工學碩士 學位論文

MELTBACK 방법을 이용한 평면 매립형 레이저 다이오드 제작에 관한 연구

A Study on the Fabrication of Planar Buried Heterostructure Laser Diode Using Meltback Method

指導敎授　洪　彰　禧

2000年　2月

韓國海洋大學校　大學院

電子通信工學科

金　廷　昊

本　論文을 金廷昊의 工學碩士
學位論文으로 認准함.

委員長　:　李　三　寧　(印)

委　員　:　沈　俊　煥　(印)

委　員　:　洪　彰　禧　(印)

2000年　2月

韓國海洋大學校　大學院

電子通信工學科

金　廷　昊

목 차

ABSTRACT

A PBH-LD, a kind of strongly index guided laser, has been made by a meltback method by using a vertical LPE system which was made in our laboratory for ourselves.

Formation of a mesa shape by a meltback method has an advantage in the reduction of damages on a substrate due to chemical etching and heating during regrowth.

After the investigation of several characteristics of meltback solutions and meltback temperature, we confirmed that both of chemical etching and meltback method should be used to make a high performance PBH-LD. Therefore, we have formed mesa shapes successively with chemical etching and the meltback method. It is considered that the characteristics of the interface between the substrate and current blocking layers grown after the meltback may be excellent because of high meltback temperature of 610℃. The width of an active layer has been controlled to be 0.8 to 1.2㎛ so that the fabricated LD could operate with single mode in the lateral direction. To reduce the leakage current of current blocking layers, the widths of p-InP and n-InP layer have been grown to be 1.2㎛ and 1.6㎛, respectively.

From the measurement of electric and optical characteristics of the fabricated MQW-PBH-LD, it was confirmed to be operated with low current and high performance. When the length of resonator was 300 ㎛, its characteristics were as follows: the threshold current of 10mA, the internal quantum efficiency of 82%, the internal loss of 9.2cm-1,

and characteristic temperature of 65K. From the measurement of far-field pattern, we confirmed that it was operated with single mode in both directions parallel and normal to the junction interface.

And we observed the variation of threshold current varying the leakage width at a certain cavity length and then applying the same widths to different cavity lengths and as a consequence, we clarified that the threshold current became low in the decrease of the leakage width and in the increase of the ratio of specific resistivity of leakage region to active region. We also made a comparison between the calculated threshold current in the absence of leakage region and the measured threshold current in the opposite case. As a result, the ratio of specific resistivity was about 0.5 in the measured LD, which has the width of a active layer of 1.4㎛ and leakage width of 0.6㎛.

제 1 장 서론

현대와 같은 고도의 정보통신 시대를 맞이하게 됨에 따라 고속, 광대역 정보통신망의 요구가 급증하게 되었고, 이에 부응하는 정보통신망으로 광통신이 각광을 받고 있다. 또한 컴퓨터의 급속한 보급과 더불어 컴팩트디스크, 바코드 리더, 레이저 프린터 등과 같은 대용량 정보기록과 재생매체의 수요가 폭발적으로 증가되고 있다. 이와 같은 배경으로부터 앞으로의 광전자 산업의 전망은 매우 밝다고 할 수 있으며 광전자 기술 개발에 필수적으로 요구되는 광소자 개발은 사용재료 및 결정성장에 대한 연구와 함께 이를 뒷받침하는 제조기술의 개발에 의존하게 된다. 광소자의 하나인 레이저 다이오드(Laser Diode ; LD)는 광 정보처리에 사용되는 AlGaAs/GaAs계와 같은 단파장 영역과 광섬유통신의 광원으로 사용되는 장파장 대역인 InGaAsP/InP계 또는 InGaAs/InP계의 두 가지 방향에서 개발이 이루어지고 있다. 그리고 광기록 재생을 위한 측면에서 정보의 고밀도 기록재생을 위한 단파장화에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있으며[1-8], 광통신용 광원은 광섬유의 최저분산인 1.3㎛영역과 최저손실영역인 1.55㎛[9] LD로의 개발이 이루어지게 되었다[10,11].

한편, 광통신이 상용화되기까지 LD는 주로 액상결정성장(Liquid Phase Epitaxy ; LPE)에 의해 이중 이종구조(Double Heterostructure ; DH)의 성장이 이루어져 왔으나[12,13] 수 Å에서 수백 Å정도의 성장층 두께 조절이 가능한 유기금속기상성장(Metal Organic Vapor Phase Epitaxy ; MOVPE), 분자빔성장(Molecular Beam Epitaxy ; MBE)방법 및 화학 빔성장(Chemical Beam Epitaxy ; CBE)방법이 개발되면서 최근들어 세계적으로 양자 사이즈 효과(Quantum Size Effect ; QSE)를 이용한 양자우물(Quantum Well ; QW)소자에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[14-27]. 이러한 QW 소자는 반도체 소자의 고속화, 양자효율 개선, LD의 임계전

류의 극소화 등으로 응용 범위가 무한하며, 시장성 또한 넓기 때문에 선진국에서는 많은 연구가 이루어져 이미 실용화 및 상용화 단계에 이르고 있는 실정이다. 또한 초고속 광통신의 광원으로 사용되는 등, 고성능 광소자의 전형적인 구조인 매립형(Buried Heterostructure ; BH)-LD의 경우만 보더라도 다중양자우물(Multiple Quantum Well ; MQW) DH 웨이퍼는 MOVPE로 성장하여 재성장에는 LPE를 사용하는 경우를 지나 모든 공정을 MOVPE로 LD를 제작하고 있는 실정이다[28-31].

그리고 국내의 경우 BH-LD 구조의 하나인 평면 매립형(Planar Buried Heterostructure ; PBH)-LD의 경우 선진국과 비슷한 수준의 연구를 수행하고 있으며[32,33], 1996년 이후 PBH-LD는 모든 공정을 MOVPE를 사용하여 제작하고 있는 실정이다[34,35]. 그리고 대량생산 및 재현성 측면에서 MOVPE나 MBE의 경우가 LPE에 비해 월등히 우수하며 그 사용정도는 더욱 가속화되고 사용 폭이 넓어질 것으로 보인다. LPE로 모든 에피 성장을 해낸다는 것은 어렵지만, MOVPE나 MBE 장치는 대학 단위에서 구비하기가 어려운 실정이며, 이러한 분야의 기술인력 양성과 기초기술의 확보라는 측면에서 LPE를 이용한 연구가 선행되어야 할 것으로 생각된다.

따라서 본 논문에서는 본 연구실에서 직접 제작하여 운용 중인 수직형 LPE 장치를 이용하여 10여 년간 쌓아온 기초 연구결과를 바탕으로 최근에 광가입자망 등에 사용되고 있는 고성능 광소자인 PBH-LD를 meltback 방법을 이용하여 제작하였다. meltback 방법으로 메사모양을 형성할 경우 재성장시 발생할 수 있는 메사 계면의 열손상과 메사 모양의 형성시 기판의 화학적 에칭에 의한 기판의 손상을 줄일 수 있는 이점이 있다. 또한 높은 온도(600℃)에서 전류 차단층을 형성할 수 있기 때문에 양질의 에피층을 형성할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 특성을 가지는 meltback 방법을 이용하여 고성능 광소자를 제작하기 위해 meltback 용액과 meltback 온도에 따른 여러

특성을 조사하여 최적의 meltback 용액과 온도를 구하였다[36,37]. 그 결과 고성능의 PBH-LD 제작을 위해서는 화학에칭과 meltback 방법을 동시에 이용해야함을 확인하였다. 그래서 화학에칭과 meltback 방법을 이용하여 메사 모양을 형성하고 연속적인 전류 차단층을 형성하였다. meltback 온도가 610℃로 높기 때문에 meltback 후 성장된 전류 차단층의 에피특성도 우수할 것으로 생각된다. 그리고 제작된 LD가 측방향 단일모드로 동작하기 위해 활성층의 폭을 0.8 1.2㎛ 정도 되게 제어하였다. 그리고 전류 차단층의 누설전류를 줄이기 위해 p-InP층은 약 1.2㎛, n-InP층은 약 1.6㎛가 되게 성장하였다.

이렇게 제작된 PBH-LD의 전기·광학적 특성을 조사한 결과, 저전류 고성능으로 동작함을 확인하였다. 공진기 길이가 300㎛일 때 임계전류는 10mA, 내부양자효율은 82%, 내부손실은 9.2cm-1이고, 특성온도는 20 45℃에서는 65K, 45 65℃에서는 42K의 값을 얻었다. 그리고 Far Field Pattern을 측정한 결과 6Ith까지 접합면의 수평방향과 수직방향 모두 단일모드로 동작하는 것을 확인하였다.

그리고 측정된 자료를 바탕으로 누설 폭에 의한 임계전류의 변화를 확인하기 위해서 누설 폭이 없을 때의 임계전류와 누설 폭을 가지는 제작된 PBH-LD의 임계전류를 비교하였다. 누설 폭을 줄일수록 누설전류가 줄어들어 낮은 임계전류 값을 가지고, 전류 차단층의 저항을 증가시켜 줌으로써 누설전류의 영향을 줄일 수 있음을 확인하였다.

본 논문에서는 이와 같은 결과를 다음과 같이 기술하였다. 2장에서는 고성능 광소자인 PBH-LD를 meltback 방법으로 제작하기 위해 melback 용액과 meltback 온도에 따른 여러 특성을 조사하여 최적의 meltback 용액과 온도를 구하여 PBH-LD를 제작한 것에 대해 기술하였으며, 3장에서는 meltback 방법을 이용하여 제작된 PBH-LD의 전기·광학적 특성을 기술하였고, 4장에서는 PBH-LD의 누설 전류에 관하여 기술하였으며, 마지막으로 5장에서는 결론을 논하였다.

제 2 장 PBH-LD의 제작

최근 들어 에피층의 성장기술이 향상됨에 따라 저전류 및 고효율로 동작하는 LD의 제작에 대한 관심이 갈수록 높아지고 있다[38-41]. 이러한 시점에서 저전류 및 고효율로 동작하는 PBH-LD를 LPE의 특성 중 하나인 meltback 방법을 이용하여 메사 모양을 형성하고 연속적으로 전류 차단층을 성장하여 PBH-LD를 제작하는 방법을 제안하고자 한다.

LD는 광이 도파되는 메카니즘에 의해 다음과 같이 크게 3가지로 분류될 수 있는데, 첫째는 strongly index-guide LD로 활성층의 상하 및 좌우에 에너지 갭이 큰 재료로 둘러싸여 캐리어 및 광이 활성층으로 가두어지는 구조로 BH[42-45] 형태를 들 수 있다. 이와 같이 활성층 구조 자체에 굴절률의 불연속성을 가지는 LD 종류에는 DCPBH(Double Channel Planar Buried Heterostructure)[46], MSBH(Mesa Substrate Buried Hetrostructure)[47], CSBH(Channel-Substrate Buried-Heterostructure)[48], BCBH(Buried-Crescent Buried- Heterostructure)[49,50] 등이 있다. 둘째로 접합면의 평행한 방향에 대해서 활성층 자체가 굴절률의 불연속성을 가지지는 않으나, 횡방향 도파모드에 의해 굴절률차가 생기는 LD를 weakly index-guide LD라 한다. 대표적인 weakly index-guide LD로는 RWG(Ridge Wave Guide)[51-57]와 RS(Rib Stripe)[55], PCW(Planar Channeled Waveguide)[56], PS(Planar Stripe)[57], NOS(Native Oxide Stripe)[58], IS(Inner Stripe)[59] 등이 있다. 마지막으로 굴절률차에 의해 광이 도파되는 것이 아니라 주입된 캐리어에 의해 발생되는 이득에 의해 도파되는 LD를 gain-guide LD라고 하며, 일반적으로 스트라이프(stripe)형 LD가 이 범주에 속한다.

도파 메카니즘에 따라 장단점이 있겠지만, 제작하는 측면에 있어서 strongly index-guide LD는 에칭된 메사에 재성장을 해야 하는 정교한 제작기술

과 복잡한 공정이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 자체 제작한 수직형 LPE 장치를 이용하여 기존의 PBH-LD 제작 공정에서 사용하지 않았던 meltback 방법을 이용함으로써 화학에칭과 열손상으로 인한 메사 계면의 손상 문제를 해결하고, 이어서 전류 차단층을 성장하는 새로운 방법을 이용하여 PBH-LD를 제작하였다.

2.1 Meltback 방법에 의한 메사모양 형성 및 전류 차단층 성장

본 논문에서는 낮은 임계전류와 안정된 측방향 기본모드 발진, 고신뢰성과 같은 우수한 특성 때문에 광통신의 광원으로 사용되고 있는 PBH-LD를 제작하고자 한다. 이러한 고성능을 실현하기 위해서는 활성층내에 전류를 효과적으로 가두기 위해 활성층의 양측을 p-n-p-n 구조의 전류 차단층을 형성하게 된다. 본 연구에서는 wet etching과 meltback 방법을 이용하여 메사 모양을 형성하고, 이어서 전류 차단층을 성장시켜 PBH-LD를 제작하고 그 특성을 측정하였다.

그림 2.1에 본 연구에서 제작하고자 하는 PBH-LD의 제작공정을 간단하게 나타내었다. (100) 방향의 n-InP 기판 위에 그림 2.1(a)처럼 600Å의 n-InP 버퍼층을 성장시키고, Si으로 7×1017cm-3 도핑된 n-InGaAsP SCH(Separate Confinement Heterostructure; SCH)층, 6 well의 다중양자 우물층, Zn로 7×1017cm-3 도핑된 p-InGaAsP SCH층, p-InP 층을 각각 성장시킨 후 (b)에서처럼 3㎛ stripe으로 패턴을 형성하였다. 다중양자 우물층은 50Å이고, 장벽층은 100Å이다. 그림에서 알 수 있듯이 일반적인 공정은 비슷하나 meltback 방법을 이용하여 메사 모양을 형성한다는 특징이 있음을 알 수 있다. 또한 meltback 후 연속적으로 전류 차단층을 성장하여 제작 공정을 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 재성장시 발생할 수 있는 메사 계면의 열손상으로 인한 LD의 성능 저하를 방지할 수 있는 등 여러 이점이 있다.

