

LPE(Liquid phase Epitaxy)방법으로 제작된 InGaAs/InP Ridge Waveguide Multiple Quantum Well Laser Diode의 광학적 특성조사

오수환 · 하홍춘 · 박윤희 · 안세경 · 이석정 · 홍창희

한국해양대학교 전자통신공학과

(1996년 4월 29일 받음)

본 연구에서는 수직형 LPE방법으로 제작된 InGaAsP/InP RWG(Ridge Waveguide) MQW(Multiple Quantum Well)-LD(Laser diode)의 광학적 특성을 조사하여 제작된 LD의 특성과 설계결과를 비교 분석하였다. 광학적 특성 분석결과 제작된 LD가 설계된 대로 측방향 단일모드로 동작하였으며, 내부양자효율(η)은 77%, 내부손실(α_{int})은 18 cm^{-1} , 발진파장의 온도특성은 $5.5 \text{ \AA}/\text{C}$ 로 나타났다. 이러한 결과들로부터 수직형 LPE방법으로 성장된 에피층의 특성과 MQW의 계면특성이 아주 양호하다는 것을 알 수 있었으며, 제작된 RWG MQW-LD의 특성도 양호함을 알 수 있었다.

I. 서 론

최근 MQW(Multiple Quantum Well)-LD(Laser diode)는 고미분이득(differential gain), 저임계전류 및 저 chirping의 특성을 가지고 있음으로 해서 초고속 광통신 시스템의 광원으로 각광을 받고 있다. 이러한 MQW-LD의 제작에 있어서는 지금까지 주로 MOCVD나 MBE방법으로 결정을 성장시켜 왔으며 현재 이방법으로 성능이 좋은 LD들을 제작하고 있다. 그러나 이와 같은 장비들은 고가이며, 유독가스를 사용하는등 취급상 위험성이 뒤따른다. 따라서, 본연구실에서는 제작비용이 비교적 저렴한 수직형 LPE장비를 자체제작하여 부수되는 제반실험을 행하여 왔다.^[1,2] 그리고 최근에는 수직형 LPE장치를 이용하여 RWG(Ridge waveguide) 구조와 같이 한번의 재성장으로 weakly index-guided로 동작하는 LD를 제작한 바도 있다.^[4]

본 연구에서는 본 연구실에서 설계제작한 RWG MQW-LD의 발진개시전류, 발진파장 및 광학적특성을 측정하여 MQW-LD의 설계결과와 제작된 LD의 특성을 비교 분석하고, 이로부터 성장된 에피층과 성장장치의 특성을 평가하고자하였다. 상기특성들을 측정된 결과 제작된 LD가 설계된 대로 weakly index guided로 동작함을 확인할 수있었으며, 내부손실과 외부양자효율

특성이 각각 $\alpha_{int}=18 \text{ cm}^{-1}$, $\eta=77\%$ 로 나타났다. 그리고 발진파장의 온도특성을 조사한 결과 $5.5 \text{ \AA}/\text{C}$ 로 상용의 LD와 같은 값을 가짐을 알 수 있었다.

본 논문의 II장에서는 I-L특성조사를 통해 RWG MQW-LD의 각종파라미터를 추출하고 설계결과와 비교 분석하였으며, III장에서는 발진스펙트럼을 조사하였으며, 마지막으로 IV장에서는 측정결과들을 요약하였다.

II. RWG MQW-LD의 전류 대 광출력(I-L)특성

LD의 경우 발진 개시 전류밀도가 수십 kA/cm^2 정도로 높을 수도 있기 때문에 활성층에서 발생하는 막대한 Joule열로 인해 상온 연속 동작이 불가능한 경우도 있다. 이 때문에 2 K, 77 K 등 저온에서 발진실험을 행하기도 하지만, 상온에서는 펄스폭 비율(duty)이 1% 미만의 펄스를 이용하여 발진실험을 행한다면 이와같은 문제점을 배제하고 실험을 행할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 반복주기 1ms, 펄스폭 1 μs , 즉 펄스폭 비율 0.1%의 펄스를 사용하여 발진실험을 행할 수 있도록 측정계를 꾸미고 실험을 행하였다.

