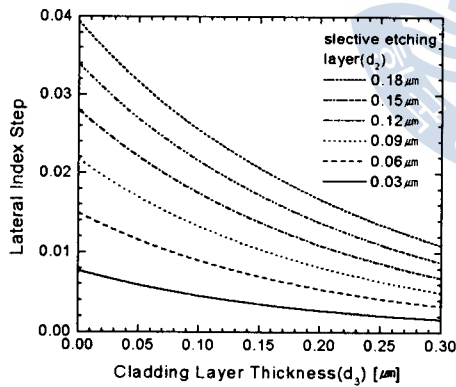


그림 4.4 클래드층 두께에 따른 유효굴절률의 측방향차

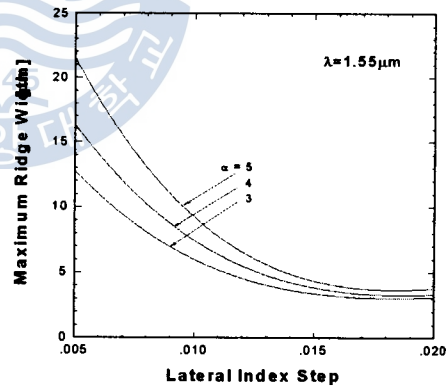


그림 4.5 측방향에서 단일모드로 발진하기 위한 ridge층의 최대폭

## 5. MQW B-RWG LD 제작 및 특성평가

본 장에서는 앞 장에서 최적화 설계된 값을 이용하여 원차층 두께 정도의 조정이 가능한 CBE장치로<sup>[11],[12]</sup> InGaAs/InGaAsP MQW DH 웨이퍼를 성장하였다. 성장된 웨이퍼에 사진식각 공정을 통해 stripe를 형성하고 화학 에칭으로 ridge 모양을 형성하였

다. 그리고 재성장 모양이 다른 성장 방법에 비해 우수한 LPE방법을 통해 전류 차단층을 형성하였다. 재성장애 사용한 LPE 장치는 본 연구의 2장에서 언급한 개선된 수직형 LPE 장치로서 2차 및 3차 재성장으로 B-RWG LD를 제작하여 그 특성을 비교 분석하였다.

### 5.1 CBE에 의한 InGaAs/InGaAsP MQW DH 웨이퍼 성장

4장의 최적화 설계 결과에 따르면 추방향 굴절률차를 적절히 조절함으로써 6~9 $\mu\text{m}$ 의 ridge 폭을 가지며 단일모드로 동작하는 LD제작이 가능함을 확인하였다. 그래서 본 연구에서는 ridge 폭이 5 $\mu\text{m}$ 와 7 $\mu\text{m}$ 인 MQW B-RWG LD를 제작하고자 한다. ridge 폭이 5 $\mu\text{m}$ 인 경우는 7 $\mu\text{m}$ 로 설계한 값에 포함되게 때문에, 7 $\mu\text{m}$ 의 ridge 폭에 맞추어 최적화 설계하였다.

4.4의 결과를 바탕으로 MQW B-RWG LD의 웨이퍼 구조를 최적화 설계하였다. 17 $\mu\text{m}$ 에서  $d$ 층인 p-InP 층두께를 0.15 $\mu\text{m}$ 로 한 경우, 추방향 굴절률차분은 0.01로 하기 위해서는  $d$ 층인 InGaAsP(1.5 $\mu\text{m}$ )층을 100 $\text{\AA}$ 으로 해야한다. 그리고 활성층의 두께와 도파로층의 두께는 각각 0.1 $\mu\text{m}$ 로 유지 설계했으므로 하였다. 활성층은 InGaAs(well)/InGaAsP(1.5 $\mu\text{m}$  barrier)층을 각각 70 $\text{\AA}$ , 100 $\text{\AA}$ 으로 하였으며, InGaAs층은 70 $\text{\AA}$ 으로 한 이유는 InGaAs층을 70 $\text{\AA}$ 으로 하면 양자사이즈 효과(Quantum Size Effect)에<sup>14)</sup> 의해 발진파장이 1.55 $\mu\text{m}$ 가 되기 때문이다. 그리고  $d_1$ 층인 p-InP층을 1.2 $\mu\text{m}$ 로 하였으며, 오버 레이어층인 p-InGaAsP(1.3 $\mu\text{m}$ )층을 0.2 $\mu\text{m}$ 로 하였다.  $d_1$ 층인 p-InP층,  $d_2$ 층인 InGaAsP,  $d_3$ 층인 p-InP의 도핑농도는 각각  $7 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 로 하였으며, p-InGaAsP(1.3 $\mu\text{m}$ )층의 도핑농도는  $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 로 하였다. 도파로층 및 활성층은 도핑을 하지 않았다.