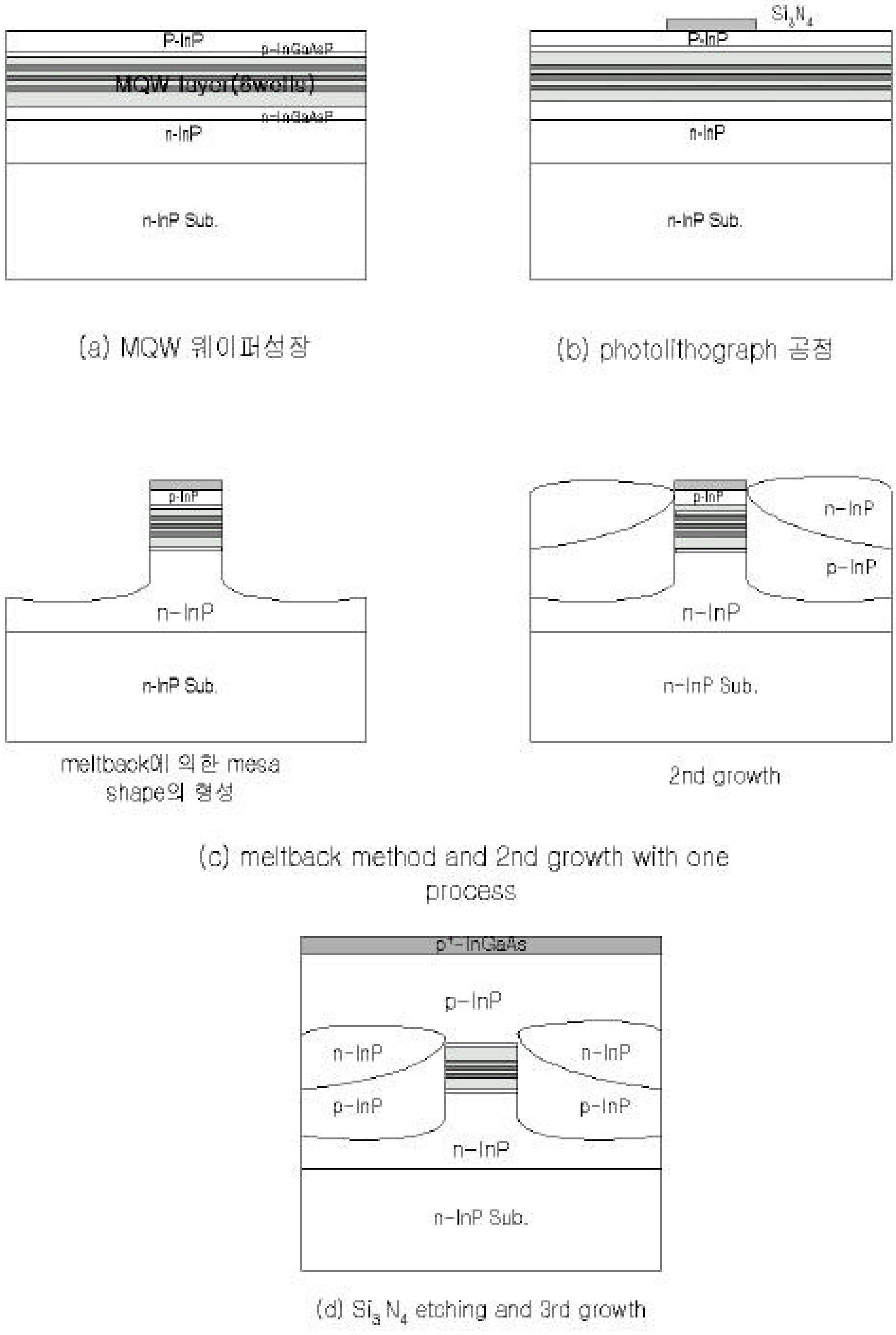
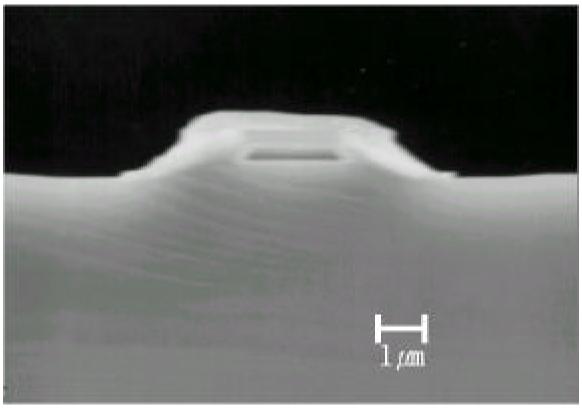


그림 2.1. Meltback **방법에 의한** PBH-LD**제작공정**.

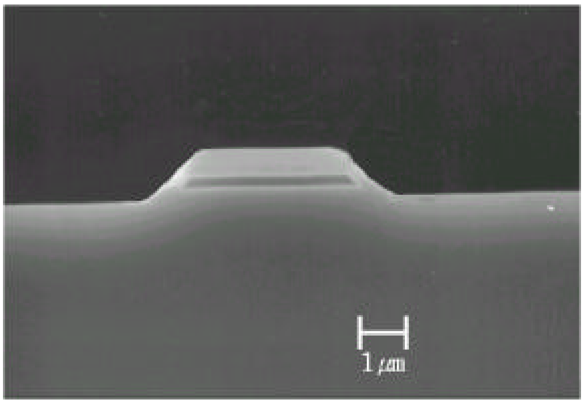
문에 meltback 용액과 온도에 따른 meltback 특성을 조사하였다. 보통 재성장 온도를 600℃이상으로 하는 경우 메사 계면의 열손상 뿐만 아니라 기판의 열손상으로 인하여 양질의 전류 차단층을 형성할 수 없게 되어 제작된 LD의 성능 저하의 요인으로 작용하게 된다. 따라서, 600℃이하에서 전류 차단층을 형성하고 있는 실정이다[60]. 그러나 meltback방법을 사용할 경우 열손상을 입지 않기 때문에 600℃이상에서도 양질의 전류 차단층을 얻을 수 있어 고성능의 LD 제작이 가능하다는 특징을 가진다. 그래서 본 연구에서는 meltback 온도를 630℃와 610℃로 하였다. 그리고 meltback 용액은 활성층의 과다한 meltback을 방지하기 위해 1.55㎛ InGaAsP 조성 중 P(phosphorus)를 삽입하지 않은 조성을 기준으로 하였다.

그림 2.2에 630℃에서 70%, 80%, 90%의 1.55㎛ InGaAsP(P 제외) 불포화용액의 meltback 특성을 나타내었다. 실험에 사용한 에피 웨이퍼는 1.3㎛ InGaAsP/1.1㎛ InGaAsP로 형성된 MQW층을 가지는 InP에피 웨이퍼를 이용하였으며, 활성층과 p-InP층의 두께는 각각 0.3㎛이며, 사진식각 공정으로 3㎛의 Si_3N_4 stripe을 가지는 웨이퍼를 이용하였다. (a), (b), (c) 각각 70%, 80%, 90% 용액으로 10초간 meltback한 메사 모양을 나타내고 있다. (a)는 70%의 불포화 용액을 사용한 경우로서 전체적으로 활성층의 meltback이 과도하게 되어 재현성있는 meltback 특성을 얻을 수 없었다. (b)는 80%의 용액을 사용한 경우로서 전체적으로 재현성있는 meltback 특성을 얻을 수 있었다. 그리고 (c)는 90%의 불포화 용액을 사용한 경우로서 그림에서 알 수 있듯이 meltback이 거의 되지 않는 것으로 나타났다. 그래서 80%의 불포화 용액을 이용하여 어느 정도까지 에피 웨이퍼의 meltback이 가능한지를 조사하여 그림 2.3에 나타내었다. 그림 2.3에서 알 수 있듯이 60초 정도 meltback 하면 InP 층에 대해 약 2.2㎛ 정도 meltback이 가능하다는 것을 알 수 있다. 30초 이상할 경우 활성층이 모두 meltback 된다는 것을 알 수 있으며, 1㎛ 정도까지 meltback이

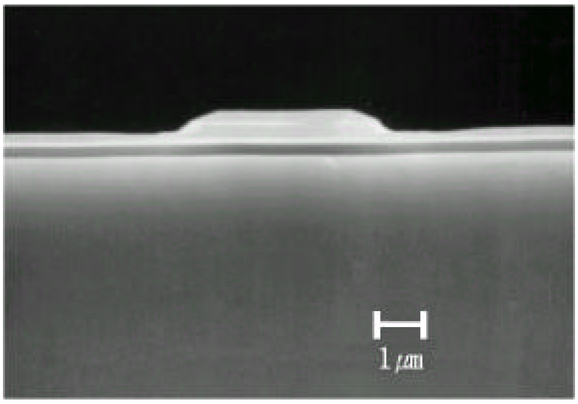
가능하다는 것을 알 수 있다. 따라서 meltback 방법을 이용하여 형성할 수 있는 메사 높이가 1㎛ 정도 밖에 되지 않기 때문에 누설전류 방지를



(a) 70% 용액



(b) 80% 용액



(c) 90% 용액

그림 2.2. Meltback 용액에 따른 meltback 특성.

위한 최적의 메사 높이는 약 2 3㎛정도로 알려져 있는 것[61]과 비교할 경우 소자 제작시 소자의 성능 저하를 초래할 수 있다.

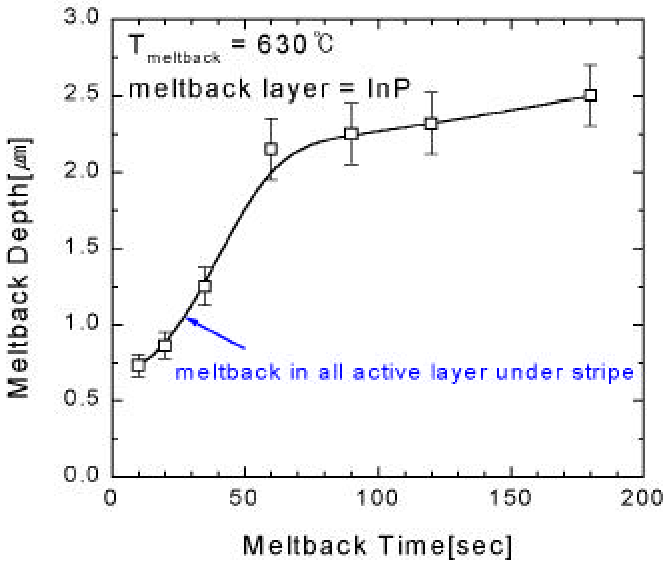


그림 2.3. Meltback 시간에 따른 에피 웨이퍼의 meltback 특성.

따라서, 본 연구에서는 메사 모양을 화학에칭과 meltback 방법을 이용하여 형성하였다.

먼저 에피 웨이퍼의 p-InP층을 H_3PO_4+HCl(4:1)용액으로 1분간 에칭한 후 활성층을 H_2SO_4+H_2O_2+H_2O (1:1:5)용액으로 3분 20초간 에칭하였고, n-InP층을 H_3PO_4+HCl(4:1)로 2분 20초간 에칭한 다음 80%의 불포화용액을 이용하여 630℃에서 10초간 meltback을 하고 난 후 전류 차단층을 성장하였다. 이렇게 하여 형성된 전류 차단층의 SEM 단면사진을 그림 2.4에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 전류 차단층 중 하나인 p-InP층이 메사 계면 중 활성층 및 p-InP층 위에서는 성장이 일어나지 않음을 알 수 있다.

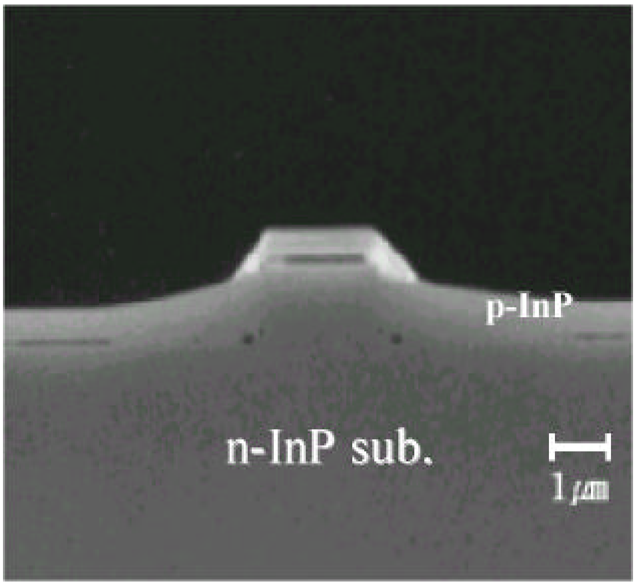
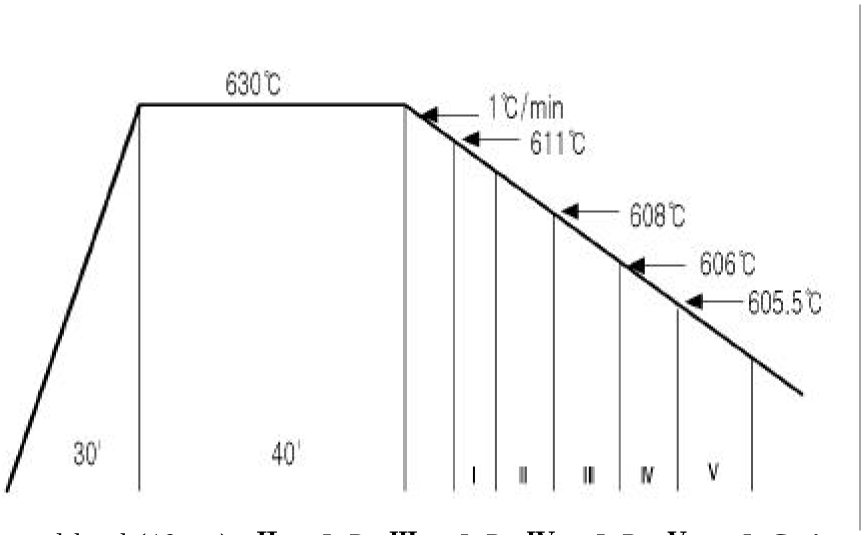


그림 2.4. Meltback 방법에 의해 형성된 메사 및 전류 차단층의 SEM 단면 사진.

이러한 원인은 meltback을 하기 위해서 meltback 온도보다 20℃ 높은 650℃에서 40분간 soking하는 등 높은 온도에서 meltback이 일어나 기판이 열손상을 입기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 meltback 온도를 610℃로 20℃ 낮추어 실험을 하였으며, cooling rate는 1.0℃/min으로 하였다. meltback을 한 후 전류 차단층인 p-InP층, n-InP층, p-InP층을 성장시킨 후 냉각시키게 되면 성장층의 열손상이 발생할 수 있으므로 p+-InGaAs층을 성장한 후 냉각시켰다. 2차 재성장을 위한 온도 프로그램을 그림 2.5에 나타내었다. 그리고 p-InP층과 n-InP 층의 도핑은 각각Zn/In와 Te/In alloy를 사용하였으며, 도핑 농도는 각각 $1\times10^{18}cm^{-3}$과 $2\times10^{18}cm^{-3}$로 하였다.



Ⅰ: meltback(10sec), Ⅱ:p-InP, Ⅲ:n-InP, Ⅳ:p-InP, Ⅴ:p+-InGaAs

그림 2.5. 2차 재성장을 위한 온도 프로그램.

이렇게 성장된 웨이퍼의 SEM 단면 사진을 그림 2.6에 나타내었다.

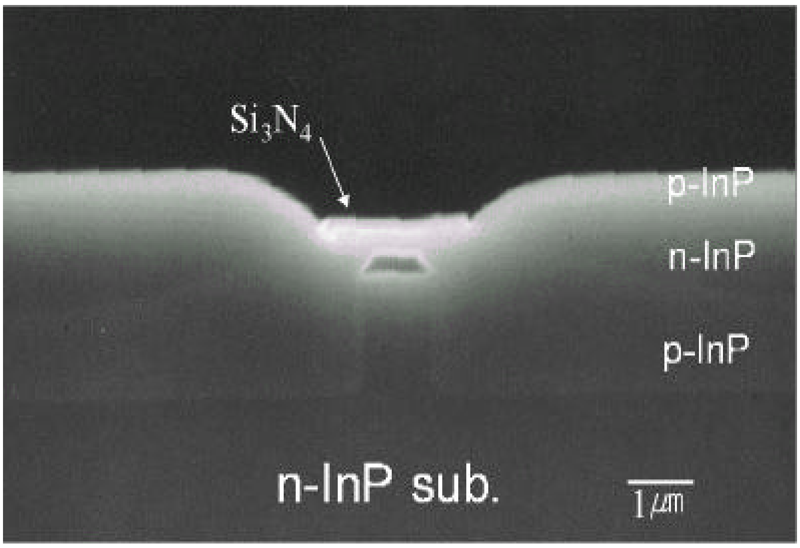
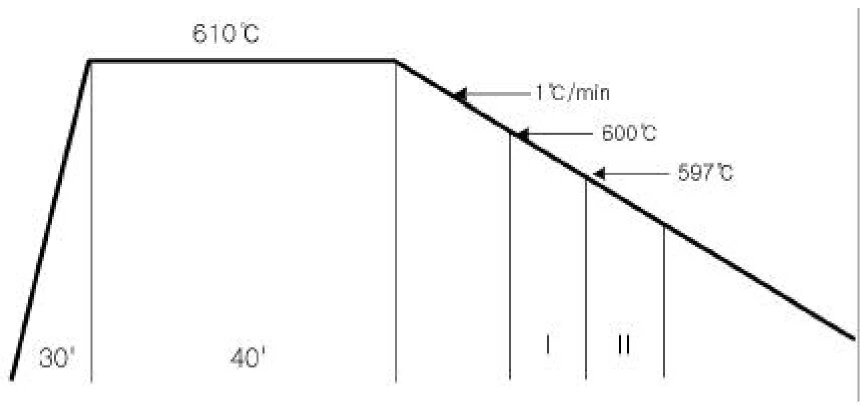


그림 2.6. 2차 재성장 결과.

