

Meltback을 이용한 mesa shape의 형성과 평면매립형 반도체레이저의 제작

황상구 · 오수환 · 김정호 · 김운섭 · 김동욱 · 홍창희

한국해양대학교 이공대학 전자통신공학과

(1999년 9월 28일 받음, 1999년 11월 12일 수정본 받음)

본 연구에서는 meltback 방법으로 mesa 모양을 형성하기 위하여 여러 가지 농도의 용액으로 meltback을 하였으며, InP 기판 위에 InGaAsP 활성층과 InP cap층을 가지는 웨이퍼에 mesa 모양을 형성하기 위해서는 성장온도에서 성장용액의 80%인 InGaAsP(1.55 μm) 용액이 가장 적합한 것으로 확인되었다. meltback 방법만으로 PBH-LD(planar buried heterostructure laser diode)를 제작하기 위한 완전한 mesa를 형성하기는 어려우며, 따라서 본 연구에서는 화학에칭에 이어 meltback 방법을 이용하여 mesa 모양을 형성하고 연속하여 전류 차단층을 형성시킨 PBH-LD(Planar Buried Heterostructure-Laser Diode)를 제작하였다. 이렇게 제작된 MQW-PBH-LD의 전기 광학적 특성은 공진기 길이가 300 μm 일 때 임계전류는 10 mA, 내부양자효율은 82%, 내부손실은 9.2 cm^{-1} , 특성온도는 25~45°C 사이에서는 65K, 45~65°C 사이에서는 42 K이었다.

I. 서 론

LPE(Liquid Phase Epitaxy)장치는 가장 기본적인 결정성장 장치로서, LPE를 이용한 결정 성장에 관해서는 많은 자료들이 발표되어 있기 때문에¹⁻³ 경제적으로 MOCVD나 CBE와 같은 장비를 갖출 수 없는 상황에서 새로운 소자의 제작에는 아주 유용하게 사용될 수 있으며, 성장층의 두께가 다소 두꺼운 소자의 제작에는 성장률이 낮은 다른 장치들에 비하여 유리한 측면도 있다. LPE장치를 이용하여 InP 기판 위에 에피 성장을 할 때 P성분의 높은 증기압으로 인한 P성분의 증발로 열 손상이 발생한다. 이러한 열손상을 방지하기 위한 여러 가지 방법들이 고안되어 있지만,⁴⁻⁸ 그 중에서도 열손상을 입은 부분을 제거하는 가장 일반적인 방법은 열손상을 입은 부분을 되녹여내는 meltback 방법이다.

BH-LD(Buried Heterostructure Laser Diode)를 제작하고자 할 때, wet etching으로 mesa 모양을 형성하는 것이 일반적인 방법이다. 그러나 이러한 방법은 LPE 장치를 이용하여 에피층을 성장할 경우 열손상으로 인하여 계면특성이 저하되는 경향이 있다. 이러한 점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 meltback 현상을 이용하여 mesa를 형성하고 이어서 전류 차단층을 성장시켜 계면특성이 좋은 소자를 제작하고자 하였다.

따라서 본 연구에서는 먼저 농도가 다른 여러 가지의 용액으로 mesa 모양을 형성하는 실험을 수행하였으며, 이 결과를 화학에칭에 이은 meltback 공정에 적용하여 화학에칭시 발생하는 웨이퍼의 손상과 고온에 노출되어 발생하는 열손상을 제거하고, 이어서 전류 차단층을 성장시켜 최근 광 가입자 망 등에 이용되고 있는 고성능 반도체 레이저의 하나인 PBH-LD(Planar Buried Heterostructure-Laser Diode)를 제작하였으며, 그 특성을 평가하여 보았다.

