

## 수직형 LPE장치를 이용한 InGaAsP/InP RWG(Ridge Waveguide) MQW-LD제작

박윤호 · 오수환 · 하홍춘 · 안세경 · 이석정 · 홍창희

한국해양대학교 전자통신공학과

조 호 성

전자통신연구소 화합물반도체 연구부

(1996년 1월 18일 받음)

본 연구에서는 RWG(Ridge waveguided) MQW-LD가 weakly index-guided LD로 동작하기 위한 최적 설계조건으로부터, 수직형 LPE장치를 사용하여 RWG MQW-LD를 제작하였다. 먼저 수회의 실험을 통해 MQW-DH 웨이퍼 성장조건과 QW층의 두께를 200Å 정도로 제어할 수 있는 성장조건을 확립하였다. 이와 같이 성장된 MQW-DH 웨이퍼를 photolithography 공정을 통해 폭이 4 μm인 ridge 패턴을 형성시켜 RWG MQW-LD를 제작하였으며, 전기광학적 특성을 조사한 결과  $I=2.7 I_{th}$  이상에서도 측방향 단일모드 동작함을 알 수 있었다.

### I. 서 론

LD는 광이 도파되는 메카니즘에 의해 다음과 같이 크게 3가지로 분류될 수 있는데[1,2,3], 첫째로는 활성층의 상하 및 좌우에 에너지 갭이 큰 재료로 둘러 싸여 캐리어 및 광이 활성층으로 가두어지는 구조로 BH (Buried Heterostructure) 형태를 들 수 있다. 이와 같이 활성층 구조 자체에 굴절율의 불연속성을 가지는 구조의 LD는 도파메카니즘에 의해 strongly index-guided LD로 분류된다. 둘째로는 접합면의 평행한 방향에 대해 활성층 자체가 굴절율의 불연속성을 가지지 않으나 횡방향 도파모드에 의해 굴절율차가 생기는 LD를 weakly index-guided LD라 한다. 마지막으로 굴절율차에 의해 광이 도파되는 것이 아니라 주입된 캐리어에 의해 발생되는 이득에 의해 도파되는 LD를 gain-guided LD라고 하며, 일반적으로 스트라이프(stripe)형 LD가 이 범주에 속한다.

도파메카니즘에 따라 장단점이 있지만, 제작하는 측면에 있어서 strongly index-guided LD는 에칭된 mesa에 재성장을 해야 하는 정교한 제작기술과 복잡한 공정이 필요하기 때문에 소규모의 대학 실험실에서의 제작이

여의치 않다. 반면, RWG 구조와 같은 weakly index-guided LD의 경우에 있어서 재성장을 할 필요 없이 한번의 성장에 의해 저전류로 동작하는 LD를 제작할 수 있다는 이점을 가지고 있다. 그래서 본 연구에서는 본 연구실에서 직접 제작한 수직형 LPE장치를 이용하여 에피층을 성장하였으며, LPE성장시 문제가 되는 성장층의 두께 제어문제는 수회의 실험을 통해서 InGaAsP 및 InP의 성장 두께를 조사하였으며, QW성장시 두께제어에 문제가 되는 초기 과포화도를 줄여줌으로서 QW층 두께를 200Å 정도로 제어할 수 있는 최적의 성장조건을 확립하였다. 이러한 성장조건을 확립함으로써 최적화 설계된 각 layer를 LPE 장치로 성장 할 수 있었으며, 성장된 MQW-DH 웨이퍼를 이용하여 ridge 폭이 4 μm인 RWG MQW-LD를 제작하여 전기 광학적 특성을 조사한 결과  $I=2.7 I_{th}$  이상에서도 측방향 단일모드로 동작하는 아주 양호한 LD가 제작되었음을 알 수 있었다. 본 논문의 구성은 2장에서는 RWG MQW-LD 제작에 관해서 기술하였으며, 3장에서는 전기 광학적 특성에 관해서 약속하였으며, 4장에서는 연구결과를 기술하였다.

### II. RWG MQW-LD 제작

#### 2.1 MQW DH 웨이퍼 성장

일반적으로 III-V족 화합물 반도체를 성장시키는 방

\*이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

법으로는 LPE(Liquid Phase Epitaxy), VPE(Vapor Phase Epitaxy), MBE(Molecular Beam Epitaxy), MOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 등이 있다. LPE장치의 경우 양질의 에피층을 확보할 수 있고, 또한 장치가 다른 것에 비해 간단하기 때문에 1963년 Nelson씨가 처음으로 제시한 후, III-V족 화합물 반도체의 결정성장에 가장 널리 사용되어져 왔다. 그러나 100 Å 이하의 두께제어가 요구되는 MQW를 LPE로 성장시키기 위해서는 성장률을 개선하는 것이 최대의 관건이 되었다<sup>[4]</sup>. 그러나 LPE의 경우에 있어서 InGaAsP/InP MQW 결정성장에 대한 연구는 다른 성장장치에 비해 미진한 실정에 있다<sup>[5]</sup>.