그림 2.6에서 p+-InGaAs층이 관찰되지 않는데 이는 stain etching시 제거되었기 때문이다. 그리고 성장된 DH웨이퍼에서 3㎛ 폭의 스트라이프 Si3N4 마스크로 패턴을 형성하였다. 고출력에서도 횡모드가 단일모

드로 유지되도록 wet etching과 meltback으로 0.8 1.2㎛ 정도의[61-63] 메사를 형성한 후 p-n-p 전류 차단층을 성장할 때, 활성층 바깥부분으로 흐르는 누설전류를 줄이는 것이 I-L특성의 향상과 고온동작에 상당히 중요하다. 메사를 형성한 후 LPE 장치로 재성장시 p-InP 차단층의 성장 두께에 따라 활성층 주변의 전류 차단층을 통한 누설전류가 결정된다. p-InP 클래드층과 n-InP 전류 차단층, p-InP 차단층과 n-InP 기판이 p-n-p-n 사이리스터를 형성하여 p-InP 클래드층과 p-InP 전류 차단층과의 유효접촉면적에 의해 사이리스터를 통한 누설전류가 결정되고, 특히 고주입 전류와 고온동작에서 사이리스터가 ON되어 누설전류를 급격하게 증가시키게 된다. 이러한 누설전류를 줄이기 위하여 성장시 p-InP 층의 성장 시간으로 접합면의 폭을 조절하여 p-InP층의 두께가 대략 0.5 1㎛ 정도가 되도록 하였다. 3차 재성장을 위해 Si_3N_4 마스크를 6:1 BOE(Buffered Oxide Etchant)로 제거한 후, 열손상 방지용으로 성장된 p+-InGaAs층을 제거하였다. 3차 재성장을 위한 온도 프로그램의 경우 그림 2.7을 이용하여, p-InP의 도핑농도는 $1\times10^{18}cm^{-3}$로 하였으며, 오옴접촉을 위한 p+-InGaAs의 도핑농도는 $2\times10^{19}cm^{-3}$로 하였다.



Ⅰ:p-InP, Ⅱ:p+-InGaAs

그림 2.7. PBH-LD 제작을 위한 온도 프로그램.

3차 재성장에 의해 성장된 웨이퍼의 단면 사진을 그림 2.8에 나타내었다.

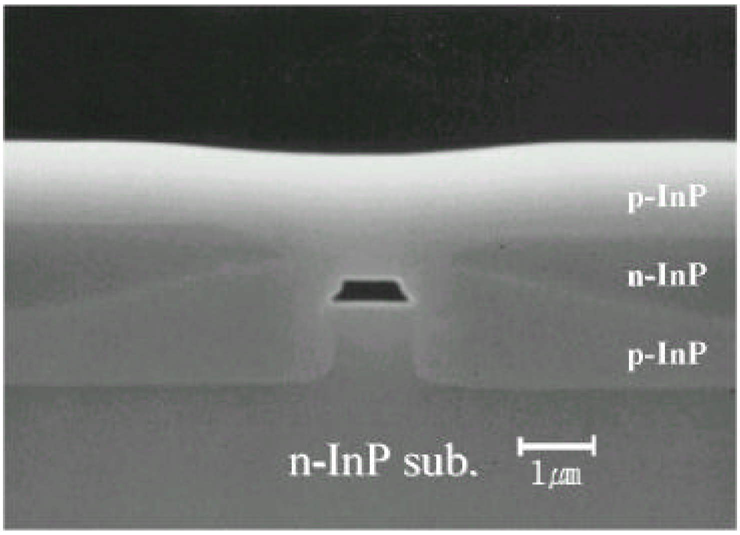


그림 2.8. 3차 재성장에 의해 성장된 웨이퍼의 SEM 단면 사진.

2.2 PBH-LD의 전극 증착

성장된 MQW-PBH 구조의 웨이퍼를 LD로 제작하기 위하여 웨이퍼 표면에 남아 있는 미세한 In drop을 mercury chloride : dimethylformide(2g:10ml)용액으로 제거하였으며, 웨이퍼의 p측 전극으로 Ti(300Å)/Pt(200Å)/Au(4000Å)을 E-beam 증착기로 증착하였다. 이렇게 증착된 전극은 RTA(Rapid Thermal Annealing)장치에서 425℃로 30초간 열처리하였으며, 이 때 분위기 가스는 10% N_2/H_2를 사용하였다. 다음으로 LD의 공진기 거울면을 형성하는데 용이하도록 웨이퍼의 두께를 75㎛ 되게 뒷면을 lapping하였다. Lapping machine은 LOGITEC 제품으로 3㎛ Alumina를 사용하였으며 두께편차는 ±2㎛이다. n측 전극은 Cr(500Å)/Au(5000Å)을 E-beam 증착기를 사용하여 증착시켰으며, 400℃에서 30초간 열처리를 하였다. 그림 2.9

는 제작된 PBH-LD의 단면을 SEM 사진으로 나타낸 것이다.

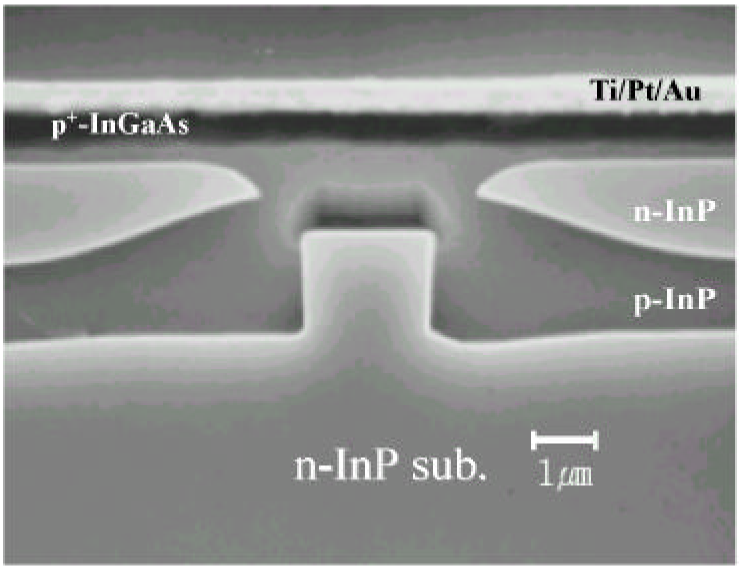


그림 2.9. 제작된 MQW-PBH-LD의 SEM 단면 사진.

제 3 장 PBH-LD의 전기·광학적 특성

3.1 PBH -LD의 전기적특성

그림 3.1은 제작된 PBH-LD의 I-V특성을 나타낸 것이다. 순방향 임계전압이 0.8V이고, 역방향 항복전압은 5.8V정도 되었고 직렬저항은 5Ω정도이었다. 이것은 상용의 1.3㎛ InGaAsP/InP LD가 가지는 I-V 특성을 나타내는 것으로 제작된 LD와 비슷한 특성을 가짐을 알 수 있다.

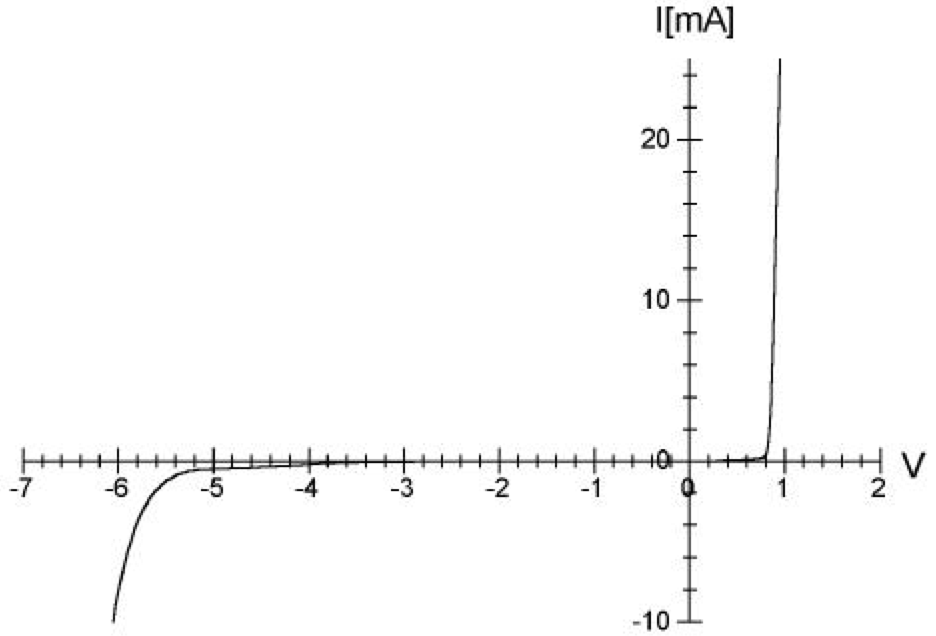


그림 3.1. 제작된 PBH-LD의 I-V 특성.

3.2 PBH-LD의 광학적특성

LD의 I-L특성 측정실험에서는 활성층에서 발생하는 Joule 열의 영향을 줄이기 위하여 펄스 주기 1㎳, 펄스 폭 10㎲로 1% duty cycle인 전류펄

스로 LD를 구동시켰다. 그림 3.2는 I-L특성을 측정하기 위한 장치도이다. 그림에서 40Ω은 임피던스 정합을 위하여 사용된 저항이며, 전류의 모니터링을 위하여 1Ω의 저항을 직렬로 삽입하였다. 또한 온도특성을 측정하기 위하여 열전소자와 열전소자의 온도를 제어하는 온도제어장치를 이용하였다. I-L특성 측정에 사용된 수광소자로는 Ge-APD(직경 80 ㎜)를 사용하였으며, Optical Powermeter(Anritsu, ML9001)를 사용하여 보정하였다. 발진파장을 측정하기 위하여 사용한 분광기는 Fastie-Ebert mount 형태로, 회절자 1㎜당 600grooves이고 600㎚에서 2.0㎛까지의 측정 영역을 가지며, 반사경에서 출사슬릿까지의 초점거리는 275㎜, 분산은 6㎚/㎜이다. 출사슬릿 폭에 대한 분해능은 출사슬릿 폭과 분산의 곱으로 폭 25㎛인 슬릿을 사용하면 약 1Å정도의 분해능을 얻을 수 있다.

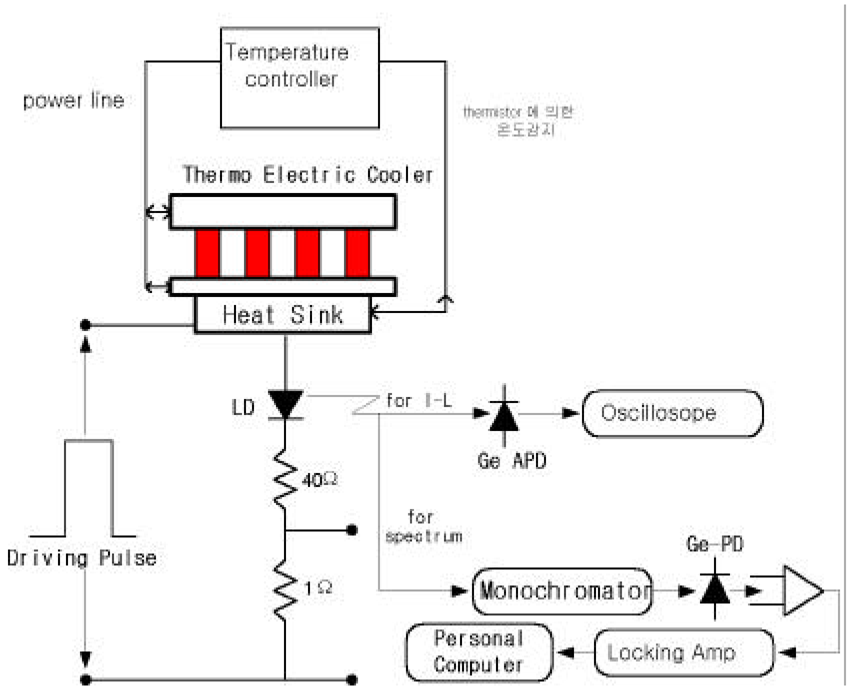


그림 3.2. I-L및 스펙트럼측정을 위하여 구성한 장치도

LD의 I-L특성으로부터 얻어 낼 수 있는 정보들로는 임계전류 Ith 및 Ith

의 온도의존성, 외부양자효율(external differential quantum efficiency) η_d, 내부손실(internal loss) α_{int}, 내부양자효율(internal quantum efficiency) η_i 등이 있다. I_{th}의 온도의존성은 LD를 통신시스템에 적용할 때 중요한 파라미터로서 이득계수 β의 온도의존성[64]이나 누설전류의 온도의존성 때문에 온도에 따라 크게 변화하게 된다. 이러한 I_{th}의 온도의존성은 캐리어의 비발광 재결합, 이종접합계면에서의 캐리어 재결합이나 활성층에서의 Auger 재결합 등 여러 가지 원인으로 분석되고 있으며[65-69], 이와 같은 현상을 조합하여 나타낸 것이 Pankov에 의해 정의된 다음의 식이다[70].

$$I_{th} = I_0 e^{\frac{T}{T_0}} \qquad (3\text{-}1)$$

여기서 I_o는 비례상수이며, T_o는 LD의 특성온도로서 이 값이 클수록 온도 변화에 따라 민감하게 반응하지 않으므로 좋은 특성을 나타내는 것이다. AlGaAs/GaAs계 LD인 경우 특성온도 T_o가 120-160K[71,72]이고, InGaAsP/InP계 LD인 경우는 50-77K[73-76]정도로 알려져 있다. 이와 같은 I_{th}의 온도의존성은 통신시스템에 적용할 경우 레이저 동작의 불안정과 고온 동작여부를 결정하는 중요한 변수이기 때문에 LD 특성조사에 중요한 부분이라 할 수 있다.