이렇게 최적화 설계된 값을 CBE 장치를 이용하여 성장하였다. 성장온도 500 $^{\circ}\text{C}$ 에서 17rpm으로 성장하였으며, AsH<sub>3</sub>, PH<sub>3</sub>와 같은 가스와 Triethyl Gallium[Ga(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>3</sub>]라 또는 Trimethyl Indium[In(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>]과 같은 금속유기물과의 화학반응을 이용하여 GaAs나 InAs 또는 InP와 InGaAsP와 같은 합금을 생성하고 성장시킬 수 있다. 또한 dopant로 n형은 solid Si를 사용하였으며, p형은 solid Be를 사용하였다.

성장된 에피 웨이퍼의 SEM 단면사진을 그림 5.1에 나타내었다. SEM 단면사진을 통해 성장층의 두께가 최적화 설계값으로 성장되었음을 알 수 있다.

### 5.2 LPE에 의한 재성장 및 MQW B-RWG LD 제작

그림 5.1과 같이 성장된 웨이퍼를 사진 식각공정을 통해 5 $\mu\text{m}$ 와 7 $\mu\text{m}$ 의 stripe 폭을 가지는 SiN<sub>x</sub> 마스크를 형성한 후 p-InGaAsP층은 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> : H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> : H<sub>2</sub>O를 3 : 1 : 1의 용



액으로 30초간 에칭하였으며, p-InP층은 HCl : H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>를 1 : 4의 용액으로 3분간 에칭하였다. 그리고 1.25 $\mu$ m InGaAsP층은 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> : H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> : H<sub>2</sub>O를 3 : 1 : 1의 용액으로 30초간 에칭하였다. 에칭된 웨이퍼의 SEM단면사진을 그림 5.2에 나타내었으며, ridge 폭이 7 $\mu$ m인 SEM 단면사진을 보여주고 있다.

이와 같이 형성된 웨이퍼로 LPE를 이용하여 2차 재성장 및 3차 재성장에 의해 MQW B-RWG LD를 제작하여 보았다.

2차 재성장에 의해 제작된 LD의 SEM 단면사진을 그림 5.3에 나타내었다.

그림 5.2와 같이 에칭된 웨이퍼에서 그림 5.2의 2차 재성장으로 LD를 제작하는 경우와 달리 3차 재성장시 n-InP 표면의 열손상을 방지하기 위해 p-InP층과 p-InGaAs층을 성장하였다. n-InP층의 도핑농도는  $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ , p-InP층과 p-InGaAs의 도핑농도는  $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 이며, p형 dopant는 Zn/In alloy를 사용하였다.

재성장된 웨이퍼에서 SiN<sub>x</sub> 마스크를 제거하고, p-InGaAs층과 p<sup>+</sup>-InGaAsP층을 에칭하고 난 후 3차 재성장을 하였다. 3차 재성장을 위한 온도프로그램을 그림 6.10에 나타내었으며, p-InP의 도핑농도는  $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 로 하였으며, 오믹 접촉을 위한 p<sup>+</sup>-InGaAs의 도핑농도는  $2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 로 하였다.

이와 같은 방법으로 제작된 LD의 SEM 단면사진을 그림 5.4에 나타내었다. 그리고 이후 제작된 LD의 특성을 명확히 비교하기 위해 그림 5.3과 같이 2차 재성장으로 제작된 LD를 A형이라고 하고, 그림 5.4와 같이 3차 재성장으로 제작된 LD를 B형이라고 한다.

### 5.3 MQW B-RWG LD의 전기·광학적 특성

본 절에서는 본 논문에서 설계하고 제작한 MQW B-RWG LD의 I-V특성, 발진개시 전류, 발진파장 및 광학적 특성을 측정하여 MQW B-RWG LD의 설계 결과와 제작된 LD의 특성을 비교 분석하고, 이로부터 성장된 에피층과 성장장치의 특성을 평가하고자 한다.