그런데, 본 실험실에서는 자체제작한 수직형 LPE장

치를 이용하여 MQW박막성장에 관한 연구를 수행하여 왔으며 이미 100Å 정도의 박막성장까지도 가능성을 밝힌바가 있다<sup>[6]</sup>. 이 연구에서는 상기 기술을 이용하여 제작이 비교적 간편한 것으로 알려져 있는 RWG LD의 제작을 시도해 보았다.

한편, 현재 본 실험실 리소그래피 장비로 제작가능한 4 μm의 ridge폭에서도 단일모드로 동작할 수 있도록 RWG구조를 아래 표 1과 같이 설계하였다<sup>[7]</sup>. 이때 측 방향 유효굴절률차는 약 0.015이며, 이 값은 RWG LD가 weakly index-guided LD로 동작하기 위한 유효굴절률차 범위내에 들어간다<sup>[7]</sup>. 본 연구에서는 이와 같이 설계된 각 층의 두께를 본 연구실에서 제작한 수직형 LPE장치를 이용하여 활성층 및 클래드층의 두께제어가 가능한지 조사하여 보았으며, 수회의 반복 실험을 통하여 최적의 성장조건을 확립하였다. 그 결과를 그림 1에 나타내었다. 그림 1(a)는 각각의 냉각속도(cooling rate)에 대해서 성장시간에 따른 성장두께의 변화이다. 이 그림으로부터 냉각속도가 0.3°C/min(0.4°C/min)일 경우에 InGaAsP의 성장속도는 약 0.11 μm/min(0.15 μm/min), 그리고 InP의 성장속도는 약 0.057 μm/min(0.075 μm/min) 정도로 다른 데이터에<sup>[4]</sup>에 비해 상당히 적게 나타났는데. 이는 2상 용액법에 의한 것도 있지만 성장용액 차체의 과포화도가 상당히 낮아 거의 균일냉각방법에 가깝기 때문인 것으로 생각된다. 위와 같은 성장속도의 조사결과 클래드층인 d<sub>2</sub>층의 두께인 0.25 μm는 냉각속도를 0.4°C/min로 할 경우 약 2분정도 성장시키면 된다는 것을 알 수 있었

표 1. 설계 파라메타 값

층	두께(μm)	굴절률	층구조
d <sub>1</sub>	x  ≤ w/2	2.0	p-InP
	x  > w/2	0.3	SiNx
d <sub>2</sub> (=d <sub>4</sub> )	0.25	3.33	p-1.1 μm InGaAsP
d <sub>3</sub>	0.12	3.52	well 1.3 μm InGaAsP
		3.33	barrier 1.1 μm InGaAsP
		3.52	well 1.3 μm InGaAsP
		3.22	barrier InP
d <sub>5</sub>	≫10	3.22	n-InP

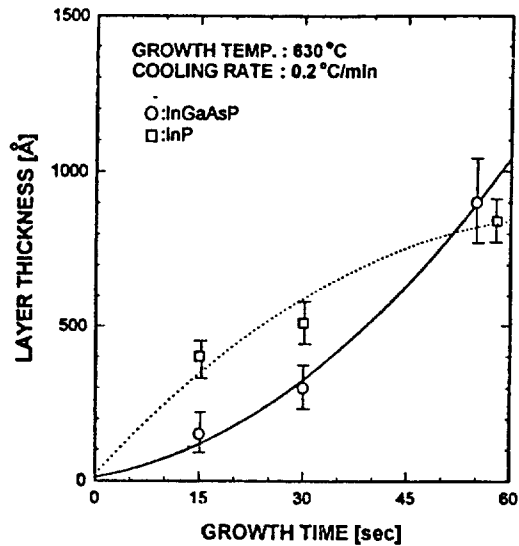
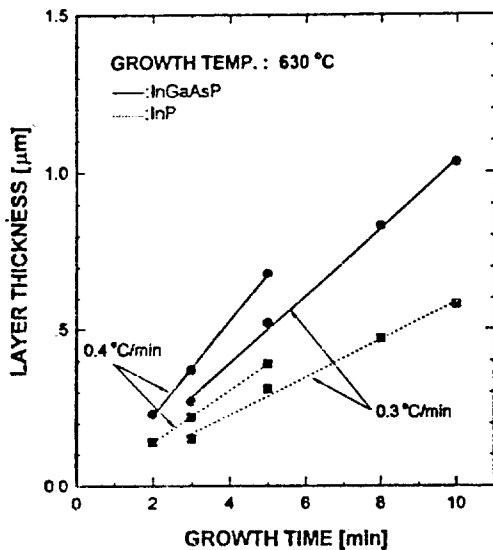