그림 1은 발진실험에 이용한 측정장치도를 나타내고 있다. 측정된 LD 저항은 10Ω 정도이므로 임피던스 정합을 위하여 40Ω 과 전류모니터 저항 1Ω 을 달아주고 있다. LD의 온도가변은 열전소자(Thermo. Electric Cooler)를 이용하였으며, 이는 상온에서 0~2A로 전류를

*본 연구는 한국과학재단의 연구비로 수행되었음

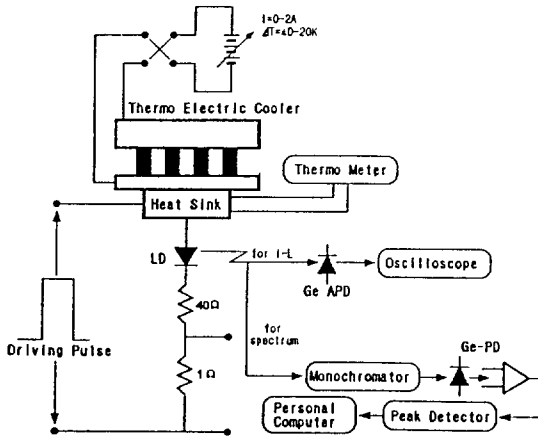


그림 1. I-L특성 측정을 위한 장치도.

가변시켰을 때 $\pm 20\text{C}$ 의 온도차를 발생시킬 수 있는 능력을 가지고 있는 소자이다. 온도의 측정은 LD의 mount (Copper Block)에 열전대를 장착하여 측정하였다. LD의 I-L특성은 Ge APD(직경 $80\ \mu\text{m}\Phi$)를 이용하여 측정하였으며, APD는 Anritsu의 Optical Power meter ML 900 IA로 calibration하여 사용하였다. 이 APD의 성능은 역방향 바이어스 전압을 -32V 로 걸었을 때 상승시간 t_r 은 $1\ \text{ns}$ 미만이며, $1\ \text{mW}$ 광펄스를 수신했을 때 $50\ \Omega$ 부저항에 $35\ \text{mV}$ 의 전압을 발생됨을 확인하였다.

한편, 발전과장특성의 측정을 위해서 과장분석에 사용한 분광기는 Fastie-Ebert mount형태의 Jarrell-Ash사 제품으로서 회절격자는 $1\ \text{mm}$ 당 $600\ \text{grooves}$ 이고, $600\ \text{nm}\sim 2.0\ \mu\text{m}$ 의 과장영역에서 사용되며 반사경에서 출사 슬릿까지의 초점거리는 $275\ \text{mm}$ 이며, 분산은 $6\ \text{nm/mm}$ 이다. 출사슬릿폭에 대한 분해능은 출사슬릿 폭과 분산의 곱으로 주어진다. 따라서 폭 $25\ \mu\text{m}$ 인 슬릿을 사용하면, 약 $1\ \text{\AA}$ 정도의 이론적인 분해능을 얻을 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 이론적한계까지 측정을 행하기 위하여 위의 분광기에 scanning motor, 광검출기, photo coupler를 이용한 광 스위치, 이득이 약 $60\ \text{dB}$ 이고 차단주파수는 DC에서 $50\ \text{kHz}$ 인 광수신용 증폭기, 미약한 광펄스의 과장특성을 측정할 수 있도록 광 검출기로 부터 검출된 광펄스 신호를 펄스의 최대 값에 해당하는 직류신호로 변환시키는 최대값 검출기, 그리고 최대값 검출기를 통해서 나오는 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환시켜 주는 A/D변환 카드 및 이를 이용하여 신호처리할 수 있는 컴퓨터 등 과장측정 장치의 신뢰성 및 효율성을 향상하기 위하여 측정계를 거의 자체 설계 제작하였다.^[5]

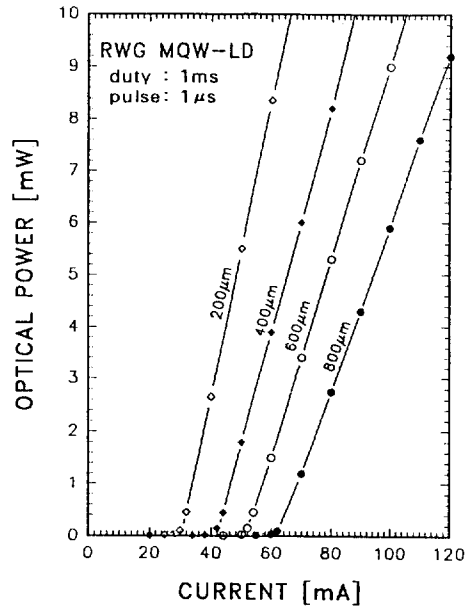


그림 2. 길이 L에 따른 I-L특성.