제작된 MQW B-RWG LD의 전기적 특성을 대표하는 I-V특성을 그림 5.5에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 순방향 임계전압이 A형 LD의 경우 1.1V였고, 역방향 항복전압은 -5.2V로 나타났으며, B형 LD의 경우 순방향 임계전압이 0.85V였고, 역방향 항복전압은 -4.8V로 나타났다. 그리고 직렬저항이 각각 6 $\Omega$ 과 2 $\Omega$ 으로 나타났다. 이는 통상의 LD의 직렬저항인 1~5 $\Omega$ 과 같거나 비슷한 값으로 A형의 직렬저항이 B형의 직렬저항보다 다소 높은 이유는 B형에 형성된 오믹 접촉층은 p<sup>+</sup>-InGaAs층으로 고농도 ( $\geq 2 \times 10^{19} \text{cm}^{-1}$ ) 도핑이 가능한 반면 A형 LD의 오믹 접촉층은 p<sup>+</sup>-InGaAsP층으로 고농도 ( $\geq 2 \times 10^{19} \text{cm}^{-1}$ ) 도핑에 어려움이 있기 때문이다.



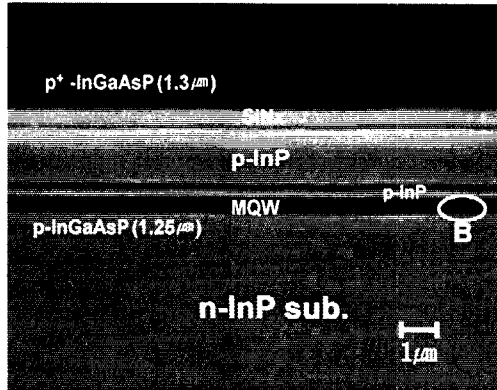


그림 5.1 CBE에 의해 성장된 에피웨이퍼의 SEM 면사진

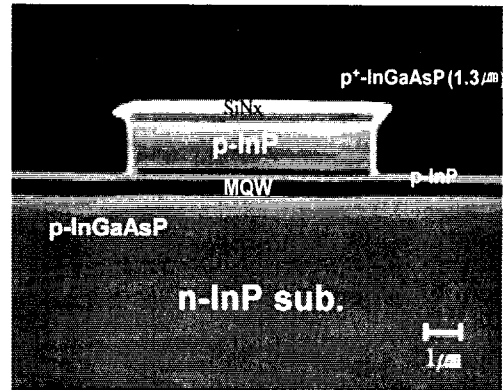


그림 5.2 화학 에칭에 의한 ridge 형성

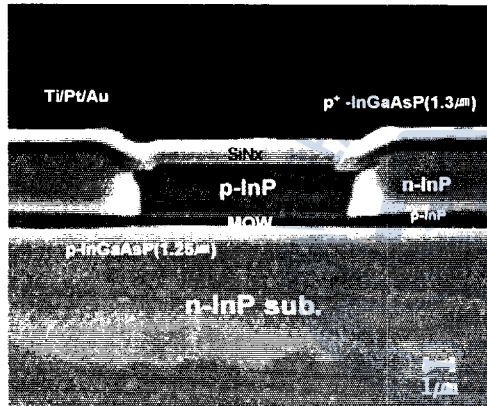


그림 5.3 2차 재성장에 의해 제작된 LD의 SEM 단면사진 A 형

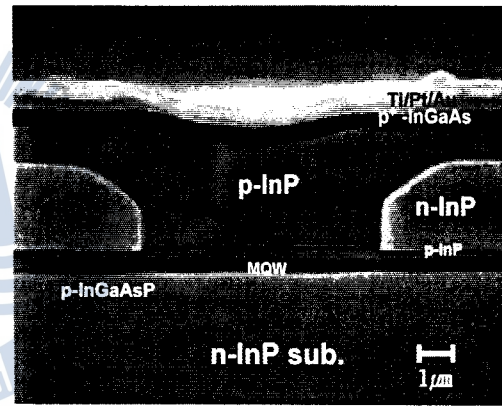


그림 5.4차 재성장 에 의해 제작된 LD의 SEM 단면사진 B 형

그림 5.6에 측정된 내부양자효율 및 내부손실을 나타내고 있다. 먼저 A형 LD의 특성을 보면, ridge 폭이  $5\mu\text{m}$ ,  $7\mu\text{m}$ 인 경우 내부양자효율이 각각 63%와 71%이고, 내부손실은 각각  $23\text{cm}^{-1}$ 과  $21\text{cm}^{-1}$ 로 나타났다. 그리고 B형 LD의 경우 ridge 폭이  $5\mu\text{m}$ ,  $7\mu\text{m}$ 인 경우 내부양자효율이 각각 73%와 83%이고, 내부손실은 각각  $19\text{cm}^{-1}$ 과  $20\text{cm}^{-1}$ 로 나타났다. 이와 같이 B형의 경우가 A형의 경우보다 내부양자효율이 우수한 것으로 보아 캐리어의 주입효율이 2차 재성장의 경우보다 우수함을 알 수 있다.