그림 1. InGaAsP 및 InP의 성장속도

으며, d1층인 n-InP층은 약 25분 이상 성장시키면 2  $\mu\text{m}$  이상의 성장층을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

활성층인 d<sub>3</sub>층의 성장두께를 제어하기 위해서 그림 1(b)와 같은 성장율을 조사하여 보았다. 그림 1(b)는 냉각속도를 0.2  $\mu\text{m}/\text{min}$ 으로 하여 InP와 InGaAsP층을 여러 번 반복 성장시켰을 때, 초기 과포화도가 거의 없는 상태에서의 성장두께를 나타내었다. 그림에서 점선은 InP의 성장두께를 나타내며, 실선은 InGaAsP의 성장두께를 나타낸다. 이 그림으로부터 0.2 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 냉각속도에서 성장시간이 15초일 때, InP층의 성장두께는 약 300  $\mu\text{m}$  정도이며, InGaAsP의 경우 약 100  $\mu\text{m}$  정도임을 알 수 있다. 이러한 사실은 성장 시간이 짧아지게 되면 InP의 경우가 InGaAsP의 경우에 비해 성장속도가 빨라져서 성장시간이 긴 경우 그림 1(a)와는 반대현상을 보여주는 것이라 할 수 있다. 따라서 성장시간을 이보다 훨씬 짧게 하거나 냉각속도를 줄여 준다면 양자효과가 일어날 수 있는 100~200 $\text{\AA}$  정도의 두께를 얻을 수 있음을 추정할 수 있다.

LPE에서 2상 용액법으로 성장을 할 경우 초기성장속도는 성장직전의 열적경로(thermal history), 그리고 항상 고체상태로 존재하는 InP seed가 성장용액의 과포화도를 줄여 주는 역할을 하기 때문에 냉각속도와 초기 과포화도에 의해 결정된다. 초기 성장속도는 InP의 경우는 냉각속도에만 의존하지만 InGaAsP의 경우는 용액의 과포화도와 냉각속도에 의존하기 때문에 초기과포화도를 줄여주고 냉각속도를 느리게하여 준다면 초기성장속도를 상당히 낮출 수 있다. 그래서 성장시간을 각 1초로 하여 냉각속도에 따른 성장속도를 조사하였다. 그림

2에서 (a)는 냉각속도가 0.1 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , (b)는 0.6 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 으로 하여 InP와 InGaAsP를 각각 1초씩 성장시킨 MQW층의 단면사진이다. 이 그림에서 밝은 부분은 InP층이며 어두운 층은 InGaAsP층을 나타낸다.

두 그림에서 알 수 있듯이 냉각속도에 따라 성장층의 두께차이가 거의 없고 MQW층이 올라 갈수록 얇아지는 것으로 보아 초기 과포화도에 의해 이와 같은 결과가 나온 것으로 판단된다. 그래서 초기 과포화도를 줄여주기 위해 수회의 실험을 통해 최적의 조건을 확립하였다.

이와 같이 재조정된 조건하에서 냉각속도를 0.4  $\mu\text{m}/\text{min}$ 으로하고 처음의 3층은 각각 1초씩, 그리고 나머지 2층은 각각 2초씩 성장시킨 MQW층의 단면사진을 그림 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 1:2이므로 well층인 InGaAsP 두께는 약 200 $\text{\AA}$ , barrier층의 InP 두께는 약 400 $\text{\AA}$  정도임을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 본 실험실의 LPE장치로도 MQW층 성장이 아주 양호하게 됨을 확인할 수 있었다. 이와 같은 실험결과 0.12  $\mu\text{m}$ 의 활성층 두께를 제어하기 위해서는 barrier층을 InP가 아닌 1.11  $\mu\text{m}$  InGaAsP를 사용해야 한다는 것을 알 수 있었다. barrier층인 1.1  $\mu\text{m}$  InGaAsP과 well층인 1.3  $\mu\text{m}$  InGaAsP층을 3회 성장시킨다면 0.12  $\mu\text{m}$ 의 활성층을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