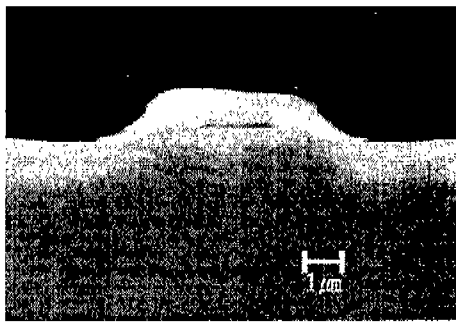
II. 본 론

2.1. Meltback에 의한 MESA 모양의 형성과 PBH-LD의 제작

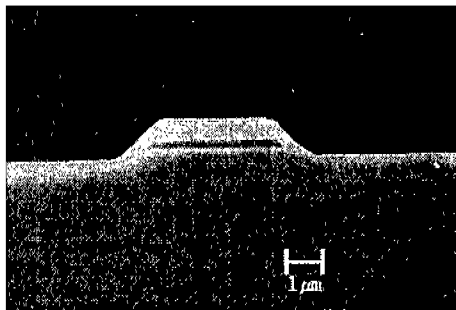
본 연구에서는 meltback 방법으로 mesa 모양을 형성하였다. meltback 용액은 630°C의 성장용액을 기준으로 1.55 μm InGaAsP 용액의 70%, 80%, 90%의 불포화 용액으로 각각 meltback을 하였다.

실험에 사용한 에피 웨이퍼는 MOVPE를 사용하여 에피 성장된 DH웨이퍼로서, MOVPE에서 성장압력은 60 Torr이고, 성장온도는 630°C로 하였으며, In 및 Ga의 재료로는 trimethyl indium(TMIn)과 Triethyl gallium(TEGa)을 사용하였고, As과 P 재료는 AsH₃와 PH₃를 사용하였다. 기판위에 버퍼층으로 n-InP를 600 Å 성장한 다음, 격자정합된 n-InGaAsP(Si doped)를 1000 Å 성장시켰다. 이어서 100 Å의 InGaAsP(Eg = 1.107 eV, 0.7% 인장응력) 장벽층과, 50 Å InGaAsP(Eg = 0.905 eV, 1.4% 압축응력) 우물층을 교대로 성장시켜 6개의 우물층이 되도록 하였으며, 1000 Å의 p-InGaAsP층을 성장시켰다. 맨 위 층으로 p-InP를 두께 0.3 μm 로 성장시킨 후, 사진 공정을 통하여 폭이 3 μm 인 SiNx stripe이 만들어진 웨이퍼를 이용하였다.

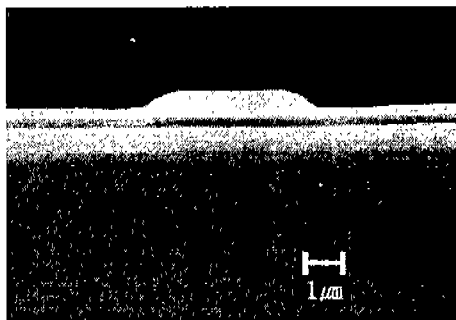
그림 1의 (a), (b), (c)는 각각 70%, 80%, 90% 용액으로 10초간 meltback한 mesa 모양을 나타내고 있다. (a)는 70%의 불포화 용액을 사용한 경우로서 전체적으로 활성층이 과도하게 meltback이 되어 재현성 있는 meltback 특성을 얻을 수 없었다. (b)는 80%의 용액을 사용한 경우로서 전체적으로 재현성 있는 meltback 특성을 얻을 수 있었다. 그리고 (c)는 90%의 불포화 용액을 사용한 경우로서 그림에서 알 수 있듯이 meltback의 깊이가 적어 활성층까지 meltback이 되지 않는 것으로 나타났다. 그래서 80%의 불포화 용액을 이용하여 어느 정도까지 에피 웨이퍼의 meltback이 가능한지를 조사하



(a) 70% 용액



(b) 80% 용액



(c) 90% 용액

그림 1. meltback 용액에 따른 meltback 특성.

여 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 알 수 있듯이 60초 정도 meltback 하면 InP 층이 약 2.0 μm 정도 meltback이 되는 것을 알 수 있으나, 30초 이상 할 경우 활성층이 모두 meltback 된다는 것을 알 수 있으며, 1 μm정도까지 meltback이 가능하다는 것을 알 수 있다. 따라서 meltback을 이용하여 형성할 수 있는 mesa 높이가 1 μm정도이기 때문에 누설전류를 방지하기 위한 최적의 mesa 높이가 약 2~3 μm정도로 알려져 있는 것과¹⁾ 비교할 경우 소자의 제작시 성능 저하를 초래할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 mesa 모양을 형성할 때 화학에칭과 meltback 두 가지 모두를 이용하였다. 먼저 에피 웨이퍼의 p-InP층을 H₃PO₄+HCl(4:1)용액으로 1분간 에칭한 후 활성층을 H₂SO₄+H₂O₂+H₂O(1:1:5) 용액으로 3분 20초간 에칭하였고, n-InP층을 H₃PO₄+HCl(4:1)로 2분 20초간 에칭한 다음 80%의 불포화용액을 이용하여 630°C에서 10초간 meltback하고 이어서 전류 차단층을 성장하였다. 전류 차단층을 성장시킨 다음, SiN_x stripe을 제거하고 3차 재성장을 한 결과 stripe이 제거된 부분에서는 에피층의 성장이 일어나