한편 η_d, α_{int}, η_i의 값은 LD 개발과정에서 필요한 정보로서 이들 상호간에는 다음과 같은 관계를 가지고 있다. 내부양자효율 η_i는 활성층에 주입된 전자가 광자로 변환되는 효율을 정의한 것으로 다음과 같다.

$$\eta_i = \frac{\text{단위시간당발생광자수}}{\text{단위시간당주입전자수}} = \frac{N/\tau_r}{N(1/\tau_r + 1/\tau_{nr})} = \frac{1}{1 + \tau_r/\tau_{nr}} \qquad (3\text{-}2)$$

여기서 N은 주입전자밀도, τ_r 은 전자의 수명, τ_{nr}은 전자의 비발광 수

명이다. GaAs계 LD의 경우 τ_r은 수 ns, τ_{nr}은 수 μs 이하로 τ_r/τ_{nr}은 무시할 수 있기 때문에 η_i는 1이 된다. 그러나 InGaAsP계 LD는 공진기 내부손실 등으로 인하여 내부양자효율이 60 90%정도인 것으로 알려져 있다. 미분양자효율 η_d는 Ith 이상에서 입력전력 증가량에 따른 광출력 증가량의 비로서 다음과 같은 식으로 정의된다[77].

$$\eta_d = \frac{\text{외부로 방출되는 광자의 증가분}}{\text{주입전자 증가분}} = \frac{dP/\hbar\omega}{dI/q} = \frac{\Delta P}{\frac{E_g}{q}\Delta I} \tag{3-3}$$

식 (3-3)에서 ΔI는 전류의 미소변화이며, ΔP는 출력광의 미소변화를 나타낸다. η_i는 식 (3-2)와 같이 주어지는 내부양자효율이며, 거울면 손실 α_m은 ln(1/R)/L로서 L은 공진기의 길이, R은 거울면의 반사율을 나타낸다. 그리고 α_{int}는 활성층과 클래드층에서의 내부손실의 합을 나타내는 것으로 이 손실은 온도에 따라 변하기 때문에 η_d 역시 온도의존성을 가지며, 온도가 증가할수록 α_{int}는 증가하고 η_d는 감소하는 것으로 알려져 있다 . 또, η_d는 식 (3-3)과 달리 식 (3-4)에 나타낸 것처럼 η_i, α_m, α_{int}의 관계로 표현될 수 있다.

$$\eta_d = \eta_i \frac{\alpha_m}{\alpha_m + \alpha_{int}} \tag{3-4}$$

식 (3-4)에 α_m=ln(1/R)/L을 대입한 후 양변의 값에 역수를 취하면 식 (3-5)와 같이된다. I-L 특성과 식 (3-3)으로부터 공진기의 길이 변화에 따른 η_d 를 측정하여 L=0인 지점에서 η_i를 결정할 수 있다.

$$\frac{1}{\eta_d} = \frac{1}{\eta_i}\left(1 + \frac{\alpha_{int} L}{\ln\frac{1}{R}}\right) \tag{3-5}$$

이와 같이 결정된 η_i와 식 (3-5)로부터 α_{int}를 구할 수 있다. 그림 3.3은 제작된 PBH-LD의 공진기 길이에 따른 I-L 특성 변화를 측정한 결과이

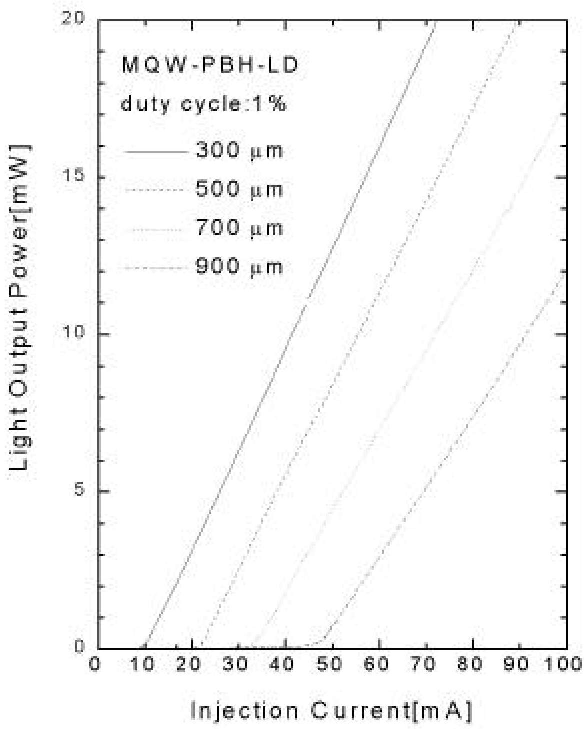


그림 3.3. 제작된 LD의 공진기 길이에 따른 I-L특성측정

다. Ith는 그림으로부터 공진기 길이가 300㎛일때 10㎃로서 일반적인 PBH-LD들과 유사한 값으로 나타났다. 이 그림으로부터 광출력이 20㎽에 이를 때까지 다중 측모드 동작에 의한 kink현상[78,79]이 일어나지 않음을 알 수 있다. 그림 3.4에는 제작된 PBH-LD의 활성층 내부양자효율과 내부손실을 구하기 위해 공진기 길이에 따른 미분양자효율의 역수를 나타내었다. 그림 3.4에 나타난 바와 같이 내부양자효율 η_i = 82%로서 캐리어의 주입효율이 우수하며, 활성층의 특성이 우수한 것으로 추정할 수 있다. 그리고 내부손실은 9.2cm-1로서 일반적인 PBH-LD의 내부손실과 비슷하다는 것을 알 수 있다.

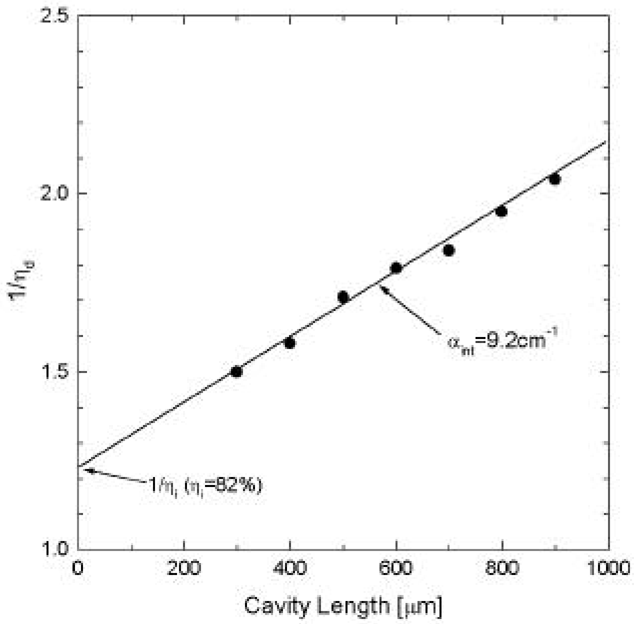


그림 3.4. 공진기 길이에 따른 외부양자효율의 역수의 변화

그림 3.5는 공진기 길이가 375㎛일 때 온도에 따른 I-L곡선을 나타낸 것으로 그림으로부터 온도가 상승함에 따라 Ith가 증가함을 알 수 있다.

한편 식 (3-1)로 기술되는 Ith로부터 특성온도를 구할 수 있으며, 특성온도 T0는 20℃에서 45℃까지는 65K로 나타났으며, 45℃에서 65℃사이에서는 42K인 것으로 나타났다. 그림 3.6은 온도에 따른 Ith의 변화를 나타낸 것이다. 이 그림에서 실선은 온도에 따른 Ith를 측정하여 To를 계산한 곡선이다.

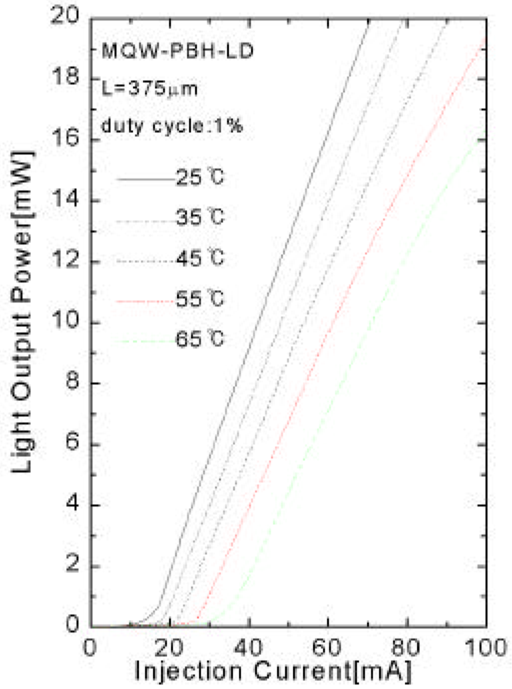


그림 3.5. 온도에 따른 I-L 특성측정.

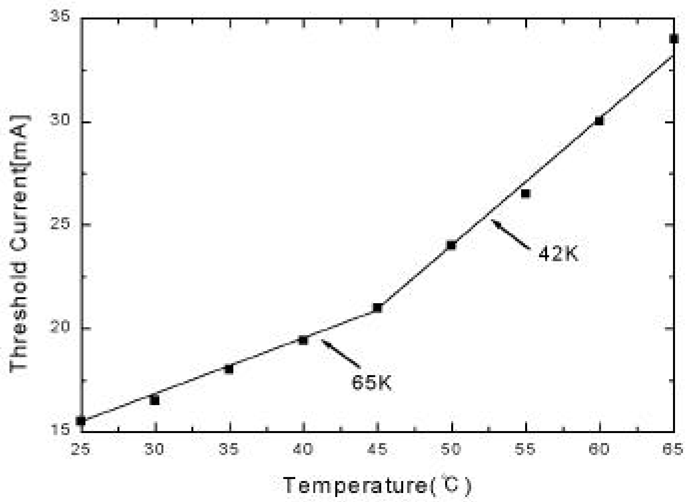


그림 3.6. 온도에 따른 Ith의 변화.

3.3 MQW-PBH-LD의 발진파장특성

LD를 제작한 후 I-V 특성을 조사하여 전기적인 동작상태를 확인하고, 이어서 I-L과 발광스펙트럼특성을 측정하여 활성영역을 구성하고 있는 재료의 종류 및 굴절률, 모드의 양상, 그리고 발진파장의 온도 및 동작전류에 대한 의존성 등을 조사하였다. 이들 가운데 발진파장 및 파장의 온도의존성은 통신시스템 설계의 참고가 되는 LD의 중요한 규격 요소이다. 그림 3.7은 제작된 PBH-LD의 I-L특성 및 주입전류에 따른 스펙트럼을 측정한 그래프이다.

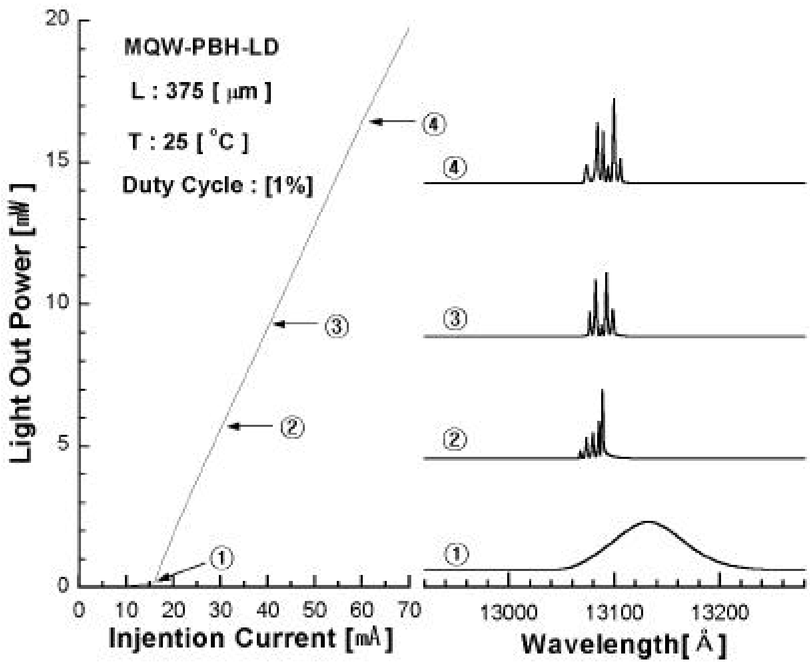


그림 3.7. 제작된 MQW-PBH-LD의 I-L특성과 주입전류에 따른 스펙트럼 특성.

그림에서 ①은 임계전류 이하인 15mA에서 측정한 것으로 스펙트럼 영역이 13050 13220Å 정도로 나타났고, 자연방출을 하고 있음을 알 수

있다. ②는 30mA의 전류에서 25㎛ 슬릿을 사용하여 측정한 것으로 파장영역이 13050 13090Å으로 나타났다. ③은 약40mA의 전류를 인가하여 측정한 것으로 파장영역이 13074 13100Å으로 나타났으며, ①의 스펙트럼 영역과 비교해 볼 때 스펙트럼의 중심영역인 약 13134Å보다 좌측에서 반도체 레이저가 발진함을 알 수 있다. ④는 60mA의 전류를 인가하여 측정한 것으로 발진파장영역이 13065 13108Å 임을 알 수 있다. 이와 같은 결과로부터 전류를 증가시킬수록 이득대역이 넓어지고, 이득 최대값을 가지는 파장의 이동으로 인해 발진모드가 증가하는 것을 관측할 수 있었다. 또한 주입전류의 증가에 의하여 밴드갭 에너지 Eg가 감소하여 장파장쪽으로 이득이 이동되는 것을 볼 수 있다.

그림 3.8에는 PBH-LD의 스펙트럼이 나타나 있다. 25℃에서 2Ith로 측정하였으며, 발진스펙트럼 간격은 $\Delta\lambda$=4.98Å 정도였다.

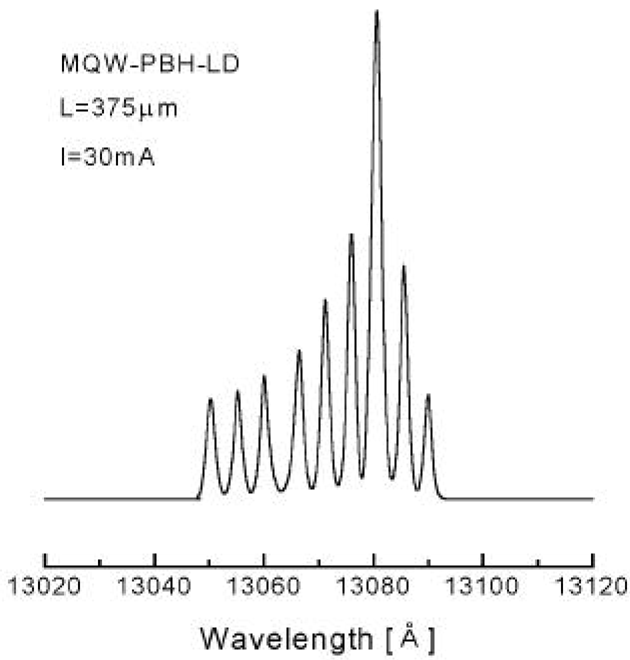


그림 3.8. FP 모드간격을 측정하기 위한 발진스펙트럼.

LD 공진기의 길이를 L이라 할 때 전자파의 Fabry-Perot 공진모드와 공진기의 길이 L과는 다음과 같은 관계가 있다[80].

$$L = \frac{1}{2}\frac{m\lambda_0}{n_{eq}} \qquad (3\text{-}6)$$

여기서 m은 공진모드 수, n_{eq}는 등가굴절률(equivalent refractive index)이다. 이 식으로부터 공진모드의 파장간격은 다음 식으로 주어진다.

$$\Delta\lambda = -\frac{\lambda_0^2}{2n_{eff}L} \qquad (3\text{-}7)$$

여기서 n_{eff}는 파장분산을 고려한 유효굴절률(effective refractive index)로서[81,82] 다음과 같이 주어진다.

$$n_{eff} = n_{eq}\left(1 - \frac{\lambda_0}{n_{eq}}\frac{dn_{eq}}{d\lambda}\Big|_{\lambda=\lambda_0}\right) \qquad (3\text{-}8)$$

여기서 n_{eq}는 광이 활성층과 클래드층에 분포되어 있음으로 인해 도파되는 광이 느끼는 등가굴절률이다. 그림 3.8에서 13050Å 13090Å 파장 근처에서의 $\Delta\lambda$=4.98Å 정도이며, 산술평균 하면 λ_0=13066Å으로 공진기 길이가 375㎛이므로 LD의 공진기의 유효굴절률을 추정하면 식 (3-8)으로 부터 n_{eff} =4.57이 얻어진다. 한편 1.3㎛ InGaAsP의 등가굴절률이 3.52이므로 식 (3-8)으로부터 굴절률 분산을 계산하면 $\Delta n_{eq}/\Delta\lambda$는 -7580Å-1 이 된다.