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

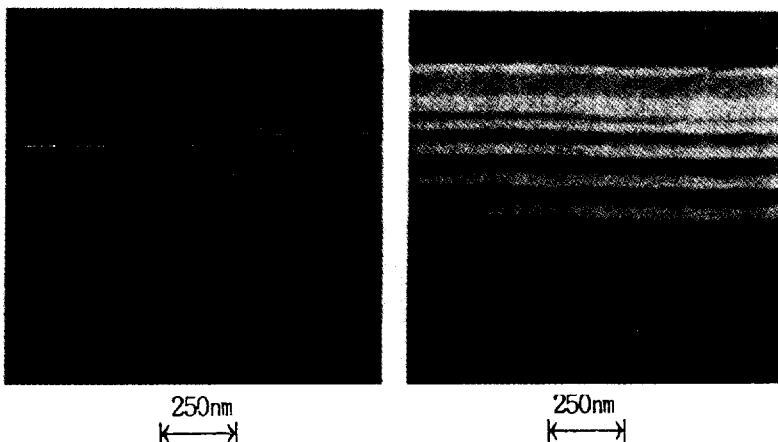


그림 2. 성장된 MQW웨이퍼의 SEM단면사진  
(a) 냉각속도 : 0.1 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  (b) 냉각속도 : 0.6 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$

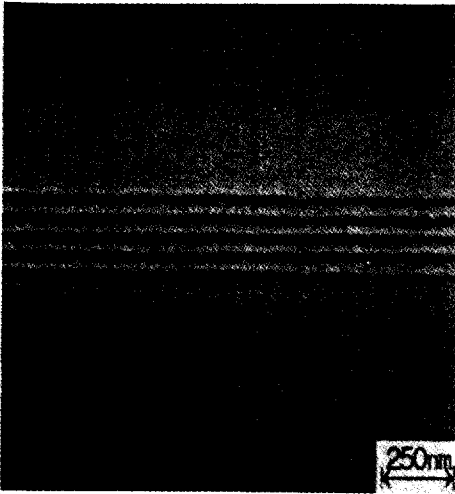


그림 3. 성장된 MQW 웨이퍼의 SEM단면사진II

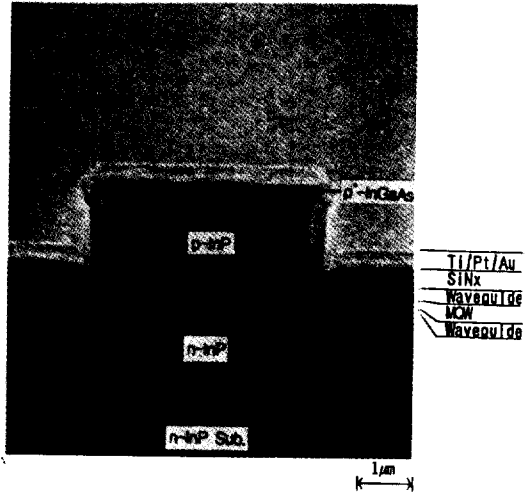


그림 5. 제작된 RWG MQW-LD의 단면사진

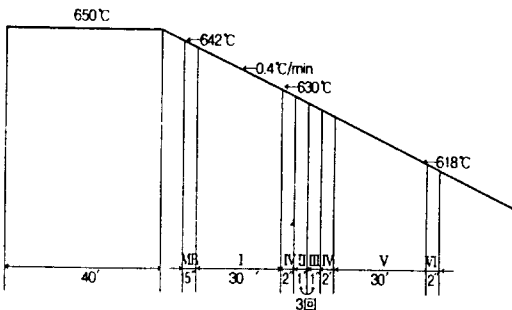


그림 4. MQW-LD웨이퍼 성장을 위한 온도프로그램  
 M.B : meltback I : n-InP II : InGaAsP(1.3 µm)  
 III : InGaAsP(1.1 µm) IV : InGaAsP(1.1 µm) V :  
 p-InP VI : p<sup>-</sup>-InGaAs

위해 여러번의 실험을 통해서 얻어진 최적의 결과들이다.

## 2.2 RWG MQW-LD 제작

성장된 MQW-DH 웨이퍼를 사용하여 RWG MQW-LD를 제작하기 위하여 우선적으로 웨이퍼 표면의 In-drop을 mercuric chloride : dimethylformamide = 100 gram : 472.5 ml 용액으로 제거한 후<sup>[8]</sup> SiNx 절연막을 PECVD를 이용하여 300°C에서 RF 전력 50W로 약 2000Å 정도 형성시켰다.