제작된 RWG MQW-LD의 특성을 알아보기 위해 공진기 길이에 따른 I-L 특성 변화를 측정한 결과를 그림 2에 나타내었다. 이 그림에서 광출력이 $10\ \text{mW}$ 에 이를 때까지 mode-hopping에 의한 kink현상^[6]이 일어나지 않는다는 사실을 보여주고 있다. 이는 제작된 RWG MQW-LD가 단일 측모드로 동작함을 의미 하고있다. 그리고 그림 2에서 공진기 길이가 $300\ \mu\text{m}$ 인 경우 임계전류값이 약 $35\ \text{mA}$ 임을 알 수 있다. 이는 그림 3의 Ridge폭에 따른 임계전류의 변화 계산치에서 LD의 leakage current가 전혀 없다고 가정한 경우, 이 LD제작을 위한 계산결과와^[7] 비교해 보면 측방향 유효굴절율차가 약 $0.01\sim 0.012$ 정도일 것으로 추정된다. 그런데 문헌7의 계산에서는 MQW층의 전체두께를 $0.1\ \mu\text{m}$, 그리고 선폭확대계수 α 값을 4로 가정하였었는데 비하여 실제 제작된 LD의 활성층의 두께는 $0.15\ \mu\text{m}$ 이었기 때문에^[4] 성장된 MQW의 경우 α 값은 5에 가까울 것이다. 따라서 이러한 사실들과 문헌7의 이론적인 해석 모델에서 ridge 바깥 영역의 광도파로에서 ridge 영역 외부로 퍼진 광이 완전히 가두어지는 것으로 해석하였으나, 실제 ridge 바깥 영역에서는 광도파로 구조상 광의 손실이 상당히 크기 때문에 측방향 유효굴절율차는 weakly index-guided LD로 동작하기 위한 임계값 0.015 이상일 것으로 추정할 수 있다. 그러므로 제작된 RWG MQW-LD가 weakly index-guided LD로 동작하기 위한 활성층 및 waveguide

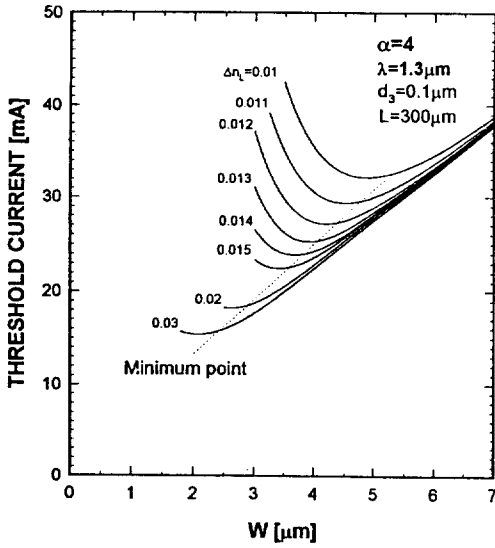


그림 3. Ridge 폭에 따른 임계전류의 변화.

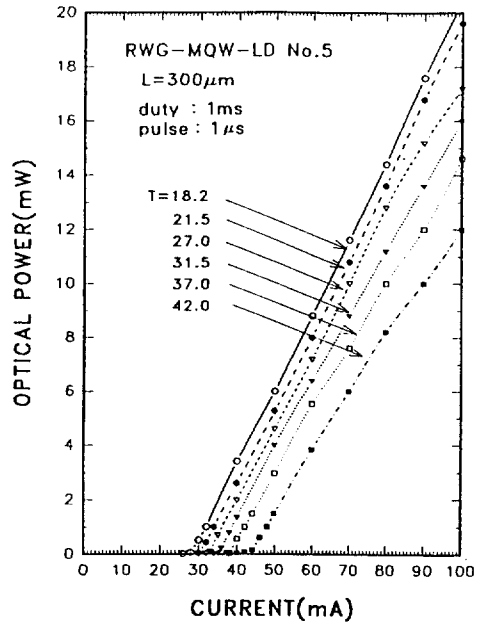


그림 5. RWG-MQW-LD의 온도에 따른 I-L 특성.