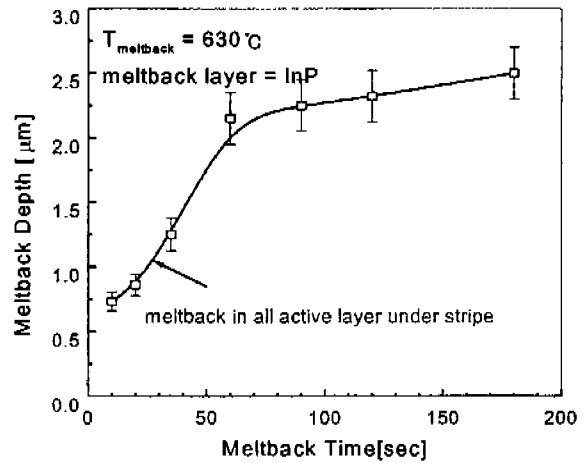


그림 2. meltback 시간에 따른 에피 웨이퍼의 meltback 특성.

지 않았다. 이러한 원인은 meltback을 하기 위하여 meltback 온도보다 20°C 높은 650°C에서 40분간 soaking하는 등 높은 온도에 기판이 장시간 노출되어 SiN_x와 접합되어있는 부분이 심각한 열손상을 입었기 때문으로 생각된다. 이러한 문제점 때문에 meltback 온도를 610°C로 20°C 낮추어 실험을 하였으며, cooling rate는 1.0°C/min으로 하였다. meltback을 한 후 전류 차단층인 p-InP층, n-InP층, p-InP층을 성장시키고, 냉각시키는 동안에도 기판에 열손상이 발생할 수 있으므로 p-InGaAs층을 성장시킨 후 냉각시켰다. 그리고 p-InP층과 n-InP층의 도핑은 각각 Zn/In와 Te/In alloy를 사용하였으며, 도핑 농도는 각각 1×10¹⁸ cm⁻³과 2×10¹⁸ cm⁻³로 하였다. 화학에칭과 meltback에 의하여 스트라이프 아래에 생기는 undercut에 의하여 mesa 폭이 0.8~1.2 μm 정도가 되도록 하여 고출력에서도 횡모드가 단일모드를 유지하도록 하였다. p-InP 클래드층과 n-InP 전류 차단층, p-InP 차단층과 n-InP 기판이 p-n-p-n 사이리스터를 형성함으로써 p-InP 클래드층과 p-InP 전류 차단층과의 유효접촉면적에 의해 사이리스터를 통한 누설전류가 결정되고, 특히 고주입전류와 고온동작에서 사이리스터가 ON되어 누설전류를 급격하게 증가시키는 원인이 된다.¹¹⁾ 이러한 누설전류를 줄이기 위하여 성장시 p-InP층의 성장을 조

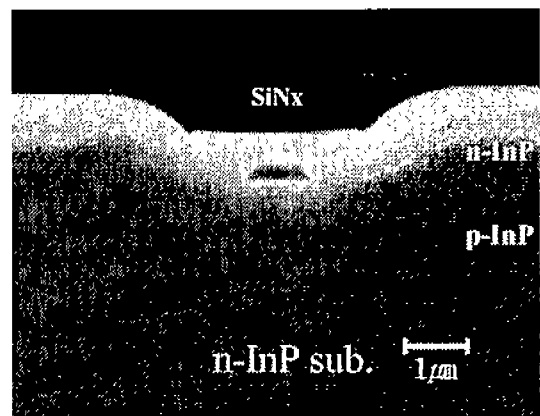


그림 3. 2차 재성장 결과.