Ridge 패턴을 형성시키기 위하여 photolithography 공정을 하였는데, 사용된 PR은 AZ-5214E로서 positive PR이다. Photolithography 공정을 하기 전에 먼저 SiNx가 증착된 표면의 수분을 제거하기 위하여 dehydration bake를 140°C에서 30분간 행하였다.

그리고 SiNx가 증착된 DH웨이퍼와 PR의 부착력을 높이기 위하여 primer로 4500 rpm으로 30초 동안 spin coating하였다. PR의 잔류 solvent 제거를 위하여 soft baking은 hot plate를 사용하여 100°C에서 1분간 행하였다. Aligner는 Karl Suss제품을 사용하였으며, 4 µm 스트라이프 패턴으로 3초간 exposure 하였다.

AZ-500MIF developer로 developing한 후 hot plate에서 120°C로 1분간 hard bake하였다. SiNx etching은 6 : 1 BOE에서 45초간 행하여 에칭된 패턴을 관찰한 후 PR remover로 PR을 제거하였으며, 이 때 표면의 particle이나 불순물 등에 의해서 scum이 형성되는 경우가 있기 때문에 차후 공정에 영향을 끼칠 수 있다. 따라서 descum을 위해 plasma ashing을 행하였는데 RF전력은 30W로 하고, chamber는 250 m torr를 유지하도록 하여 O<sub>2</sub>를 50 sccm 흘리면서 1분간 ashing하였다.

그리고 난 후 RIE(reactive ion etching)로 p<sup>-</sup>-InGaAs와 p-InP를 부분적으로 에칭하였으며, 다시 15 HCl + 85H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>로 나머지 p-InP를 에칭시켰다.

이러한 절차로 ridge를 형성시켰고, ridge 영역에만 전류가 흐르도록 하기 위해 다시 photolithography 공정을 행한 후, 웨이퍼의 p측 전극으로 Ti(300Å)/Pt(200Å)/Au(4000Å)을 E-beam증착기로 증착시켰다. 여기서 Ti는 웨이퍼와의 접착력을 높이기 위하여 사용되며, Pt는 Ti의 out diffusion을 막고 Au나 solder와 반응하여 용융되는 것을 막아주는 barrier 금속이다<sup>[9]</sup>.

이렇게 형성된 p측 전극은 RTA(rapid thermal annealing)장치에서 425°C로 30초간 열처리하였으며, 이 때 사용된 분위기 가스는 10% H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>이다.

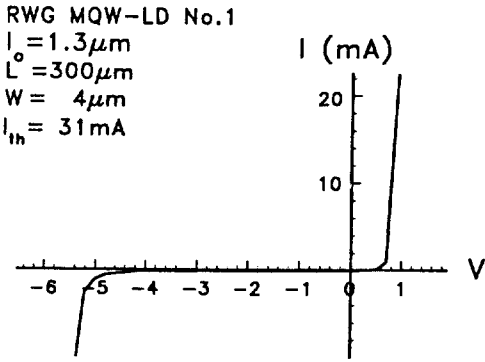


그림 6. RWG MQW-LD의 I-V특성

다음으로는 Fabry-Perot 공진기의 거울면의 형성을 용이하게 하기 위하여 웨이퍼의 뒷면을  $100\mu\text{m}$  두께가 되도록 lapping하였다. Lapping machine은 LOGITECH 제품으로서  $3\mu\text{m}$  Alumina를 사용하여 lapping하였으며, 두께 편차는  $\pm 2\mu\text{m}$  이내로 아주 좋은 특성을 보였다.

n층 전극은  $\text{Cr}(500\text{\AA})/\text{Au}(5000\text{\AA})$ 을 E-beam 증착기를 사용하여 증착시켰으며,  $400^\circ\text{C}$ 에서 30초간 열처리하여 모든 공정을 완료하였다.