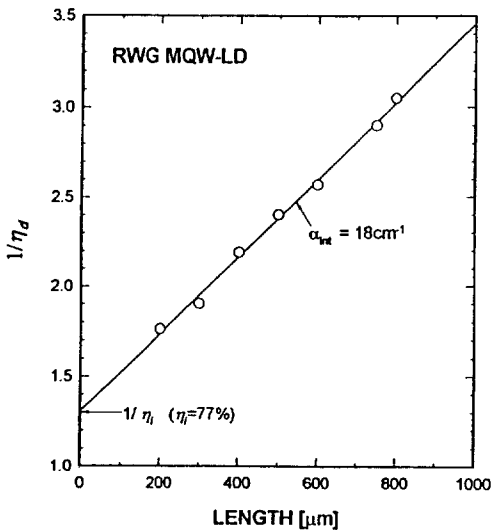


그림 4. η_i , α_{int} 측정.

층의 두께 등 소자의 특성에 직접적인 영향을 주는 파라미터들이 이론치보다는 다소 오차를 가지더라도 weakly index-guided LD로 동작 및 단일 모드 동작함을 추정할 수 있다.

그림 4에 제작된 RWG MQW-LD 활성층의 내부양자 효율(η_i)과 내부손실(α_{int})을 구하기 위한 실험예이다. 횡축은 공진기 길이이며 종축은 외부분양자효율(η_o)의 역수를 나타내고 있다. 장벽층으로 사용된 $1.1 \mu\text{m}$ InGaAsP의 두께가 200 \AA 이상이 된다는 사실로부터 캐리어의 주입 효율이 좋지 않을 것으로 예상할 수 있으나,

그림에서 나타난 바와 같이 내부양자효율 $\eta_i=77\%$ 로서 대단히 양호하다. 이는 캐리어의 주입 효율이 양호하며, 활성층의 에피 특성이 우수하여 비발광 재결합과 같은 현상이 아주 작다는 것을 뜻하고 있다. 그리고 내부손실은 $\alpha_{int}=18 \text{ cm}^{-1}$ 로서 MOVPE로 제작된 소자의 특성과 비슷한 값으로서^[8] $1.3 \mu\text{m}$ InGaAsP 층과 $1.1 \mu\text{m}$ InGaAsP 층으로 형성된 MQW층의 계면 특성이 단일 활성층에 비견할 정도로 우수하다는 사실을 암시하고 있다.

따라서, 내부양자효율과 내부손실 특성으로부터 살펴본다면 LPE로 성장된 MQW 활성층의 특성이 MO-CVD로 성장된 MQW 활성층의 특성보다 결코 못하지 않으므로 MQW층을 가지는 광소자 등의 응용에 LPE 방법도 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

향후, 활성층으로서 MQW층을 더욱 더 잘 조절하여 100 \AA 이하로 하고 전체 활성층 두께를 줄여 주고, 이에 따라 waveguide층의 두께 조절을 행하게 된다면 본 연구에서 얻어진 LD에 비해 저전류 동작이 가능할 것으로 생각된다.

한편, 그림 5는 RWG MQW-LD의 온도에 따른 I-L 특성을 나타내고 있다. 이 그림으로부터 온도가 상승함에 따라 I_{th} 가 증가함을 알 수 있으며, 특성온도 T_0 의 크기를 가지고 LD의 동작상태 양호 여부를 판단할 수 있다.

그림 5로부터 온도에 따른 I_{th} 의 변화를 나타낸 것이

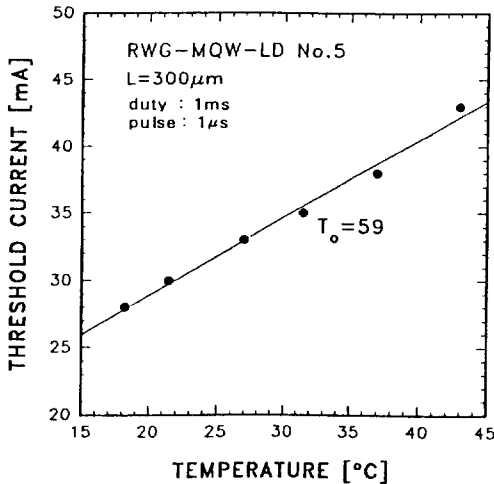


그림 6. RWG-MQW-LD의 온도에 따른 I_{th} 의 변화.