그림 5.7과 같이 주입전류를 증가시키면서 광 출력을 측정해 보았다. 공진기 길이는  $900\mu\text{m}$ , ridge 폭이  $7\mu\text{m}$ 인 LD를 사용하였다. 그림에서 B형 LD의 경우 70mW까지 선형적으로 증가하고 80mW에서 포화됨을 알 수 있으며, A형의 경우 50mW까지 선형적으로 증가하다가 광 출력 증가율이 감소하면서 80mW에서 포화됨을 알 수 있다. 이와 같이 주입전류에 대한 광 출력이 A형의 경우 보다 B형이 우수한 것으로 보아 B형에

형성된 전류차단층이 A형에 형성된 전류차단층보다 전류차단 효과가 뛰어나음을 알 수 있다. 또한 제작된 MQW B-RWG LD가 설계결과와 같이 높은 광출력으로 동작함을 확인하였다.

그림 5.8에 온도에 따른  $I_{th}$ 의 변화를 나타내었다. 제작된 LD의 제작공정과 ridge 폭에 따른 특성온도  $T_0$ 값을 나타내었다. 그림에서 각 점들은 실험결과이고 실선은  $T_0$ 를 계산한 이론 곡선이다. 먼저 2차 재성장층에 의해 제작된 LD의 경우를 보면, ridge 폭이  $5\mu\text{m}$ ,  $7\mu\text{m}$ 인 경우  $T_0$ 이 각각 53K와 40K로 나타났다. 그리고 3차 재성장층으로 제작된 LD의 경우  $T_0$ 이 각각 48K와 43K로 나타났다. 제작된 LD의 온도 특성은 제작공정에 관계없이 비슷한 값을 가짐을 알 수 있으며,  $50^\circ\text{C}$  이상에서는 급격한 온도변화가 나타남을 알 수 있다.

본 논문 4장의 최적화 설계 결과를 이용하여 제작한 MQW B-RWG LD가 측방향으로 단일모드로 동작하는지를 확인하기 위해 LD의 far field pattern을 측정하여 보았다.

그림 5.9에 제작된 MQW B-RWG LD의 수평방향 far field pattern을 나타내었다. 그림 (a)는 2차 재성장층으로 제작된 LD이고, (b)는 3차 재성장층으로 제작된 LD이다. ridge 폭이  $7\mu\text{m}$ 일 때, 주입전류를  $2.4I_{th}$ 까지 인가하면서 측정한 결과, 단일 모드로 동작함을 확인하였다.

그리고 수직방향의 far field pattern을 측정한 결과를 그림 5.10에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 ridge 폭이  $7\mu\text{m}$  일 때는  $2.4I_{th}$ 까지 단일모드로 동작함을 확인할 수 있다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 최적 설계하고 제작한 MQW B-RWG LD가 설계결과와 같이 측방향에서 단일모드로 동작함을 확인하였다.