이와 같이 제작된 RWG MQW-LD의 단면사진을 그림 5에 나타내었다. 이 그림으로부터 MQW층의 두께는 약  $0.12\sim 0.15\mu\text{m}$ , 그리고 클래드층 두께는 약  $0.2\sim 0.25\mu\text{m}$  정도임을 알 수 있다. 그리고 제작된 ridge 폭은 약 4

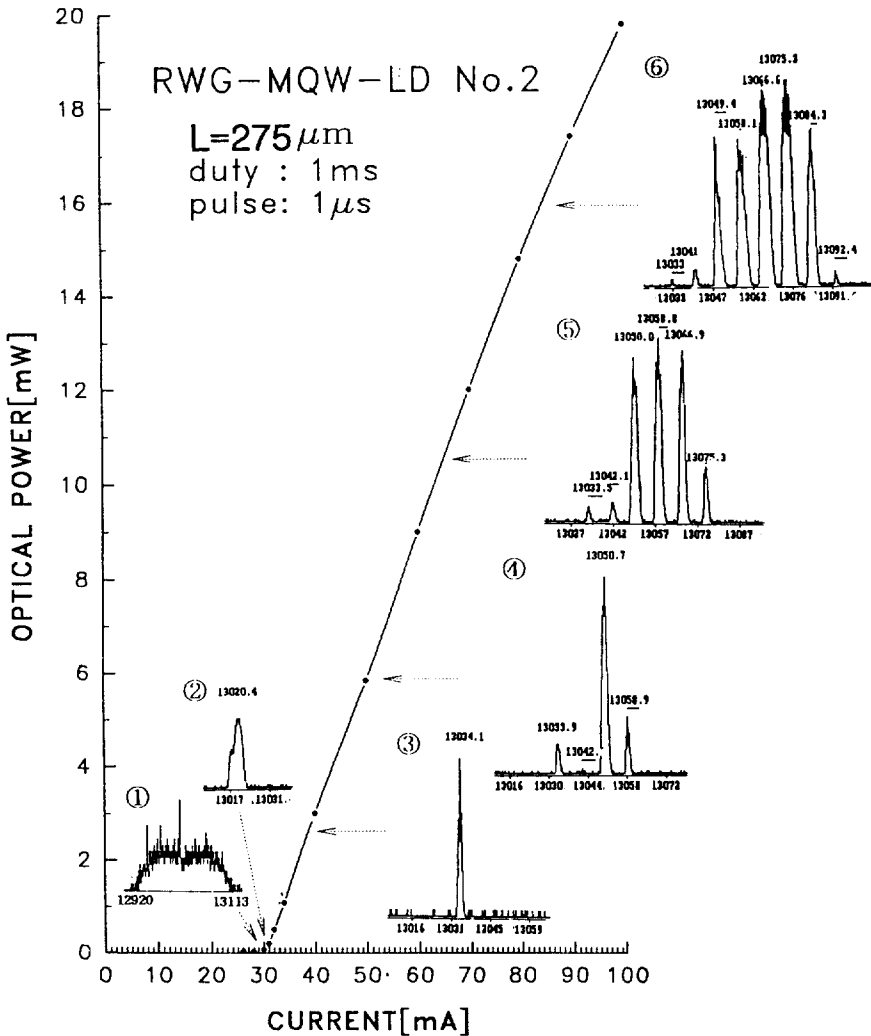


그림 7. RWG MQW-LD I-L특성 및 스펙트럼

$\mu\text{m}$ 이다. 따라서 설계 조건대로 RWG MQW-LD가 제작되었음을 알 수 있다.

### III. RWG MQW-LD의 전기 광학적 특성

제작된 RWG MQW-LD의 전기적 특성을 대표하는 I-V특성을 그림 6에 나타내었다. 그림에서  $I_{th}$  수 있듯이 순방향 cut-in voltage는 0.75V였고, 역방향 항복전압은 5V정도였다. 이는 일반적인 1.3  $\mu\text{m}$  InGaAsP/InP DH-LD의 특성과 거의 차이가 없다는 것을 나타낸다. 직렬 저항은 약 10 $\Omega$ 정도로 나타났으며 이는 통상의 LD의 직렬저항인 1~5 $\Omega$ 보다 다소 큰 값이다. 이는 금속성장 공정 개선이 이루어지면 해결될 수 있을 것으로 생각된다.

한편 LD의 발진파장특성을 조사에는 자체 제작한 전류펄스 구동장치와 초점거리 27 cm인 Jarrel-Ash사의 분광기를 사용하였다. 그림 9는 InGaAsP/InP RWG MQW-LD의 I-L특성 및 주입전류에 의한 스펙트럼 특성을 나타내고 있다. 주울열에 의한 온도상승을 배제하기 위해 펄스폭이 0.1%로 하여 발진실험을 행하였으며, 상온에서 측정하였다. 그림 7에 나타나 있는 것과 같이 발진 임계전류( $I_{th}$ )는 31 mA( $L=275 \mu\text{m}$ )이다. 문헌 [7]에 의하면 동일 제작조건에 기대할 수 있는 임계전류 값은 25 mA 정도이다. 설계값보다는 다소 높은 임계전류값이 얻어졌지만 이는 불순물 조정, 산화막제조 등 제작공정을 개선 해나가면 충분히 설계값에 접근시킬 수 있을 것으로 생각된다.