그림 6이다. 그림에서 각 점들은 그림 5의 실험결과이고 실선은 T_0 를 59K로 계산한 이론 곡선이다. 이 값은 상용화되어 있는 MQW-LD의 경우⁹⁾와 비교해 보면 거의 평균치에 가까움을 알 수 있다. 그러므로 활성층의 결정특성이 우수함을 알 수 있다.

III. RWG MQW-LD의 발진파장 특성

반도체레이저를 제작하면 I-V, I-L 특성을 조사하여 전기적인 동작상태를 확인한 연후에 광학적인 특성중 하나인 발진 및 발광스펙트럼을 측정하여 활성영역을 구성하고 있는 재료의 종류 및 굴절율, 발진모드의 양상, 그리고 발진파장의 온도 및 동작전류 의존성등을 조사하게 된다. 이들 중 발진파장 및 파장의 온도의존성은 통신시스템설계의 참고가 되는 LD의 규격이 되므로 상당히 중요한 요소이다.

그림 7은 RWG-MQW-LD를 펄스폭이 0.1%로하여 발진실험을 하였을 경우 발진임계전류(I_{th})가 31 mA이며 100 mA의 전류를 인가하였을 경우 20 mW의 광출력을 가지는 LD칩을 이용하여 $I=2.1I_{th}$ 에서 발진 스펙트럼을 나타내고 있다. 그림 7에서 보면 파장간격이 $\Delta\lambda=0.834$ nm이다. LD 공진기의 길이를 L 이라 할 때 전자파의 Fabry-Perot 공진모드와 공진기의 길이 L 과는 다음과 같은 관계가 있다.

$$L = \frac{1}{2} \frac{q\lambda_0}{n_{eq}} \quad (1)$$

여기서 q 는 공진모드수, n_{eq} 는 등가굴절율이다. 이 식

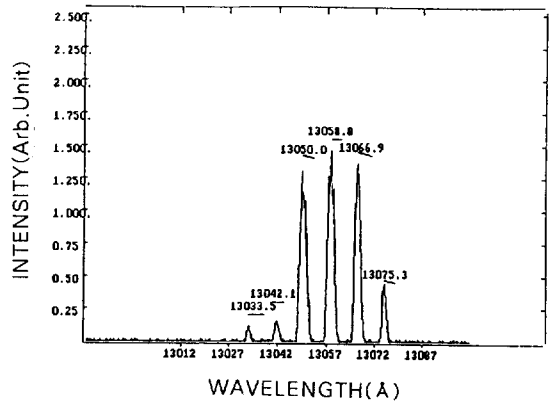


그림 7. Fabry-Perot 모드 간격 측정을 위한 발진스펙트럼.

으로 부터 공진모드의 파장간격은 다음식으로 주어진다.

$$\Delta\lambda = -\frac{\lambda^2}{2n_{eff}L} \quad (2)$$

여기서 n_{eff} 는 굴절율이 파장분산을 고려한 유효굴절율 (effective refractive index)^[10]로서

$$n_{eff} = n_{eq} \left(1 - \frac{\lambda_0}{n_{eq}} \frac{dn_{eq}}{d\lambda} \right) \quad (3)$$

으로 주어진다. 여기서 n_{eff} 는 광이 활성층과 가둠층 (clad층)에 분포되어 있으므로 도파되는 광이 느끼는 유효굴절율이다. 그림에서 보면 1303~1307 nm 파장근처에서는 $\Delta\lambda=0.834$ nm 정도이며, 산술평균하여 $\lambda_0=1305$ nm, $\Delta\lambda=0.834$ nm로 하고 LD공진기 길이가 $275 \mu\text{m}$ 이므로 LD의 공진기의 유효굴절율을 추정한다면, 식 (2)로부터 $n_{eff} \approx 3.716$ 이 얻어진다. 한편, 계산된 활성층의 등가 굴절율이 3.235이므로^[6] 식 (3)에서 굴절율분산 $\Delta n/\Delta\lambda$ 은 $-0.368 \mu\text{m}^{-1}$ 이다. 이 값은 벌크형인 $1.3 \mu\text{m}$ InGaAsP의 굴절율분산 $\Delta n/\Delta\lambda -0.86 \mu\text{m}^{-1}$ 인^[11] 것과 비교하면 2배이상 특성이 양호함을 알 수 있다.

마지막으로 Fabry-Perot LD인 $1.3 \mu\text{m}$ InGaAsP/InP RWG MQW-LD의 온도에 따른 스펙트럼 변화를 분석하여 온도에 따른 파장 안정도를 측정하였다.