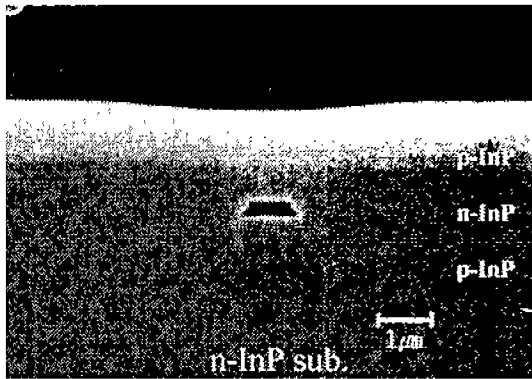


그림 4. 3차 재성장기에 의해 성장된 웨이퍼의 SEM 단면 사진.

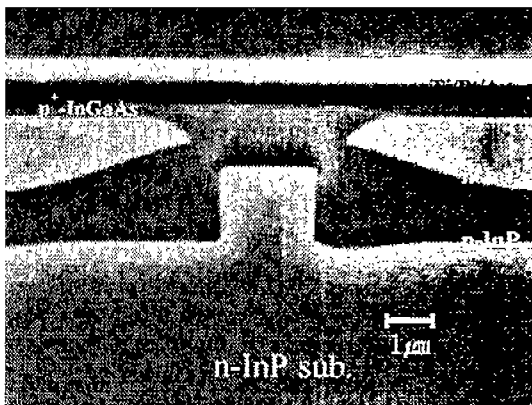


그림 5. 제작된 MQW-PBH-LD의 SEM 단면사진.

절하여 접합면의 폭을 대략 0.5~1 μm 정도가 되도록 하였다.

3차 재성장을 위해 SiNx stripe를 6:1 BOE로 제거한 후, 열손상 방지용으로 성장시킨 p-InGaAs층을 제거하였다. 3차 재성장시 p-InP의 도핑농도는 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 로 하였으며, 오음 접촉을 위한 p⁺-InGaAs의 도핑농도는 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 로 하였다. 3차 재성장기에 의해 성장된 웨이퍼의 단면사진을 그림 4에 나타내었다.

그림 5는 제작된 MQW-PBH-LD의 단면을 SEM 사진으로 나타낸 것이다.

2.2. MQW-PBH-LD의 전기광학적 특성

제작된 MQW-PBH-LD의 전기적 특성을 측정해 본 결과, 순방향 임계전압이 0.6 V이고, 역방향 항복전압은 5.8 V이며 직렬저항은 5 Ω이었다.

LD의 I-L특성 측정실험에서는 활성층에서 발생하는 Joule 열의 영향을 줄이기 위하여 펄스 주기 1 ms, 펄스 폭 10 μs, 1% duty cycle인 전류펄스로 LD를 구동시켰다.

반도체 레이저의 I-L특성으로부터 얻어낼 수 있는 정보들은 I_{th} 및 I_h 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 β 의 온도의존성^[11]이나 누설전류의 온도의존성 때

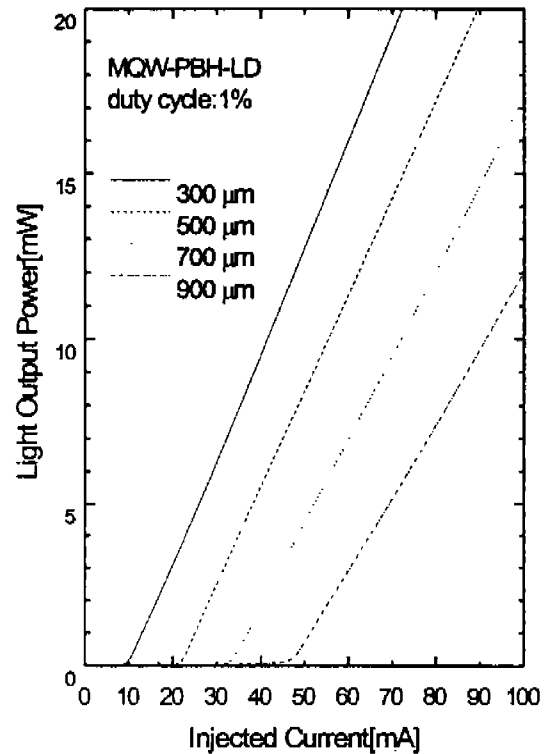


그림 6. 제작된 LD의 공진기 길이에 따른 I-L특성측정.

문에 온도에 따라 크게 변화하게 된다.