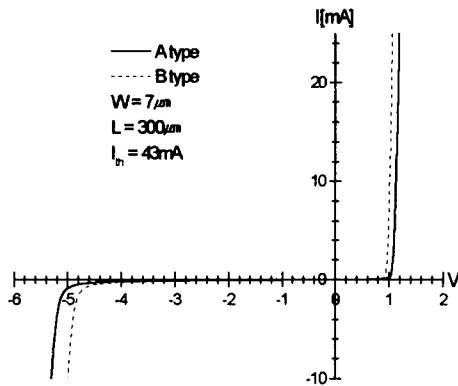


그림 5.5 MQW B-RWG LD의 I-V특성

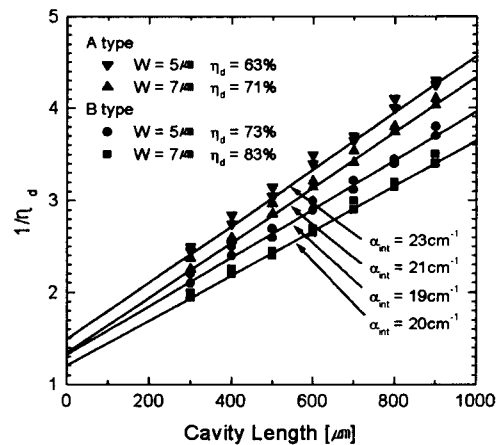


그림 5.6 공진기 길이에 따른 외부양자효율 역수의 변화

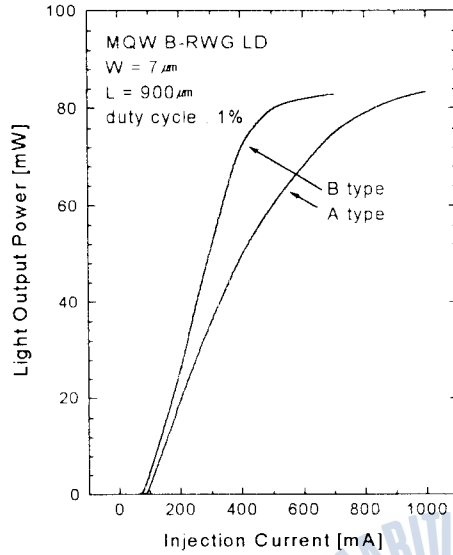


그림 5.7 MQW B-RWG LD의 광 출력 특성

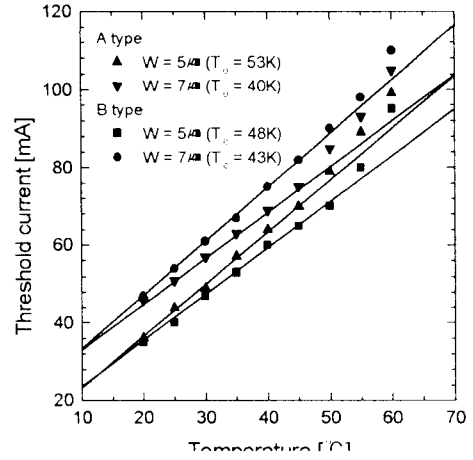


그림 5.8 온도에 따른 I<sub>th</sub> 변화

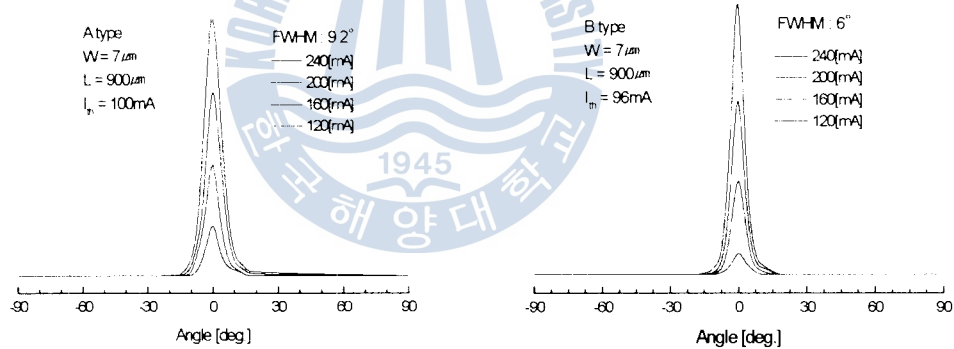


그림 5.9 MQW B-RWG LD의 수평방향 far field pattern

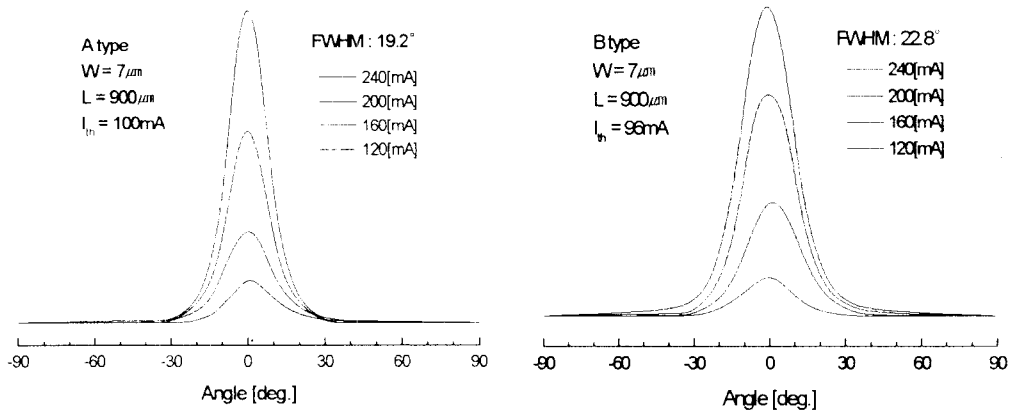


그림 5.10 MQW B-RWG LD의 수직방향 far field pattern

## 6. 결 론

본 연구에서는 InGaAsP/InP의 재현성 있고 균일한 결정성장을 위하여 기존의 수직형 LPE장치를 수정 보완함으로써 상용의 LPE장치에 버금가는 온도안정성과 시스템 안정성을 구축하였다.

그리고 수정 보완된 수직형 LPE장치의 특성을 조사해보기 위해 가장 간단한 구조인 전면전극형 bulk-LD를 제작하여 전기, 광학적 특성을 측정해본 결과 상용화되어 있는 LPE 시스템에서 제작한 LD와 비견할 만한 값을 얻었다.

개선된 수직형 LPE장치로 재현성 있고 균일한 MQW층을 성장시키기가 어려웠다. 그 원인은 일반적인 수직형 LPE장치가 가지고 있는 구조적인 문제점 즉 MQW층 성장시 성장용액의 움직임으로 인해 발생하는 성장용액의 불안정성 때문이었으며, 이러한 문제를 해결하기 위해 성장용액은 정지한 상태에서 기판이 움직이는 새로운 구조의 흑연보트를 설계 제작하였다. 