그림 7의 ①은 30 mA에서 측정된 것으로 약 15 $\text{\AA}$  정도의 분해능을 가지는 250  $\mu\text{m}$ 슬릿을 사용하여 측정된 결과이며, 스펙트럼영역이 12920~13113 $\text{\AA}$ 정도로 나타났으며, 자연방출을 하고 있음을 알 수 있다. ②는 임계전류인 31 mA에서 측정된 것으로 약 3 $\text{\AA}$  정도의 분해능을 가지는 50  $\mu\text{m}$ 슬릿을 사용하여 측정된 것으로서 중심파장이 13020.4 $\text{\AA}$ 으로 단일모드로 발진함을 알 수 있다. 그리고 ③부터는 분해능이 약 1 $\text{\AA}$ 정도인 25  $\mu\text{m}$ 슬릿을 사용하여 측정하였다. ③은 약 38 mA의 전류를 인가하여 측정된 것으로 중심파장이 13034.1 $\text{\AA}$ 으로 나타났으며 ①의 발진모드와 비교해 볼때 약 14 $\text{\AA}$ 정도 발진모드 도약 현상을 관측할 수 있었다. ④는 50 mA의 전류를 인가하여 측정된 그림으로 스펙트럼영역이 13033~13058.9  $\text{\AA}$ 이며, 4개의 발진모드를 가지고 다중종모드로 발진함을 알 수 있다. ⑤는 65 mA의 전류를 인가하여 측정된 그림으로 스펙트럼 영역이 13033~13075.3 $\text{\AA}$ 으로 6개의 발진모드를 가지고 다중종모드 발진함을 알 수 있다.

⑥은 85 mA의 전류를 인가하여 측정된 그림으로 스펙트럼영역이 13033~13092.4 $\text{\AA}$ 으로 8개의 발진모드를 가지고 있음을 알 수 있으며 발진모드의 스펙트럼 영역이 위의 모든 발진모드의 스펙트럼영역을 포함하고 있음을 알 수 있다.

벌크형 LD에서는 복수형 종모드 발진을 하는 것이 일반적인데 반해서 이 연구에 제작된 LD는 그림에서 알 수 있듯이 1.3  $I_{th}$ 이상까지도 단일 종모드로 동작하고 있다. 이는 MQW특성이 나타나고 있음을 암시하고 있는 결과이다. 한편, 2.7  $I_{th}$  이상의 고주입영역에 있어서도 측방모드가 보이지 않은 것으로 보아, 2.7  $I_{th}$  이상에서도 측방향으로 단일모드로 동작하는 아주 양호한 LD가 제작되었음을 알 수 있다.

### IV. 결 론

본 연구에서는 본 실험실에서 갖추고 있는 수직형 LPE장치를 이용하여 최적화 설계된 RWG MQW-LD를 제작하였다.

LPE성장시 성장층의 두께제어가 어렵다는 특징이 있으나 수회의 성장을 통하여 InGaAsP 및 InP의 성장물을 조사하여 QW층의 성장이 가능하도록 하였으며, 그리고 MQW층 성장시 초기과포화도에 의해 성장초기의 QW층 두께제어가 어려운 특징을 가지고 있으나 수회의 실험을 통하여 초기 과포화도를 줄여줌으로서 약 200 $\text{\AA}$  정도의 QW층의 두께제어가 가능하였다. 이러한 성장조건을 확립함으로써 최적화 설계된 각 layer의 두께를 LPE장치로 제어할 수 있게 되었다. LPE장치로 각 층의 성장결과 QW층을 200 $\text{\AA}$  정도까지 제어가 가능하였으며, 활성층인 MQW층의 두께는 0.12~0.15  $\mu\text{m}$ 이며, 클래드층의 두께는 0.2~0.25  $\mu\text{m}$ 로서 설계파라메타 값과 거의 차이가 없이 성장되었음을 알 수 있었다.

이렇게 성장된 MQW-DH웨이퍼를 photolithography공정을 통하여 RWG MQW-LD를 제작하였으며 제작된 RWG MQW-LD의 전기 광학적 특성을 조사하였다. 그 결과 순방향 cut-in voltage가 0.75V, 역방향 항복전압이 5V정도로 일반적인 LD와 차이가 없다. 그리고 직렬저항은 약 10 $\Omega$ 정도로 나타났으며 이는 통상의 LD의 직렬저항인 1~5 $\Omega$ 보다 다소 큰 값이다. 이는 금속성장공정 개선이 이루어지면 해결될 수 있을 것으로 생각된다.