그림 6은 제작된 MQW-PBH-LD의 공진기 길이에 따른 I-L 특성 변화를 측정한 결과이다. 임계전류 I_{th} 는 그림으로부터 공진기 길이가 300 μm일 때 10 mA로서 일반적인 PBH-LD들과 유사한 값으로 나타났다.

이 그림으로부터 광출력이 20 mW에 이를 때까지 다중극모드 동작에 의한 kink현상^[12, 13]이 일어나지 않음을 알 수 있다. 그림 7에는 제작된 PBH-LD의 활성층 내부양자효율과 내부손실을 구하기 위해 공진기 길이에 따른 미분양자효율의 역수를

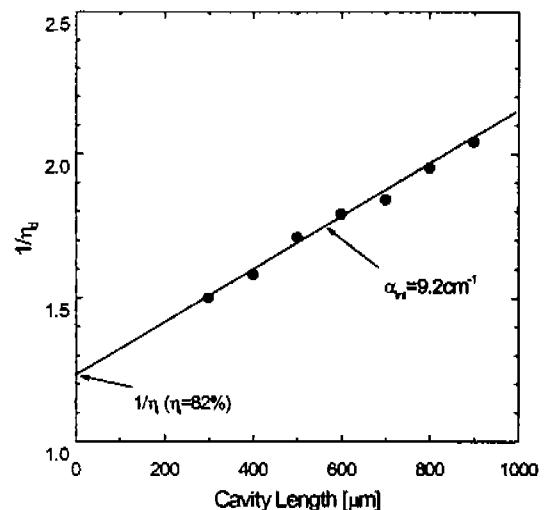


그림 7. 공진기 길이에 따른 외부양자효율의 역수의 변화.

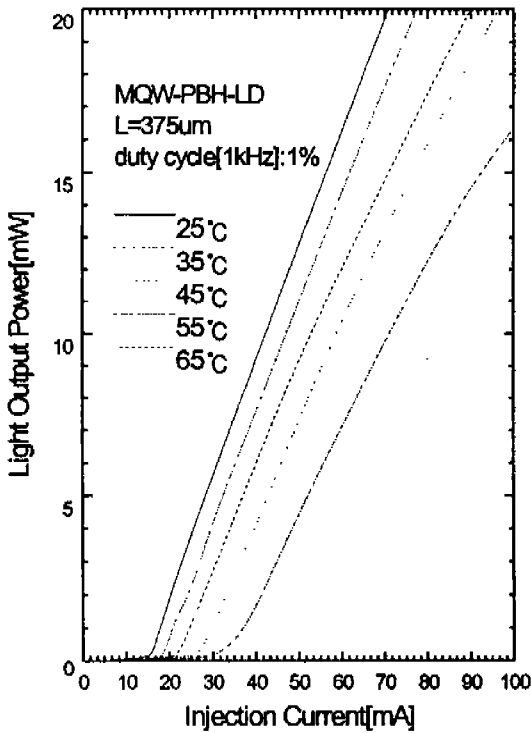


그림 8. 온도에 따른 I-L 특성 측정.

나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 내부양자효율 $\eta_i = 82\%$ 로서 캐리어의 주입효율이 우수하며, 활성층의 특성이 우수한 것으로 추정할 수 있다. 그리고 내부손실은 $\alpha_{int} = 9.2 \text{ cm}^{-1}$ 로서 일반적인 PBH-LD의 내부손실과 비슷하다는 것을 알 수 있다.

그림 8은 공진기 길이가 $375 \mu\text{m}$ 일 때 온도에 따른 I-L곡선을 나타낸 것으로 그림으로부터 온도가 상승함에 따라 I_{th} 가 증가함을 알 수 있다. 동작온도에 따른 I_{th} 의 관계로부터 특성 온도를 구할 수 있으며, 특성 온도 T_0 는 20°C 에서 45°C 까지는 65 K, 45°C 에서 65°C 사이에서는 42 K인 것으로 나타났다.