수정된 흑연보트로 성장을 행하여 본 결과 성장두께와 두께편차가 매우 감소함을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 저전류 및 고출력으로 동작하는 RWG LD 보다 ridge 폭의 제어가 쉬우며 Planar 화에 유리하며 측방향 굴절률차를 성장층의 두께로 조절이 가능한 B-RWG LD를 제안하였다. 또한 InGaAsP/InP MQW B-RWG LD를 제작하기 앞서 이론해석으로부터 측방향 유효굴절률차를 적절히 조절한다면 6~9 $\mu\text{m}$ 의 ridge 폭을 가지며 단일모드로 동작하는 LD제작이 가능함을 알 수 있다.

이와 같이 최적화 설계된 값을 이용하여 CBE를 이용하여 InGaAs/InGaAsP MQW DH 웨이퍼를 성장하였다. 성장된 웨이퍼를 사진식각 공정을 통해 stripe를 형성하고 화학 에칭으로 ridge 모양을 형성하였다. 그리고 재성장 모양이 다른 성장 방법에 비해 우수한 LPE방법을 통해 2차 및 3차 재성장을 통하여 B-RWG LD를 제작하고 그 특성을 비교 분석한 결과, 제작된 MQW B-RWG LD가 ridge 폭 7 $\mu\text{m}$ 에서도 측방향 단일모드로 동작함을 확인하였다. 그리고 2차 재성장에 의해 제작된 LD보다 3차 재성장으로 제작된 LD의 특성이 우수하다는 것을 확인하였으며, 본 연구에서 수정 제작한 수직형 LPE 장치로 재성장을 하여도 고성능 소자를 제작할 수 있음을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- 1] 오종환, 조호성, 홍창희, “III-V 화합물 반도체 단결정 성장을 위한 수직형 LPE장치의 제작”, *한국물리학회지 응용물리*, vol 3, pp. 188~193, 1989.
- 2] H. Nakamura, S. Tsuji, A. Ohishi, M. Hirao, H. Kakibiyahhi and H. Matsumura,

Gallium Arsenide and Related compounds, Bristol, U. K. : Adam Hilger, p. 169, 1985.