그리고 제작된 LD의 발진 임계전류( $I_{th}$ )가 31 mA( $L=275 \mu\text{m}$ )로 나타났다. 이 값은 설계 값보다는 다소 높은 임계전류값이 얻어졌지만 이는 불순물 조정, 산화막제조 등 제작공정을 개선 해나가면 충분히 설계 값에 접근시킬

수 있을 것으로 생각된다.

마지막으로 발진 스펙트럼을 조사한 결과, 벌크형 LD에서는 복수형 종모드 발진을 하는 것이 일반적이는데 반해서 이 연구에 제작된 LD는 그림에서 알 수 있듯이  $1.3 I_{th}$  이상까지도 단일 종모드로 동작하고 있다. 이는 MQW특성이 나타나고 있음을 암시하고 있는 결과이다. 그리고  $2.7 I_{th}$  이상의 고주입영역에 있어서도 측방향으로 보이지 않은 것으로 보아,  $2.7 I_{th}$  이상에서도 측방향으로 단일모드로 동작하는 아주 양호한 LD가 제작되었음을 알 수 있다.

### 참 고 문 헌

[1] M. C. Amann, New stripe-geometry laser with simplified fabrication process, *Electron. Lett.*, **15**, pp. 441-442, 1979.  
 [2] I. P. Kaminow, R. E. Nahory, L. W. Stulz, and J. C. Dewinter, Performance of an improved InGaAsP ridge waveguide laser at  $1.3 \mu$ , *Electron. Lett.*, **17**, pp. 318-320, 1981.  
 [3] J. K. Butler, Theory of transverse cavity mode selection in homojunction and heterojunction semi-

conductor laser, *J. Appl. Phys.*, **42**, pp. 4447-4457, 1971.  
 [4] V. N. Lutsikii Quantum size effect-present state and perspectives of experimental investigations, *Phys. State Solidi(a)*, **1**, pp. 199-220, 1970.  
 [5] M. I. Elinson, V. A. Volkov, V. N. Lutsikii and T. N. Pinsker, Quantum size effect and perspectives of its practical application, *Thin Solid Films*, **12**, pp. 383-397, 1972.  
 [6] 조호성, 황상구, 배정철, 홍창희, 김재창, 오종환 수직형 LPE장치에 의한 InGaAsP( $1.3 \mu\text{m}$ )/InP MQW 단결정 성장에 관한 연구 한국물리학회 논문지, **6(2)**, pp. 151-156, 1993.  
 [7] 하홍춘, 박윤희, 오수환, 오종환, 홍창희, InGaAsP/InP RWG MQW-LD의 저전류 동작을 위한 최적화 설계 대한전자공학회 한국통신학회 부산·경남지부 추계 합동학술발표회 논문집, pp. 48-54, 1995.  
 [8] W. Y. Lum and A. R. Clawson, Thermal degradation of InP and its control in LPE growth, *J. Appl. Phys.*, **50**, pp. 5296-5301, 1979.  
 [9] A. K. Sinha and J. M. Poate, Metal-compound semiconductor reactions, *Thin Films-Inter-Diffusion and Reaction*, John Wiley & Sons, 1978.

### The fabrication of InGaAsP/InP RWG(Ridge Waveguide) MQW-LD by the vertical LPE system

Yoon-Ho Park, Su-Hwan Oh, Hong-Tchoon Ha, Se-Kyung An,  
 Seok-Jeong Lee, Tchang-Hee Hong

*Department of Electronic Communication Engineering, Korea Maritime University,  
 Pusan, 606-791, Korea*

Ho-Seong Cho

*Compound Semiconductor Division, ETRI, Taejon 303-606, Korea*

(Received: January 18, 1996)

RWG MQW-LD has been made with our vertical LPE system from the optimal design condition for the RWG MQW-LD to be activated as weakly index-guided LD. Through several experiments we have established the growth condition which can be used through to grow the MQW-DH wafer and to control the thickness of MQW layer to  $\sim 200\text{\AA}$ .  $4 \mu\text{m}$ -thickness of the ridge pattern has been formed through the photolithographic process on the MQW-DH wafer grown by the former condition, and then we have fabricated the RWG MQW-LD using it. From the result of measuring the electro-optical characteristics we can make sure that it can be lasing as laterally single mode at even more than  $2.7 I_{th}$ .