일반적인 InGaAsP/InP DH 레이저의 경우 굴절율의 온도변화에 따른 발진파장의 온도변화는 약 $1 \text{ \AA}/^\circ\text{C}$ 이며,^[12] 밴드갭 에너지가 온도변화에 따라 변화하기 때문에 생겨나는 발진파장의 온도의존성은 약 $5\sim 6 \text{ \AA}/^\circ\text{C}$ 정도로 알려져 있다.

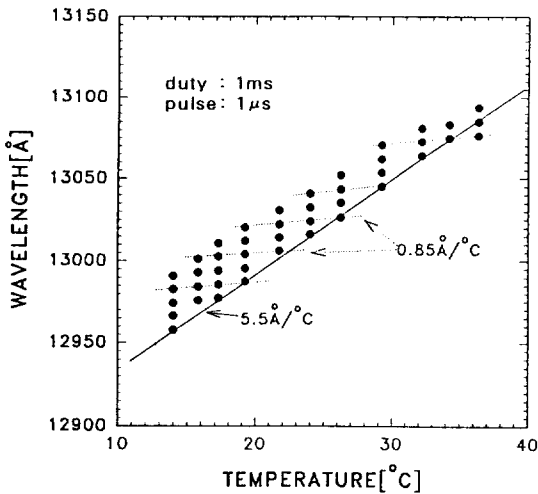


그림 8. RWG-MQW-LD의 온도에 따른 파장특성

그림 8은 InGaAsP/InP RWG MQW-LD의 온도에 따른 파장변화를 나타내고 있으며, 동작전류는 $2I_m$ 이다. 그림 8에 나타난 각점은 온도에 따른 발진모드이며, 온도가 증가할 수록 파장이 장파장 쪽으로 이동함을 알 수 있다. 이것은 Fabry-Perot LD가 온도가 증가할 수록 밴드갭 에너지 E_g 의 감소에 의해 장파장 쪽으로 이동하는 것으로서 일반적으로 알려져 있는 $5\sim 6 \text{ \AA}/^\circ\text{C}$ 와 같은 $5.5 \text{ \AA}/^\circ\text{C}$ 로 나타났다. 그러므로 제작된 InGaAsP/InP RWG-MQW-LD가 통상의 MOCVD로 제작된 MQW-LD와 같은 특성을 가짐을 알 수 있다. 한편 그림 8은 발진 스펙트럼을 굴절률변화에 따른 발진모드의 온도의존성도 나타내고 있으며, 온도의존성은 $0.85 \text{ \AA}/^\circ\text{C}$ 로서 알려져있는 $1 \text{ \AA}/^\circ\text{C}$ 와 거의 같은 값을 가지고 있음을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 LPE방법에 의해 제작된 InGaAsP/InP RWG MQW-LD의 광학적특성을 조사하여 LD의 성능과 에피층 성장장치인 자체제작한 수직형 LPE장치의 특성을 평가할 수 있었다.

제작된 RWG MQW-LD의 광학적 특성 조사결과는 RWG MQW-LD의 I-L 특성으로부터 측방향 단일모드로 동작함을 알 수 있었다. 발진 임계전류등을 고려해 보면, 이론 계산에서 측방향 유효굴절률차가 $0.01\sim 0.012$ 정도임을 추정할 수 있다. 그러나 계산에 이용된 MQW층의 전체두께와 실제 성장된 MQW층의 두께와의 차와 LD의 leakage current까지 고려하게 되면 제작된 LD가 index-guided LD로 동작하기 위한 측방향 유효굴절률차가 0.

015 이상일 것으로 예상된다. 그리고 내부양자효율(η_i)이 77%로서 캐리어의 주입 효율이 양호하며, 활성층의 에피 특성이 우수하여 비발광 재결합과 같은 현상이 거의 일어나지 않는 것으로 추정할 수 있다. 내부손실(α_m)이 18 cm^{-1} 로서 $1.3 \mu\text{m}$ InGaAsP 층과 $1.1 \mu\text{m}$ InGaAsP 층으로 형성된 MQW층의 계면 특성이 단일 활성층에 비견할 정도로 우수하다는 사실을 알 수 있다.