그리고 제작된 PBH-LD의 온도에 따른 스펙트럼 변화를 분석해봄으로써 온도에 따른 파장 안정도를 측정하였다. 온도에 따른 발진파장의 온도 특성을 살펴보면, FP 공진기를 가진 LD의 공진 조건에서 다음 관계

식이 성립한다.

$$2\beta L = 2m\pi \tag{3-9}$$

여기서 전파정수 $\beta=2\pi n_{eq}/\lambda$이고, m은 공진모드 수로서 일반적인 LD의 경우 1800 2000개 정도 존재하게 된다. 식 (3-9)로부터 FP 모드로 발진하는 경우 온도특성을 구하면 다음 식과 같이 된다[83,84].

$$\frac{d\lambda}{dT} = \frac{2n_{eq}}{q}\frac{dL}{dT} + \frac{2L}{q}\frac{\partial n_{eq}}{\partial T} + \frac{2L}{q}\frac{\partial n_{eq}}{\partial \lambda}\frac{d\lambda}{dT} \tag{3-10}$$

식 (3-10)에서 우변의 첫 항은 공진기 길이의 열팽창에 의한 변화를 나타낸 것으로서, 식의 우변 첫항의 dL/dT가 10-6 10-5 정도로 다른 항에 비하여 상당히 작기 때문에 무시할 수 있다[82]. 따라서 식 (3-10)을 근사화하면 식 (3-11)과 같이 된다.

$$\frac{d\lambda}{dT} = \frac{\lambda}{n_{eff}}\left(\frac{\partial n_{eq}}{\partial T}\right) \simeq \frac{\lambda}{n_{eff}}\left(\frac{\partial n}{\partial T}\right) \tag{3-11}$$

식 (3-11)에서 발진 스펙트럼의 온도변화는 굴절률의 온도변화에 기인한다는 사실을 알 수 있다. 그러나 FP 공진기형 LD는 공진모드 간의 손실 차이가 나지 않기 때문에 레이저의 매질 이득이 큰 모드만 발진하게 된다. 레이저 이득이 최대로 되면 파장의 온도변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\lambda}{dT} = -\frac{hc}{E_g^2}\left(\frac{\partial E_g}{\partial T}\right) \tag{3-12}$$

여기서 h는 플랑크 상수이고, c는 광속을 의미한다. 식 (3-12)의 온도변화는 식 (3-11)의 FP 모드가 가지는 온도변화에 비해 크기 때문에 통상의 LD는 밴드갭 에너지의 온도변화에 의존하게 된다. InGaAsP/InP DH 레이저의 경우, 온도변화에 의한 굴절률의 변화에 따른 발진파장의 온도변화는 약 1Å/℃이며[65], 밴드갭 에너지가 온도에 따라 변화하기 때문에 생기는 발진파장의 온도의존성은 약 5 9Å/℃ 정도로 알려져 있다.
그림 3.9는 PBH-LD의 온도에 따른 스펙트럼 변화를 나타낸 것으로, 동

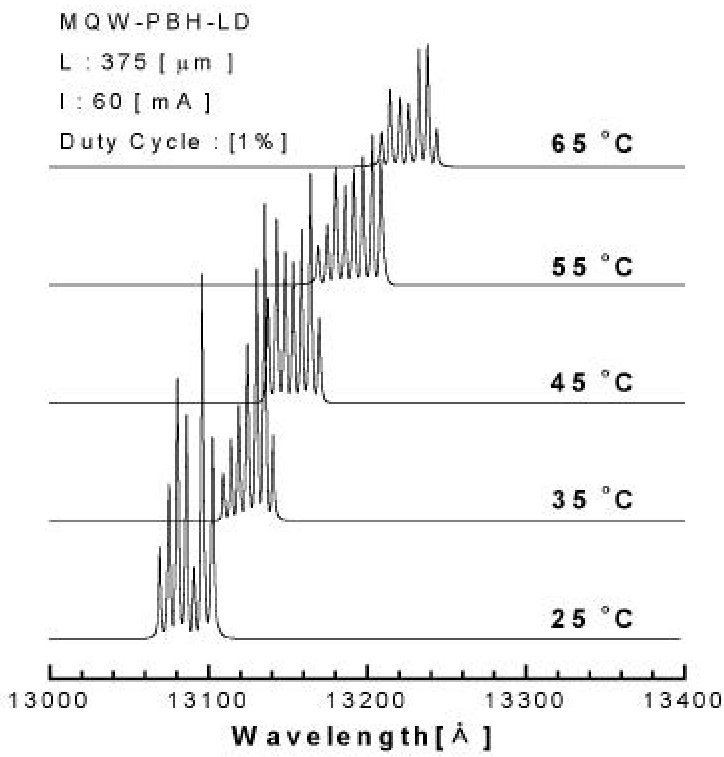


그림 3.9. 제작된 PBH-LD의 온도에 따른 발진 스펙트럼 특성.

작전류는 4Ith이며, 주입전류에 의한 주울 열의 영향을 줄이기 위하여 1% duty cycle로 측정하였다. 측정결과 각 온도에 따라 발진모드의 스펙트럼 영역이 온도가 증가할수록 장파장 쪽으로 이동함을 알 수 있다. 이

것은 FP-LD가 온도가 증가할수록 밴드갭 에너지 Eg의 감소에 의해 장파장 쪽으로 이동하는 것을 나타낸다. 그림 3.10은 그림 3.9에서 측정한 스펙트럼에 대해 온도에 따라 발진 중심파장을 표시한 것으로 온도에 따른 파장 변화율은 5.8Å/℃이었다. 이 값은 일반적인 DH-LD의 5 9Å/℃[86]에 포함되는 값이다. 그러므로 제작된 InGaAsP/InP PBH-LD가 상당히 우수한 특성을 가진다는 것을 알 수 있다. 그리고 발광 스펙트럼에서 굴절률 변화에 따른 발광모드의 온도의존성은 통상의 1Å/℃와 비슷한 1.06Å/℃로 나타났다. 따라서 온도변화에 따른 밴드갭 에너지의 변화에 기인ㅎ

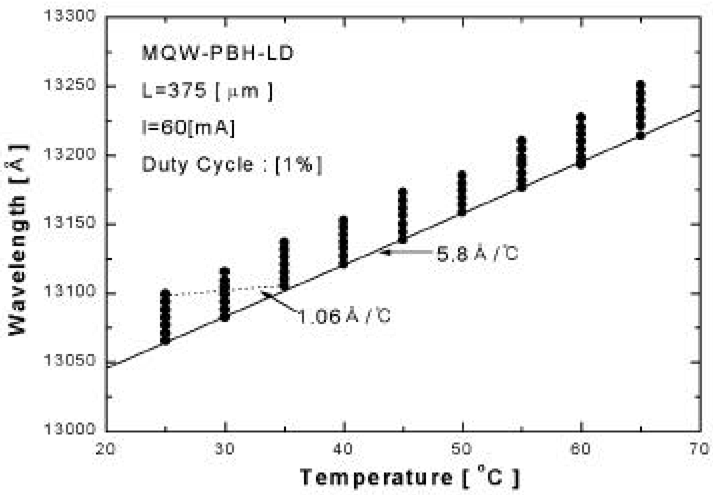


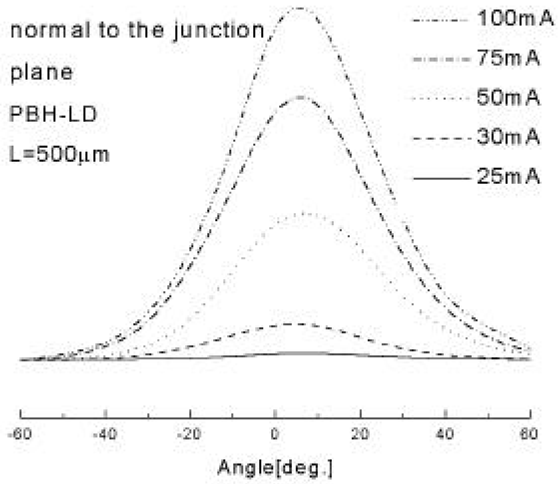
그림 3.10. 온도에 따른 파장특성

변화량을 뺀 값이므로 4.74Å/℃가 된다. 그리고 식 (3-12)에서 온도에 따른 밴드갭 에너지 변화(∂Eg/∂T)를 알아보기 위하여 Eg(Eg=1.24[eV·㎛]/λ)를 구해보면 λ=1.3㎛일때 0.953eV가 된다. 이 값을 식 (3-12)에 대입하면 온도에 따른 에너지 갭의 변화(∂Eg/∂T)는 -3.467×10-4eV/℃가 된다.

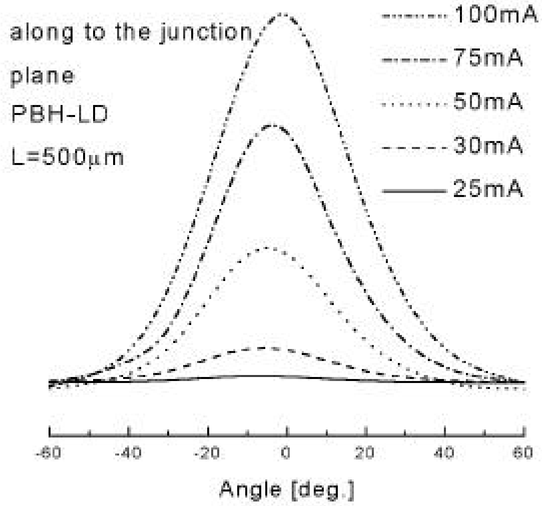
3.4 Far Field Pattern의 측정

도파관의 출력단으로부터 떨어진 면에서의 전계 분포를 Far Field Pattern(FFP)이라 하며, near-field pattern의 퓨리에 변환에 의하여 얻을 수 있다. 실험적인 관점에서는 주로 LD의 광의 복사 pattern의 특성을 측정하는 것이 된다. LD의 복사 패턴인 FFP의 특성은 LD의 횡모드와 측모드에 관련되며, 특히 복사각도는 아주 중요한 파라미터로 광섬유 도파관이나 기타의 광학적인 부분들과 같은 외부 광도파로와 LD 사이의 광결합 효율과 관계된다.

따라서 결합효율을 높이기 위해서는 단일모드로 동작해야 하며, 이를 확인하기 위하여 제작된 PBH-LD의 FFP를 측정하였다. 이때 접합면에 수직방향과 수평방향에 대한 복사각도를 측정하였는데 수직방향의 복사각도와 수평방향의 복사각도가 거의 비슷한 값을 가졌다. 그림 3.11에 측정된 복사패턴을 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 접합면에 수평인 경우 FWHM(Full Width Half Maximum)이 35o이었으며, 수직인 경우는 40o이었다. 또한 전류를 6Ith까지 증가시키면서 측정한 결과 측방향과 횡방향 모두 단일모드로 동작함을 알 수 있었다.



(a) **접합면의 수직방향** FFP



(b) **접합면의 수평방향** FFP

그림 3.11. PBH-LD**의** FFP

제 4 장 PBH-LD의 누설전류 해석

InGaAsP/InP PBH-LD는 BH 소자 중의 하나로 저 임계 전류, 단일 횡 모드 동작, 선형 광출력, 좁은 선폭 등의 특징을 가지고 있다[87]. 다른 종류의 LD에 비해 낮은 임계 전류를 가지고 있지만, 활성층 이외의 p-n 다이오드와 p-n-p-n 사이리스터와 같은 누설 경로를 가지고 있기 때문에 높은 주입 전류에서는 이들의 영향으로 인해 레이저 다이오드의 성능에 나쁜 영향을 미친다. 따라서, 가능한 누설 폭을 줄여주는 것이 좋다.

누설전류의 영향을 알아보기 위해 누설 폭이 “0”일 때 LD의 임계전류와 누설 폭을 가지는 제작된 PBH-LD의 임계전류를 비교하였다. 그림 4.1은 PBH-LD의 단면 구조와 등가 회로를 나타낸 것이다.

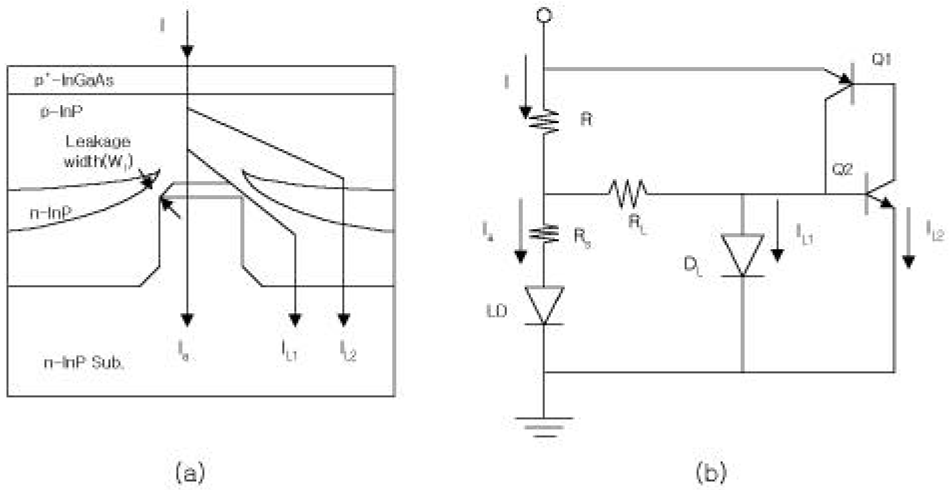


그림 4.1. (a) PBH-LD의 단면 구조, (b) PBH-LD의 등가 회로.

활성층과 n-InP 차단층 간의 최소 거리는 그림 4.1(a)에서처럼 누설 폭 Wl로 간주한다. 두 개의 주요한 누설 경로를 통하여 흐르는 전류는 그림 4.1(a)에서 IL1과 IL2로 나타내었다. 다이오드 누설 성분(IL1)은 p-n 순방향

바이어스 동종접합을 통해 흐르는 전류(그림 4.1(b)의 DL ; p-InP 차단층과 n-기판으로 구성)이고, 사이리스터 누설 성분(I_{L2})은 p-n-p-n 사이리스터(그림 4.1(b)의 Q1과 Q2로 나타낸 ; p-InP 클래드층, n-InP 차단층, p-InP 차단층, 그리고 n-InP 기판으로 구성)를 통해서 흐르는 전류이다. 그림 4-1(b)에서 I, I_a, Rs 그리고 RL은 각각 총 주입전류, 활성층의 주입 전류, LD의 직렬 저항, 그리고 누설 경로의 저항을 나타낸다. 등가회로에서, 다이오드와 사이리스터를 통해 흐르는 누설 전류를 결정하는 주요 파라메타는 누설 저항 RL이고, 이는 1/Wl에 비례한다.

MQW-LD에 있어서 이득은 캐리어 밀도, 즉 주입 전류밀도에 따라 대수적으로 증가하게 되므로, 양자우물 당 광이득 g는 다음과 같이 근사식으로 나타낼 수 있다[88].

$$g \quad \beta J_0 ln(J/J_0) \qquad (4\text{-}1)$$

식 (4-1)에서 J_0는 투명전류밀도(transparency current density)를 나타내며, β는 이득상수(gain constant)로서, 이 값들은 성장된 에피층의 질과 활성층의 구조에 따라 변화하게 된다. 양자 우물층 개수 N_w의 경우 발진 임계전류에서 순이득(net gain) G_{th}는 거울면에 의한 손실 α_m과 내부 손실 α_{int}와 같게 되므로 다음 식으로 주어진다.

$$G_{th} = N_w g_{th} = \alpha_{int} + \alpha_m = \alpha_{int} + \frac{1}{L}\ln\left(\frac{1}{R}\right) \qquad (4\text{-}2)$$

여기서, Γ_w는 양자 우물층 1개당 광가둠 계수[89-91]를 나타내며, L은 공진기 길이, R은 공진기의 양쪽 거울면에서의 반사율, g_{th}는 임계 광이득을 나타낸다. 주입된 전체 캐리어가 활성층 내에서 광자로 변환되는 캐리어의 변환 효율 즉 내부양자효율 η_i를 고려하여, 식 (4-2)를 식 (4-1)

에 대입하면 발진 임계전류밀도는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$J_{th0} = \left(\frac{J_o N_w}{\eta_i} \right) exp \left(\frac{\alpha_{int} + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{R} \right)}{\beta J_0 N_w \Gamma_w} \right) \qquad (4-3)$$

일반적으로 발진 임계전류는 발진 임계전류밀도에 활성층의 면적을 곱하여 얻을 수 있는데, 활성층 폭과 길이를 각각 W와 L로 표시하여 식 (4-3)을 다시 쓰면 식 (4-4)와 같다[61].

$$I_{th0} = \left(\frac{WL\ J_o N_w}{\eta_i} \right) exp \left(\frac{\alpha_{int} + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{R} \right)}{\beta J_0 N_w \Gamma_w} \right) \qquad (4-4)$$

식 (4-4)에서 활성층에 대한 발진 임계전류 Ith0는 공진기 길이에 따라 선형적으로 증가함과 동시에 지수적으로 감소함을 알 수 있다.