- 3] H. Nagai, Y. Noguchi and T. Matsuoka, "Thermal deformation of surface corrugations on InGaAsP crystals," *J. Crystal Growth* vol. 71, pp. 225~231, 1985.
- 4] Y. Iraya, Y. Suematsu, S. Katayama, K. Kishino and S. Arai, "Low threshold current density (100) GaInAsP double heterostructure lasers for wavelength 1.3  $\mu\text{m}$ ," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 18, pp. 1795~1805, 1979.
- 5] Y. Sasai, N. Hase and T. Kajiwar, "A 1.3 $\mu\text{m}$  InGaAsP/InP multiquantum well laser grown by LPE," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 24, pp. 2137~2139, 1985.
- 6] N. K. Dutta, S. G. Naphotz, R. L. Brown, T. M. Shen, N. A. Olsen and D. C. Craft, "Fabrication and performance characteristics of InGaAsP multiquantum well double channel planar buried heterostructure lasers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 46, pp. 19~21, 1985.
- 7] L. W. Cook, M. Feng, M. M. Tashima, R. J. Blattner and G. E. Stillman "Interface grading in InGaAsP liquid phase epitaxial heterostructures" *Appl. Phys. Lett.* vol. 37, no. 2, pp. 173~175, 1980.
- 8] G. H. B. Thompson, *Physics of Semiconductor Laser Devices*, New York : Wiley, ch. 6, 1980.
- 9] K. Aiki, M. Nakumara, T. Kuroda and J. Umeda, "Channeled substrated planar structure (AlGa)As injection lasers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 30, pp. 649~651, 1977.
- 10] 하홍춘, 오수환, 이석정, 박윤호, 오종환, 홍창희 "InGaAsP/InP RWG MQW LD의 최적 설계" *한국광학회지*, 제 7권 4호, pp. 375~385, 1996.
- 11] J. K. Butler, "Theory of transverse cavity mode selection in homojunction and heterojunction semiconductor laser," *J. Appl. Phys.*, vol. 42, pp. 4447~4457, 1971.
- 12] W. T. Tsang, "Progress in Chemical Beam Epitaxy," *J. Crystal Growth*, vol. 105, pp. 1~29, 1990.
- 13] W. T. Tsang, R. Kapre and P. F. Sciortino, Jr., "In-situ dry etching of InP using phosphorus trichloride and regrowth inside a chemical beam epitaxial growth chamber," *J. Crystal Growth*, vol. 136, pp. 42~49, 1994.





Gallium Arsenide and Related compounds, Bristol, U. K. : Adam Hilger, p. 169, 1985.

- 3] H. Nagai, Y. Noguchi and T. Matsuoka, "Thermal deformation of surface corrugations on InGaAsP crystals," *J. Crystal Growth* vol. 71, pp. 225~231, 1985.
- 4] Y. Iraya, Y. Suematsu, S. Katyama, K. Kishino and S. Arai, "Low threshold current density (100) GaInAsP double heterostructure lasers for wavelength 1.3  $\mu\text{m}$ ," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 18, pp. 1795~1805, 1979.
- 5] Y. Sasai, N. Hase and T. Kajiwar, "A 1.3 $\mu\text{m}$  InGaAsP/InP multiquantum well laser grown by LPE," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 24, pp. 2137~2139, 1985.
- 6] N. K. Dutta, S. G. Naphotz, R. L. Brown, T. M. Shen, N. A. Olsen and D. C. Craft, "Fabrication and performance characteristics of InGaAsP multiquantum well double channel planar buried heterostructure lasers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 46, pp. 19~21, 1985.
- 7] L. W. Cook, M. Feng, M. M. Tashima, R. J. Blattner and G. E. Stillman "Interface grading in InGaAsP liquid phase epitaxial heterostructures" *Appl. Phys. Lett.* vol. 37, no. 2, pp. 173~175, 1980.
- 8] G. H. B. Thompson, *Physics of Semiconductor Laser Devices*, New York : Wiley, ch. 6, 1980.
- 9] K. Aiki, M. Nakumara, T. Kuroda and J. Umeda, "Channeled substrated planar structure (AlGa)As injection lasers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 30, pp. 649~651, 1977.
- 10] 하홍춘, 오수환, 이석정, 박윤호, 오종환, 홍창희 "InGaAsP/InP RWG MQW LD의 최적 설계" *한국광학회지*, 제 7권 4호, pp. 375~385, 1996.
- 11] J. K. Butler, "Theory of transverse cavity mode selection in homojunction and heterojunction semiconductor laser," *J. Appl. Phys.*, vol. 42, pp. 4447~4457, 1971.
- 12] W. T. Tsang, "Progress in Chemical Beam Epitaxy," *J. Crystal Growth*, vol. 105, pp. 1~29, 1990.
- 13] W. T. Tsang, R. Kapre and P. F. Sciortino, Jr., "In-situ dry etching of InP using phosphorus trichloride and regrowth inside a chemical beam epitaxial growth chamber," *J. Crystal Growth*, vol. 136, pp. 42~49, 1994.