그리고 제작된 RWG MQW-LD의 발진스펙트럼을 분석해 본 결과 공진모드간격($\Delta\lambda$)이 0.834 nm 로 나타났다. 이 결과로부터 유효굴절률차(n_m)가 3.716라는 것을 알 수 있었으며 LD의 굴절률분산($\Delta n/\Delta\lambda$)은 $-0.318 \mu\text{m}^{-1}$ 로 나타났다. 이는 MQW층을 활성층으로 사용할 경우 벌크형 LD보다 2배이상 양호한 특성을 가짐을 알 수 있었다.

이러한 결과들을 종합해 보면, 수직형 LPE로 제작된 RWG MQW-LD의 특성은 MOCVD에서 얻을 수 있는 특성과 거의 비슷한 수준을 얻을 수 있으며, 또한 MQW층을 가지는 광소자 제작에 LPE 방법을 활용할 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] 조호성, 박윤호, 황상구, 홍창희, 오중환, 예병덕, "이중 2상 용액법에 의한 InGaAsP/GaAs 액상결정성장" 한국물리학회지 응용물리, **6**(3), 232 (1993).
- [2] 조호성, 홍창희, 오중환, 예병덕, 이증기, "액상결정 성장에 의한 InGaAsP/InP MQW LD 제작에 관한 연구" 한국광학회지, **3**(4), 252 (1993).
- [3] 조호성, 박윤호, 홍창희, "LPE방법으로 제작된 InGaAsP/InP MQW LD의 광학적 특성 조사" 대한전자공학회지, **31**(10), 63 (1994).
- [4] 박윤호, 오수환, 하홍춘, 안세경, 이석정, 홍창희, "수직형 LPE장치를 이용한 InGaAsP/InP RWG MQW-LD제작" 한국광학회지, **7**(2), 6. (1996).
- [5] 오수환, 이석정, 박윤호, 홍창희, "과장측정장치의 제작 및 반도체레이저의 광 스펙트럼분석에 관한 연구", 한국광학회지, **6**(4), 359 (1995).
- [6] H. Kressel and J. K. Butler, *Semiconductor Lasers and Heterojunction LEDs*, Academic Press, 1977.
- [7] 홍창희, LPE방법에 의한 Ridge형 InGaAsP/InP RWG MQW-LD 제작에 관한연구, 한국학술진흥재단 최종연구보고서, 10 (1996).
- [8] 조호성, 박경현, 이증기, 장동훈, 김정수, 박성기, 박기성, 김홍만, 편광의, "응력완화 $1.3 \mu\text{m}$ GaInAsP/InP Uncooled-LD의 다중양자우물층과 SCH

- 층 구조에 따른 동작특성” 전자공학회지, **33A**(7), 185 (1996).
- [9] 이증기, 장동훈, 조호성, 이승원, 박경현, 김정수, 김홍만, 박형무, 홍창희, “2.5 Gbps 광통신용 1.55 μm InGaAsP/InP PBH-DFB-LD 제작 및 특성” 전자공학회지, **31A**(9), 139 (1994).
- [10] K. Stubkjaer, Y. Suematsu, M. Asada, S. Arai and A.R. Adams, “Measurements of refractive-index variation with free carrier density and temperature free 1.6 μm GaInAsP/InP lasers,” *Electron. Lett.*, **16**, 895 (1980).
- [11] P. Chandra, L. A. Coldren and K. E. Strege, “Refractive index data from $\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ films,” *Electron. Lett.*, **17** 6 (1981).
- [12] K. Utaka, K. Kobayashi and Y. Suematsu, “Lasing characteristics of 1.5~1.6 μm GaInAsP/InP intergrated twin-guide lasers with first-order distributed bragg reflectors with first-order distributed bragg reflectors,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-17**, 651 (1981).

An Investigation of Optical Characteristics of InGaAsP/InP RWG MQW-LD By LPE Method

Su-hwan Oh, Hong-choon Ha, Yoon-ho Park, Se-kyung An,
Seok-jeong Lee and Tchang-hee Hong

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

(Received: April 29, 1996)

In this study the evaluation of RWG MQW-LD fabricated with our vertical LPE system has been carried out with measuring its optical characteristics. This laser diode operated in lateral single mode as designed, and it showed 77% of internal quantum efficiency, 18 cm^{-1} of internal loss and $5.5 \text{ \AA}/^\circ\text{C}$ of the thermal characteristic of the lasing wavelength. From these results we conclude that the vertical LPE system are fairly good and it might be useful to fabricate MQW wafer for laser diode.