다음으로 실제 소자로서 동작하는 LD의 경우 그림 4.1에서 p-n-p-n 사이리스터는 “off" 상태이므로, 그림 4.1(b)에 나타낸 등가 회로를 보다 더 간단하게 하여 총 주입 전류 대 활성층 영역으로 주입되는 전류의 관계를 알아보았다. 그림 4.2에는 그림 4.1을 간단하게 표현한 LD의 단면 구조와 등가 회로를 나타내었다. LD의 특성을 측정할 경우 온도 제어장치에 의해 일정한 온도를 유지하고 있으므로, 이 등가 회로에서는 온도에 대한 영향을 고려하지 않았다. 활성층으로 주입된 전류와 누설 경로를 통한 누설전류만을 고려한 등가 모델을 이용하여 임계전류가 어떻게 변화하는지를 알아보았다. 공진기 길이 L, 활성층 폭 Wa, 활성층으로 주입되는 전류는 Ia, 누설 경로를 통해 흐르는 전류는 IL이고, 누설 폭이 최소일 때를 Wlmin이라 하고, 최대일 때를 Wlmax로 하였다. 총 전류 I는 그림 4.2(b)에서와 같이 활성층으로의 전류 Ia와 누설 경로를 통한 전류 IL로 표현될 수 있다. 따라서,

I=Ia+IL (4-5)

이다.

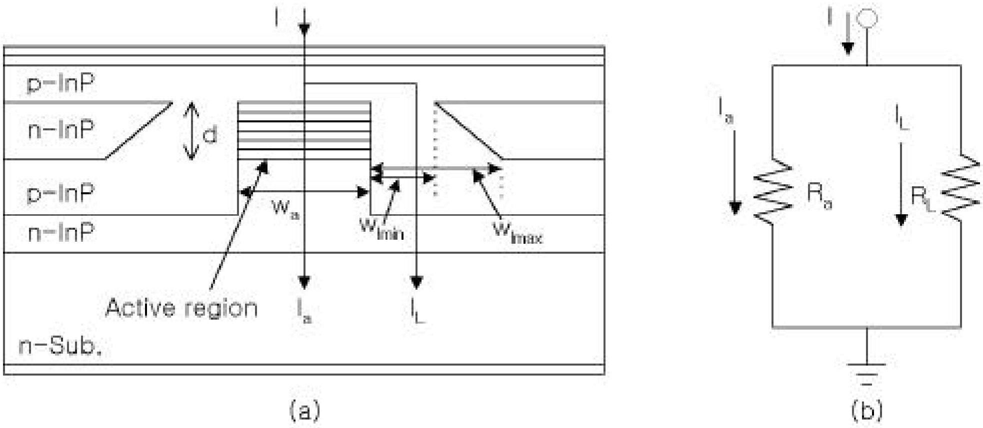


그림 4.2. (a) PBH-LD의 단면 구조, (b) 단순화시킨 등가 회로.

여기서, $R_a=\rho_a d/(W_a L)$, $R_L=\rho_l d/(W_{lmin} L)$이므로, Ia와 IL을 다시 정리하면 식 (4-6), (4-7)과 같다. ρ_a와 ρ_l은 각각 활성층과 p-InP 차단층의 고유 저항을 나타낸다. 그리고 d는 적분을 하는 구간의 n-InP 층 두께이다.

$$I_a = \frac{L}{\rho_a}\frac{W_a}{d}V \quad (4\text{-}6)$$

$$I_L = 2\frac{L}{\rho_l}\frac{W_{lmin}}{d}V + 2\int_{W_{lmin}}^{W_{lmax}}\frac{LV}{\rho_l}\frac{1}{\sqrt{d^2+x^2}}dx \quad (4\text{-}7)$$

따라서, 식 (4-6), (4-7)을 식 (4-5)에 대입하여 정리하면

$$I = \frac{L}{\rho_a}\frac{W_a}{d}V + 2\frac{L}{\rho_l}\frac{W_{lmin}}{d}V + 2\int_{W_{lmin}}^{W_{lmax}}\frac{LV}{\rho_l}\frac{1}{\sqrt{d^2+x^2}}dx \quad (4\text{-}8)$$

이다. 식 (4-8)의 양변을 Ia로 나누어주면, 총 주입전류에 대한 활성층으로 흐르는 주입전류의 비를 식 (4-9)로부터 구할 수 있다.

$$I/I_a = 1 + 2\frac{W_{lmin}/W_a}{\rho_l/\rho_a} + \frac{2}{W_a}\int_{W_{lmin}}^{W_{lmax}} \frac{\rho_a}{\rho_l}\frac{d}{\sqrt{d^2+x^2}}\,dx \qquad (4\text{-}9)$$

그림 4.2(b)와 식 (4-9)에서 총 주입전류 I가 누설 폭을 가지는 LD의 임계전류이고, 활성층으로 주입되는 전류 Ia는 누설 폭이 없는 LD의 임계전류라고 한다면 Ia는 Ith0와 같다고 볼 수 있으므로 식 (4-9)를 다음과 같이 바꾸어 표현할 수 있다.

$$I_{th} = \left(1 + 2\frac{W_{lmin}/W_a}{\rho_l/\rho_a} + \frac{2}{W_a}\int_{W_{lmin}}^{W_{lmax}} \frac{\rho_a}{\rho_l}\frac{d}{\sqrt{d^2+x^2}}\,dx\right)\cdot\left(\frac{WL\,J_oN_w}{\eta_i}\right) \qquad (4\text{-}10)$$
$$\times exp\left(\frac{\alpha_{int} + \frac{1}{L}\ln\left(\frac{1}{R}\right)}{\beta J_0 N_w \Gamma_w}\right)$$

여기서, LD의 총 임계전류를 Ith, 누설 폭이 없을 때의 임계전류를 Ith0로 다시 표기하였으며, 총 임계전류 및 누설 폭이 “0”일 때의 임계전류로서 첨자를 th 및 th0로 나타내었다. 누설 폭에 따라서 임계전류 값을 식 (4-10)을 이용하여 그림 4.3에 나타내었다. 그림 4.3에서 활성층과 p-InP 차단층의 고유저항 비인 ρl/ρa를 1이라고 가정하고 누설 폭의 변화에 대해 임계전류값을 나타내었다.

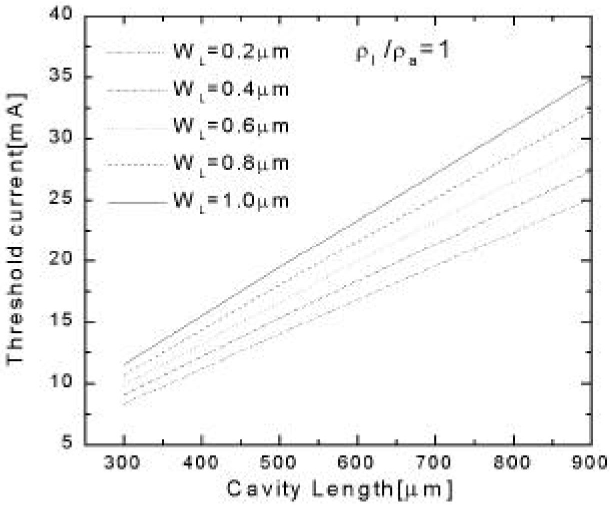
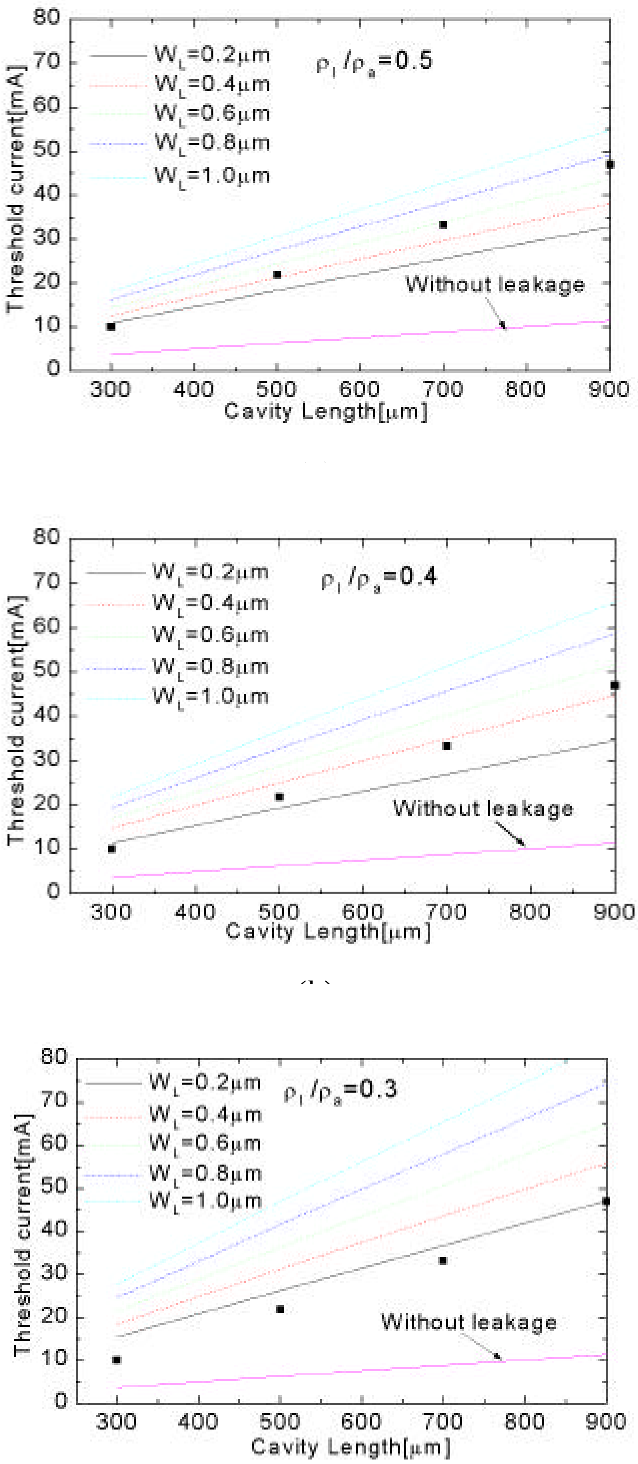


그림 4.3. **누설 폭에 따른 임계 전류**.

그리고 InGaAsP **활성층과** p-InP **층의 고유저항을 정확하게 계산하기는 어려우므로 이 값을 변수로 하여** ρ_l/ρ_a**의 값이** 0.3 0.5**로 변화할 때의 임계전류 변화를 식** (4-10)**을 이용하여 그림** 4.4**에 나타내었다**. **그림** 4.4**에서 각 점**(■)**들은 공진기 길이에 따른 측정된 임계전류 값들로서**, **본 연구에서 제작한** LD**는** W_a=1.4㎛, W_L=0.6㎛**의 값을 가진다**. **그리고** I_{th0}**는 누설 폭이** "0"**일 때의 임계전류를 나타낸다**. **제작된** PBH-LD**의 임계전류와 누설이 없을 때의 임계전류를 비교해 본 결과**, ρ_l/ρ_a=0.5**인 값과 비슷하게 나타났다**. **그림** 4.4**에서 보면 누설 폭을 줄이거나 고유저항 비를 크게 하면 임계전류는 감소한다는 사실을 알 수 있다**. **제작된** PBH-LD**에서처럼 누설 폭이** 0.6㎛ **정도의 값을 가지더라도 고유저항 비를 크게 하면 임계전류가 낮아질 것으로 생각된다**.



(c)

그림 4.4. ρl/ρa**의 변화에 따른 임계전류의 변화**.

따라서, 고유저항 비의 값을 0.8, 1.0, 2.0, 5.0, 10으로 변화하면서 임계전류의 변화를 그림 4.5에 나타내었다.

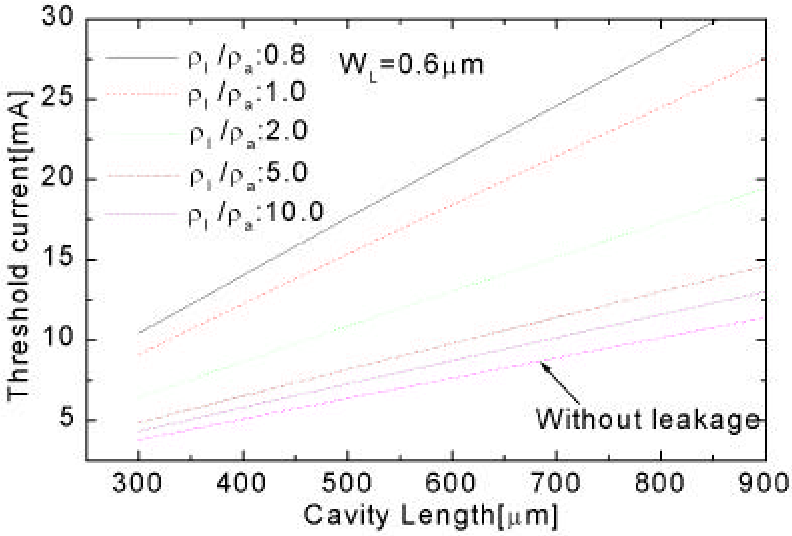
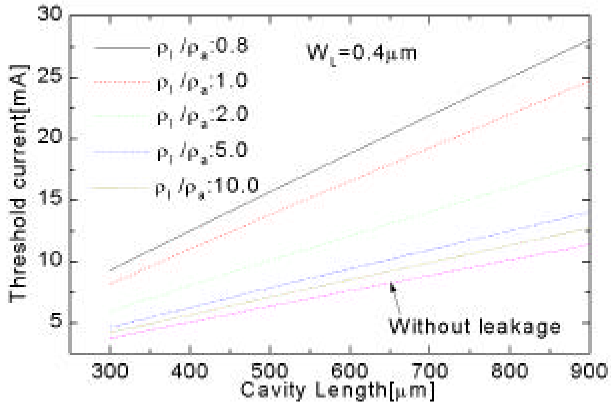
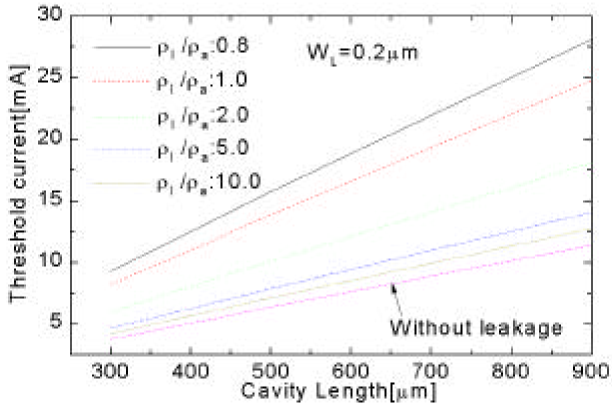
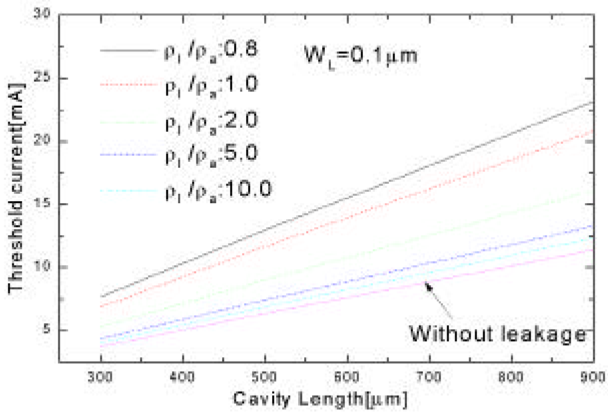


그림 4.5. WL=0.6㎛일 때의 임계전류.

그림 4.5에서처럼 고유저항 비를 크게 하면 누설 영역의 저항을 크게 하는 것이 되므로 전류는 활성층으로 더 많이 흐르게 되어 누설전류가 줄어들게 된다. 그리고 고유저항 비가 크게 되면 전체 기울기도 낮아지게 되므로 공진기 길이가 증가함에 따라 누설전류의 값도 적어지게 된다. 따라서, 본 논문에서 제작된 PBH-LD의 p-InP 차단층은 약 1×1018cm-3의 도핑 농도를 가지는데, 이 값을 1017cm-3정도로 줄이면 누설 영역의 저항을 크게 함으로써 누설전류를 더 줄일 수 있을 것이다. 또, LD 제작에 있어서 누설 폭을 줄이면 임계전류가 줄어들게 되므로 누설 폭이 0.4㎛, 0.2㎛, 0.1㎛인 경우, 임계전류는 어떻게 변화하는지를 그림 4.6에 나타내었다. 그림 4.6에서 보는 것처럼 누설 폭이 작으면 작을수록 임계







(c)

그림 4.6. **누설 폭에 따른 임계전류**.

전류가 누설 폭이 “0”일 때의 임계전류인 Ith0에 접근함을 알 수 있다. LPE 장치와 기술상의 한계로 누설 폭을 0.1㎛까지 줄이기는 힘들 것이다. 그러나, 그림 4.6에서 보는 것처럼 전류 차단층의 도핑 농도를 작게 함으로써 차단층의 저항을 크게 하기는 쉽다.

따라서, 각 층의 성장 과정에서 성장 시간 및 성장 온도를 정밀하게 제어하여 누설 폭을 최소화함과 동시에 p-InP 전류 차단층의 도핑 농도를 줄여줌으로써 낮은 임계전류로 동작하는 LD를 제작할 수 있을 것이다.

제 4 장 결론

본 논문에서는 본 연구실에서 직접 제작하여 운용 중인 수직형 LPE장치를 이용하여 고성능 광소자인 PBH-LD를 meltback 방법을 이용하여 제작하였다. meltback 방법으로 메사 모양을 형성할 경우 재성장시 발생할 수 있는 메사 계면의 열손상과 메사 모양의 형성시 기판의 화학적 에칭에 의한 기판의 손상을 줄일 수 있는 이점이 있다. 또한 높은 온도(600℃)에서 전류 차단층을 형성할 수 있기 때문에 양질의 에피층을 형성할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 특성을 가지는 meltback 방법을 이용하여 고성능 광소자를 제작하기 위해 meltback 용액과 meltback 온도에 따른 여러 특성을 조사하여 최적의 meltback 용액과 온도를 구하였다. 그 결과 고성능의 PBH LD제작을 위해서는 화학에칭과 meltback 방법을 동시에 이용해야 함을 확인하였다. 그래서 화학에칭과 meltback 방법을 이용하여 메사 모양을 형성하고 연속적인 전류 차단층을 형성하였다. meltback 온도가 610℃로 높기 때문에 meltback 후 성장된 전류 차단층의 에피특성도 우수할 것으로 생각된다. 그리고 제작된 LD가 측방향 단일모드로 동작하기 위해 활성층의 폭을 0.8 1.2㎛ 정도 되게 제어하였다. 그리고 전류차단층의 누설전류를 줄이기 위해 p-InP층은 약 1.2㎛, n-InP층은 약 1.6㎛ 성장하였다.

이렇게 제작된 MQW-PBH-LD의 전기 광학적 특성을 조사한 결과, 저전류 고성능으로 동작함을 확인하였다. 공진기 길이가 300㎛일 때 임계전류는 10mA, 내부양자효율은 82%, 내부손실은 9.2cm-1, 특성온도는 65K였다. 그리고 FFP을 측정한 결과, 주입전류를 6Ith까지 가했을 때에도 접합면의 수직방향과 수평방향 모두 단일모드로 동작하였으며, FWHM은 수평의 경우 35o이고, 수직은 40o이었다. 그리고 공진기 길이에 따라서 누설 폭을 달리하면서 임계전류의 변화를 확인해 본 결과, 누설 폭을 줄이

거나 고유저항 비를 크게 하면 임계전류가 낮아진다는 것을 확인하였다. 또, 누설 폭이 없는 경우의 계산된 임계전류와 누설 폭을 가지는 PBH-LD의 측정된 임계전류를 비교하였다. 측정된 LD의 활성층 폭 W_a=1.4㎛, 누설 폭은 약 0.6㎛로서, 고유저항 비는 약 0.5와 비슷하였다. 낮은 임계전류를 가지는 PBH-LD를 제작하기 위해서는 각 층의 성장과정에 있어서 정밀한 성장 시간 및 성장 온도의 제어를 통해서 누설 폭을 최소화하여야 한다. 또, LPE 장비와 기술상의 한계에 의해 누설 폭을 가지더라도 p-InP 차단층의 저항을 크게 해줌으로써 누설전류를 줄일 수 있다. 이 저항은 도핑 농도를 줄여주면 크게 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서 제작된 PBH-LD의 p-InP 차단층의 도핑 농도는 $10^{18}cm^{-3}$이지만, 이 도핑 농도를 $10^{17}cm^{-3}$으로 줄여주면 측정된 값보다 더 임계전류를 줄일 수 있을 것으로 기대한다.

이상과 같이 본 연구실에서 자체 제작한 수직형 LPE장치를 이용하여 meltback 방법으로 제작한 PBH-LD의 성능이 상당히 우수함을 알 수 있다. 이러한 제작 기술은 향후 또 다른 반도체 광소자의 제작에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] S. Mukai, H. Yajima and J. Schimada, "Fabrication and visible light-emission characteristic of room-temperature-operated InGaAsP DH diode laser grown on GaAs substrates," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 20, pp. L729 L732, 1981.

[2] A. Fujimoto, H. Yasuda, M. Shimura and S. Yamashida, "Very short wavelength(612.4㎚) room temperature pulsed operation of InGaAsP lasers," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 21, pp. L488～L490, 1982.

[3] M. Kazumura, I. Ohta and I. Teramoto, "Feasibility of the LPE growth of AlGaInP on GaAs substrates," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 22, pp. 645～657, 1983.

[4] H. Kawanishi and T. Suzuki, "LPE growth of GaInAsP on (100) GaAs by two-phase-solution technique," Jpn. Appl .Phys., vol. 23, pp. L52～L54, 1984.

[5] S. Fuji, S. Sakaki and M. Umemo, "Room temperature operation of visible (λ=658.6㎚) InGaAsP DH laser diodes on GaAsP," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 24, pp. L551～L552, 1985.

[6] K. Itaya, G. Hatakoshi, Y. Watanabe, M. Ishikawa and Y. Uematsu, "High power CW operation of broad area InGaAsP visible light laser diodes," Electron. Lett., vol. 26, pp. 214～215, 1990.

[7] M. Ishikawa, H. Shiozawa, Y. Tsuburai and Y. Uematsu, "Short-wavelength (638㎚) room-temperature cw operation of InGaAlP laser diodes with quaternary active layer," Electron. Lett., vol. 26, pp. 211 213, 1990.

[8] M. Ishikawa, H. Shiozawa, K. Itaya, G. Hatakoshi and Y. Uematsu, "Temperature dependence of the threshold current for InGaAsP visible laser diodes," IEEE J. Quantum Electron., vol. 27, pp. 23～29, 1991.

[9] T. Miya, Y. Terunuma, T. Hosak and T. Miyashita, "An ultimately low-loss single-mode fiber at 1.55㎛," Electron. Lett., vol. 15, pp. 106～108, 1979.

[10] K. Oe, S. Ando and K. Sugiyame, "1.3㎛ CW operation of GaInAsP/ InP DH diode lasers at room temperature," Jpn. J. Appl.

Phys., vol. 16, pp. 1273～1274, 1977.

[11] H. Nagai, Y. Noguchi, K. Takahei, Y. Toyoshima and G. Iwane, “GaInAsP/InP buried heterostructure lasers of 1.5μm region,” Jpn. J. Appl. Phys., vol. 19, pp. L128～L220, 1980.

[12] K. Oe and K. Sugiyama, "GaInAsP/InP double-heterostructure lasers prepared by a new LPE apparatus," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 15, pp. 1740 7411, 1976.

[13] S. Arai, Y. Suematsu and Y. Itaya, "1.6μm GaInAsP/InP DH lasers double cladded with InP by LPE technique," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 18, pp. 709 710, 1979.

[14] N. Holonyak, Jr., R. M. Kolbas, R. D. Dupuis and P. D. Dapkus, “Quantum- well heterostructure lasers,” IEEE J. Quantum Electron., vol. 16, pp. 170～186, 1980.

[15] Y. Arakawa, H. Sakaki, M. Nishioka, H. Okamoto and N. Miura, "Spontaneous emission characteristics of quantum well lasers in strong magnetic fields-An approach to quantum-well-box light source," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 22, pp. L804 L806, 1983.

[16] W. D. Laidig, P. J. Coldwell, Y. F.Lin and C. K. Peng, “Strained-layer quantum-well injection laser,” Appl. Phys. Lett., vol. 44, pp. 653～655, 1984.

[17] J. Nagle, S. Hersee, M. Krakowski, T. Weil and C. Weisbush, "Threshold current of single quantum well lasers; The role of the confining layer," Appl. Phys. Lett., vol. 49, pp. 1325 1327, 1986.

[18] H. Temkin, G. J. Dolan, M. B. Panish and S. N. G. Chr, "Low-temperature photoluminescence from InGaAs/InP quantum wires and boxes," Appl. phys. Lett., vol. 50, pp. 413 415, 1987.

[19] H. C. Hsieh, “Nonlinear optical waveguide directional coupler employing multiple quantum well structure”, J. Appl. Phys. Lett., vol. 64, pp. 1696～1730, 1988.

[20] T. Kato, T. Sasaki, K. Komatsu and I. Mito, "DFB-LD/modulator integrated light source by bandgap energy controlled selective MOVPE," Electron. Lett., vol. 28, pp. 153 154, 1992.

[21] M. Aoki, M. Suzuki, H. Sano, T. Kawano, T. Ido, T. Taniwatari, K. Uomi and A. Takai, "InGaAs/InGaAsP MQW electroabsorption modulator integrated with a DFB laser fabricated by band-gap energy control selective area MOCVD," IEEE J. Quantum

Electron., vol. 29, pp. 2088 2096, 1993.

[22] S. Takano, T. Mito, "1.55㎛ wavelength-tunable MQW-DBR-LD's employing bandgap energy control in all selective MOVPE growth," Tech. Dig. ECOC'92, TuB 5.3, pp. 177 180, 1992.

[23] T. Sasaki, M. Kitamura and I. Mito, "Selective metalorganic vapor phase epitaxial growth of InGaAsP/InP layers with bandgap energy control in InGaAs/InGaAsP multiple-quantum well structures,," J. Crystal Growth., vol. 132, pp. 435 443, 1993.

[24] L. F. Lester, S. D. Offsey, B. K. Ridley, W. J. Schaff, B. A. Forman and L. F. Eastman, "Comparison of the theoretical and experimental differential gain in strained layer InGaAs/GaAs quantum well lasers," Appl. Phys. Lett., vol. 59, pp. 1162 1165, 1991

[25] S. C. Kan, D. Vassilovski, T. C. Wu and K. Y. Lau, "On the effects of carrier diffusion and quantum capture in high speed modulation of quantum well lasers," Appl. Phys. Lett., vol. 61, pp. 752 754, 1992.

[26] T. Fukushima, R. Nagarajan, M. Ishikawa and J. E. Bowers, "High speed dynamics in InP based multiple quantum well lasers," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 32, pp. 70 83, 1993.

[27] T. C. Wu, S. C. Kan, D. Vassilovski and K. Y. Lau, "Influence of separate-confinement layer band structure on the transport-limited modulation bandwidth in quantum well lasers," Appl. Phys. Lett., vol. 63, pp. 441 443, 1993.

[28] C. E. Zah, R. Bhat, B. Pathak, F. Favire, M. C. Wang, W. Lin, N. C. Andreadakis, D. M. Hwang, M. A. Koza, T. P. Lee, Z. Wang, D. Darby, D. Flanders and J. J. Hsieh, “High-performance uncooled 1.3-㎛ AlGaInAs/InP strained-layer quantum-well lasers for fiber-in- the-loop applications," in Tech. Dig. OFC`94, San Jose, CA, 1994, ThG1.

[29] A. P. Wright, A. T. R. Briggs, A. D. Smith, R. S. Baulcomb and K. J. Warbrick, "22 GHz-bandwidth 1.5㎛ compressively strained InGaAsP MQW ridge-waveguide DFB lasers," Electron. Lett., vol. 29, no. 21, pp. 1848 1849, 1993.

[30] T. Tsuchiya, M. Komori, K. Uomi, A. Oka, T. Kawano and A. Oishi, "Investigation of effect of strain on low-threshold 1.3 ㎛

InGaAsP strained-layer quantum-well lasers," Electron. Lett., vol. 30, no. 10, pp. 788 789, 1994.

[31] Norio Yamamoto, Kiyoyuki Yokoyama, Takayuki Yamanaka, and Mitsuo Yamamoto, "Design and Fabrication of Low-Threshold 1.55-㎛ Graded-Index Separate-Confinement-Heterostructure Strained InGaAsP Single-Quantum-Well Laser Diodes," IEEE. J. Quantum Electron., vol. 33, no. 7, pp. 1141 1148, 1997.

[32] 홍창희, 이중기, 조호성, 박경현, 박찬용, 이용탁 "누설전류가 작은 1.3㎛ GaInAsP/InP 평면매립형 레이저 다이오드" 전자통신지, 제 13권 4호, pp. 2 8, 1992.

[33] 이중기, 장동훈, 조호성, 이승원, 박경현, 김정수, 김홍만, 박형무, 홍창희 "2.5Gbps 광통신용 1.55㎛ InGaAsP/InP PBH DFB LD 제작 및 특성" 대한전자공학지, 제 31권 9호 pp. 139 145, 1994.

[34] 조호성, 박경현, 이중기, 장동훈, 김정수, 박성기, 박철형, 김홍만, 편광의 "응력완화 1.3㎛ GaInAsP/InP Uncooled-LD의 다중양자우물층과 SCH층 구조에 따른 동작특성" 대한전자공학회지, 제 33권, A편 7호, pp.185 197, 1996.

[35] Ho Sung CHO, Dong Hoon JANG, Jung Kee LEE, Kyung Hyun PARK, Jeong Soo KIM, Seung Won LEE, Hong Man KIM and Hyung-Moo PARK, "High-Performance Strain-Compensated Multiple Quantum Well Planar Buried Heterostructure Laser Diodes with Low Leakage Current," Jpn. J. Appl. Phys. vol. 35, no. 3, pp. 1751 1757, 1996.

[36] 황상구, 오수환, 김정호, 홍창희, "Meltback을 이용한 평면매립형 반도체레이저 제작에 관한 연구," 한국통신학회 대한전자공학회 부산·경남지부 춘계 합동 학술발표회 논문집 제 8권, 제 1 호, pp. 41-46, 1999.

[37] 황상구, 오수환, 김정호, 홍창희, "Meltback을 이용한 평면매립형 Multiquantum Well 반도체레이저의 제작에 관한 연구," 제16회 광학 및 양자전자 학술발표회 논문집, pp. 86-87, 1999.

[38] Kelvin Prosyk, John G. Simmons, "Well Number, Length and Temperature Dependence of Efficiency and Loss in InGaAsP-InP Compressively Strained MQW Ridge Waveguide Lasers at 1.3㎛," IEEE J. Quantum Electron., vol. 33, no. 8, pp. 1360 1368, 1997.

[39] M. Aoki, M. Komori, T. Tsuchiya, H. Sato, K. Uomi and T. Ohtoshi, "High performance InGaAsP/InP strained-layer MQW lasers with reversed-mesa ridge-waveguide structures," Electron.

Lett., vol. 31, no. 12, pp. 973 975, 1995.

[40] Masahiro Aoki, Tomonobu Tsuchiya, Kouji Nakahara, Masaaki Komori and Kazukisa Uomi "High-Power and Wide-Temperature-Range Operations of InGaAsP-InP Strained MQW Lasers with Reverse-Mesa Ridge-Waveguide Structure," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 7, no. 1, pp. 13 15, 1995.

[41] Masahiro Aoki, Tomonobu Tsuchiya, Kouji Nakahara, Masaaki Komori and Kazukisa Uomi "High-Power and Wide-Temperature-Range Operations of InGaAsP-InP Strained MQW Lasers with Reverse-Mesa Ridge-Waveguide Structure," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 7, no. 1, pp. 13 15, 1995.

[42] T. Tsukada, "GaAs-GaAlAs buried-heterostructure injection lasers," J. Appl. Phys., vol. 45, pp. 4899 4906, 1974.

[43] J. J. Hsieh and C. C. Shen, "Room-temperature CW operation of buried stripe double heterostructure GaInAsP/InP diode lasers," Appl. Phys. Lett., vol. 30, pp. 429 431, 1977.

[44] K. Mizuishi, M. Hirao, S. Tsuji, et al., "Accelerated aging characteristics of InGaAsP/InP buried heterostructure lasers emitting at 1.3㎛," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 19, pp. 429 437, 1980.

[45] S. Matsumoto, R. Iga, Y. Kadota, M. Yamaomoto, M. Fukuda, K. Kishi and Y. Itaya "Low resistance 1.55㎛ InGaAsP/InP semi-insulating buried heterostructure laser diodes using a multilayer contact structure" Electron. Lett., vol. 31, no. 11, pp. 882 883, 1995.

[46] I. Mito, M. Kitamura, K. Kobayashi, S. Murata, M. Seki, Y. Odagiri, H. Nishimoto, M. Yamaguchi and K. Kobayashi, "InGaAsP-D-C-planar -buried-hetero-structure laser diode (DCPBH-LD) with effective current confinement," J. Lightwave Technol., vol. LT-1, p. 195, 1983.

[47] K. Kishino, Y. Suematsu and Y. Itaya, "Mesa substrate buried heterostructure GaInAsP/InP lasers," Electron. Lett., vol. 15, pp. 134 136, 1979.

[48] N. K. Dutta, D. P. Wilt, P. Besomi, W. C. Dautremont-Smith, P. D. Wright and R. J. Nelson, Appl. Phys. Lett., vol. 44, p. 483, 1984.

[49] T. Murotani, E. Oomura, H. Higuchi, H. Namizaki and W.

Susaki, "InGaAsP /InP buried crescent laser emitting at 1.3㎛ with very low threshold current.," Electron. Lett., vol. 16, pp. 55 6 558, 1980.

[50] T. Murotani, E. Oomura, H. Higuchi, H. Namizaki and W. Susaki, "Low threshold InGaAsP/InP buried crescent laser with double current confinement structure," IEEE J. Quantum Electron., vol. 17, pp. 646 650, 1981.

[51] I. P. Kaminow, R. E. Nahory, L. W. Stulz and J. C. Dewinter, "Performance of an improved InGaAsP ridge waveguide laser at 1.3㎛ wavelength," Electron. Lett., vol. 17, pp. 318 320, 1981.

[52] I. P. Kaminow, L. W. Stulz, J. S. Ko, A. Dental, R. E. Nahory, J. C. Dewinter and R. L. Hartman, "Low threshold InGaAsP ridge waveguide lasers at 1.3㎛," IEEE Quantum Electron., vol. 19, pp. 1312 1218, 1983.

[53] M. C. Amann and B. Stenmüller, "Narrow-stripe metal-clad ridge waveguide lasers for 1.3㎛ wavelength," Appl. Phys. Lett., vol. 48, pp. 1027 1029, 1986.

[54] B. Stegmüller, E. Veuhoff, J. Rieger and H. Hedrich. "High-temperature(130℃) CW operation of 1.53㎛ InGaAsP ridge-waveguide lasers using strained quaternary quantum wells,“ Electron. Lett., vol. 29, no. 19, pp. 1691-1693, 1993.

[55] A. Doi, N. Chinone, K. Aiki and R. Ito, "GaxIn1-xAsyP1-y/InP rib waveguide injection lasers made by one-step LPE," Appl. Phys. Lett., vol. 34, pp. 393 495, 1979.

[56] K. Endo, T. Suzuki, I. Sakuma, et al., "Life test of 1.3㎛ wavelength InGaAsP /InP PCW lasers," National Convention Record of Japan. Society of Applied Physics, 17p-Q-11, p. 164, 1981.

[57] H. Yonezu, I. Sakuma, K. Kobayashi, et al., "A GaAs-AlxGa1-xAsx double hetetostructure planar stripe laser," Jpn J. Appl. Phys., vol. 12, pp. 127 134, 1973.

[58] S. Iida, K. Takata and Y. Unno, "Spectral behavior and line width of (GaAl) As-GaAs double heterostructure lasers at room temperature with stripe geometry configuration," IEEE J. Quantum Electron., vol. 9, pp. 361 366, 1973.

[59] M. Takusagawa, S. Ohasaka, N. Takagi, et al., "An internally

stripe planar laser with 3㎛ stripe width oscillating in transverse single mode," Proc. IEEE, vol. 61, pp. 1758 1759, 1973.

[60] 조호성,"수직형LPE장치에 의한 InGaAsP/InP MQW-LD제작에 관한 연구," 한국해양대학교 대학원 박사학위논문, p169, 1994.

[61] 조호성, 박경현, 이중기, 장동훈, 김정수, 박기성, 박철순, 김홍만, 편광의 "응력완화 1.3㎛ GaInAsP/InP Uncooled-LD의 다중양자우물층과 SCH층 구조에 따른 동작특성," 대한전자공학회지, 제33권 A편 제7호, pp. 185-197, 1996.

[62] 김운섭, 황상구, 김정호, 김동욱, 홍창희, "InGaAsP/InP계 SCH-MQW-PBH 레이저 다이오드의 특성해석을 위한 소자 Simulation에 관한 연구," 대한전자공학회 한국통신학회 부산·경남지부 추계 학술발표회 논문집, 제 8 권, 제 2 호, pp. 43-48, 1999.

[63] 황상구, 오수환, 김정호, 김운섭, 김동욱, 홍창희, "Meltback을 이용한 mesh shape의 형성과 평면 매립형 반도체 레이저의 제작," Hankook Kwanghak Hoeji, vol. 10, no. 6, pp. 518-522, 1999.

[64] M. Yamada and H. Isliguro, "Gain calculation of undoped GaAs injection laser taking account of electric intra-band relaxation," Jpn.J.Appl.Phys., vol. 20, pp. 1279 1288, 1981.

[65] Y. Horikoshi and Y. Furukawa, "Temperature sensitive threshold current of InGaAsP-InP double hetrostructure lasers," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 18, pp. 809 815, 1979.

[66] M. Yano, H. Nishi and M. Takusagawa, "Influence of interfacial recombination on oscillation characteristics of InGaAsP/InP DH lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. 16, pp. 661 667, 1980

[67] A. Sugimura, "Band-to-band Auger recombination effect on InGaAsP laser threshold," IEEE J. Quantum Electron., vol. 17, pp.627 635, 1981.

[68] M. Yano, H. Imai and M. Takusagawa, "Analysis of threshold temperature characteristics for InGaAsP/InP double heterojunction lasers," J. Appl. Phys., vol. 52, pp. 3172 3175, 1981.

[69] A. sugimura, "Band-to-band Auger recombination in InGaAsP lasers," Appl. Phys. Lett., vol. 39, pp. 21 23, 1981.

[70] J. I. Pankove, "Temperature dependence of emission efficiently and lasing threshold in laser diodes," IEEE J. Quantum Electron., vol. 4, pp. 119 122, 1968.

[71] M. B. Panish, I. Hayashi and Sumski, "Double-heterostructure injection laser with room-temperature threshold as low as 2300A/cm2," Appl. Phys. Lett., vol. 16, pp. 326 327, 1970.

[72] I. Hayashi, M. B. Panish and F. K. Reinhert, "GaAs-AlxGa1-xAs double heterostructure injection lasers," J. Appl. Phys., vol. 42, pp. 1929 1941, 1971.

[73] M. Uueno, I. Sakuma, T. Furuse, Y. Matsumoto, H. Kawemo, Y. Ide and S. Matsumoto, "Transverse mode stabilized InGaAsP/InP (λ=1.3㎛) plane-convex waveguide lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. 17, pp. 1930 1940, 1981.

[74] Y. Itaya, S. Arai, K. Kishino, M. Asada and Y. Suematsu, "1.6㎛ wavelength GaInAsP/InP laser prepared by two-phase solution technique," IEEE J. Quantum Electron., vol. 17, pp. 635 640, 1981.

[75] H. C. Casey, Jr., "Temperature dependence of threshold current density in InP-Ga0.28In0.72As0.6P0.4(λ=1.3㎛) double heterosturcture laser," J. Appl. Phys., vol. 57, pp. 1959 1964, 1984.

[76] Y. Sasai, N. Hase, M. Ogura and T. Kajiwarw, "Fabrication and lasing characteristics of 1.3㎛ InGaAsP multiple quantum-well lasers," J. Appl. Phys., vol. 59(1), pp. 28 31, 1986.

[77] **편집부**, **반도체 레이저 응용기술**, **도서출판 세운**, pp. 26 27, 1996.

[78] H. Kressel and J. K. Butler, Semiconductor Lasers and Hetrerojunction LEDs, Academic Press, 1977.

[79] J. M. Semior, Optical Fiber Communications, Prentice Hall, 1992.

[80] Y. Suematus, A. R. Adams, "Handbook of Semiconductor Lasers and Photonic Integrated Circuits," CHAPMAN & Hall, p. 34, 1994.

[81] 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㎛ GaInAsP/InP lasers," Electron. Lett., vol. 16, pp. 895 896, 1980.

[82] F, R. Nash, "Mode guidance parallel to the junction plane of double- heterosturcture GaAs lasers," J. Appl. Phys., vol. 44, pp. 4696 4707, 1973.

[83] G. H. Gooch, Gallium arsenide lasers, Wiley-Interscience, 1969.

[84] H. Kawanishi and Y. Suematsu, "Temperature characteristics of

a GaAs-AlGaAs integrated twin-guide laser with distributed bragg reflector," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 17, pp. 1599 1603, 1978.

[85] K. Utaka, K. Kobayashi and Y. Suematsu "Lasing characteristics of 1.5 1.6㎛ GaInAsP/InP integrated twin-guide lasers with first-order distributed bragg reflectors with first-order distributed bragg reflectors," IEEE J. Quantum Electron., vol. 17, pp. 651 658, 1981.

[86] T. Yamamoto, K. Sakai, S. Akiba and Y. Suematsu, "Fast pulse behavior of InGaAsP/InP double-heterostructure lasers emitting at 1.27㎛," Electron. Lett., vol. 13, pp. 142 143, 1977.

[87] RONALD J. NELSON, RANDALL B. WILSON, PHILLIP D. WRIGHT, PETER A. BARNES, AND NILOY K. DUTTA, "CW Electrical Properties of InGaAsP(λ=1.3㎛) Buried-Heterostructure Lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. 17, no. 2, pp. 202 210, 1980.

[88] M. Rosenzweig, M. Mohrle, H. Duser, and H. Venghaus, “Threshold-current analysis of InGaAs-InGaAsP multiquantum well separate-confinement lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. 27, no. 6, pp. 1804 1811, 1991.

[89] PAUL W. A. MC ILROY, ATSUSHI KUROBE, AND YUTAKA UEMATSU, "Analysis and Application of Theoretical Gain Curves to the Design of Multi-Quantum-Well Lasers," IEEE J. Quantum Electron. QE-21, pp. 1958-1963, 1985.

[90] Y. ARAKAWA, MEMBER, IEEE, AND A. YARIV, FELLOW, IEEE, "Quantum Well Lasers-Gain, Spectra, Dynamics," IEEE J. Quantum Electron. vol. 22, no. 9, pp. 1887-1899, 1986.

[91] Peter S. Zory, Jr., Quantum Well Lasers, Academic Press, p. 167, 1993.

감사의 글

처음 홍창희 교수님을 찾아간 날이 떠오릅니다. 그 순간부터 지금까지 열심히 학문에 열중하고 가치관을 바르게 세워 어떻게 살아가야 할지를 깨우쳐 주신 홍창희 교수님 내외분께 감사를 드립니다. 교수님이 계셨기에 오늘 이렇게 저에게 또 하나의 기록으로 논문을 만들게 되었습니다.

그리고 본 논문의 심사를 맡아서 지도를 아끼지 않으신 이삼녕 교수님, 심준환 교수님께 감사를 드리며, 학문적으로 가르침을 주신 고 손진현 교수님, 고 유대근 교수님, 김기문 교수님, 이상배 교수님, 양규식 교수님, 임재홍 교수님, 박동국 교수님, 그리고 응용물리학과의 안형수 교수님께도 감사를 드립니다.

광전자 연구실에 처음 들어왔을 때 많은 도움을 주신 오수환 선배님, 그리고 지금까지 논문을 쓰면서 조언과 질책으로 저를 아껴주신 황상구 선배님, 말씀은 없으셨지만 항상 지켜봐 주신 이석정 박사님, 박윤호 박사님, 삼양무선공업(주) 배정철 박사님, 물질적인 면뿐만 아니라 기술적인 문제에서 많은 도움을 주신 한국전자통신연구원의 조호성 박사님, 삼성종합기술원의 하홍춘 선배님, 안세경 선배님, 모수종 선배님께도 감사를 드립니다. 또, 선배이면서 친구로서 항상 좋은 이야기를 많이 해 준 양승국, 김영팔, 이채호학형에게도 감사를 드립니다. 선배이지만 실험실에 먼저 들어왔다는 이유로 선배 대접을 해 주었고, 도움과 충고를 하면서 곁에서 지켜준 김운섭, 김동욱, 황민철 형들에게도 이 글을 통해 고마움을 전합니다. 그리고 지금은 중국에 계신 손문력 선생님, 방복문 선생님께도 감사를 드립니다.

주위에서 많이 격력해 주고 용기를 준 유형렬, 조병일, 이태오, 심창섭, 김남구, 박성하 형들에게도 감사드리며 윤홍우, 조용진, 박성하, 강성인, 강성희, 강호성, 신송아, 정진곤 그 외 동기들 및 여러 실험실 학형들에

게도 고마움을 전합니다. 연구에 도움을 준 서명찬 SEM **기사님께도 감사드립니다.**

멀리서 지켜봐 주시고 걱정해 주신 고향의 큰아버지, 큰어머니, 그리고 형님, 형수님께도 감사를 드리며 항상 보살펴 주신 다른 친척 분들께도 감사드립니다. 그리고 멀리 떨어져 있지만 힘이 되어준 친구들에게도 고마움을 전합니다.

태어나면서부터 사랑으로 보살펴 주신 아버지, 어머니.

오늘까지 저를 바르게 키워주시고 사랑해주신 아버지, 어머니께 진심으로 감사를 드립니다. 집에 갈 때면 타지에서 몸 건강히 잘 지내는지 몇 번이고 물으시던 부모님께 이 논문이 작은 기쁨이 되었으면 합니다. 그리고 힘든 사회생활에도 걱정해주고 사랑을 준 형, 잘 따라 준 정영, 정현이에게도 고마움을 전합니다.

끝으로 한 평생 자식 잘 되기를 바라면서 걱정하시고 사랑해 주신 아버님, 어머님께 이 글을 바칩니다.