그림 9는 제작된 MQW-PBH-LD의 I-L특성 및 주입전류에 따른 스펙트럼을 측정된 그래프이다. 그림에서 ①은 임계전류 이하인 15 mA에서 측정된 것으로 스펙트럼 영역이 13050~13220 Å 정도로 나타났고, 자연방출을 하고 있음을 알 수 있다. ② 30 mA의 전류에서 $25 \mu\text{m}$ 슬릿을 사용하여 측정된 것으로 파장영역이 13050~13090 Å으로 나타났다. ③은 약 40 mA의 전류를 인가하여 측정된 것으로 파장영역이 13074~13100 Å으로 나타났으며, ①의 스펙트럼 영역과 비교해 볼 때 스펙트럼의 중심영역인 약 13134 Å보다 좌측에서 반도체 레이저가 발진함을 알 수 있다. ④는 60 mA의 전류를 인가하여 측정된 것으로 발진파장영역이 13065~13108 Å임을 알 수 있다. 이와 같은 결과로부터 전류를 증가시킬수록 이득대역이 넓어지고, 이득 최대값을 가지는 파장의 이동으로 인해 발진모드가 증가하는 것을 관측할 수 있었다. 또한 주입전류의 증가함에 따라 밴드갭 에너지는 증가하지만, Joule 열의 영향이 보다 지배적으로 작용하여 장파장쪽으로 이득이 이동되는 것으로 생각된다.

한편, 레이저 다이오드의 복사패턴인 Far Field Pattern(FFP)

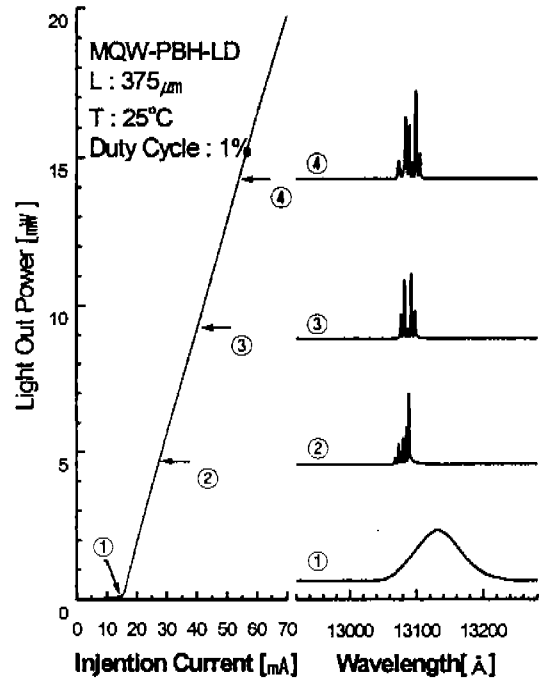
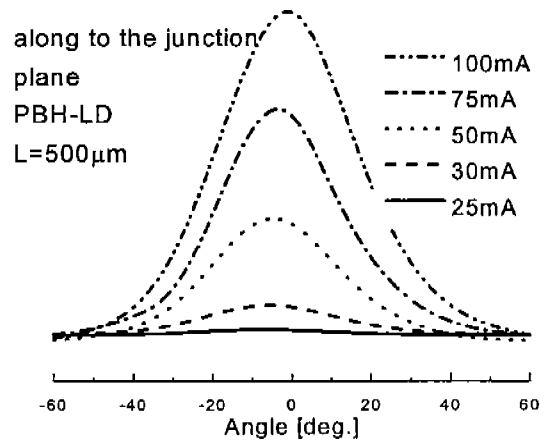
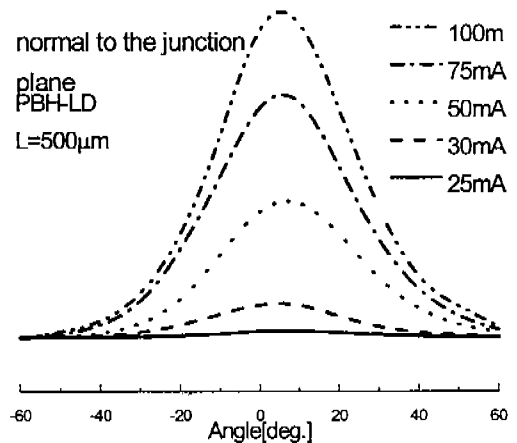


그림 9. 제작된 MQW-PBH-LD의 I-L특성과 주입전류에 따른 스펙트럼 특성.



(a) 접합면의 수평방향 FFP



(b) 접합면의 수직방향 FFP

그림 10. MQW-PBH-LD 측정된 FFP.

의 특성은 레이저 다이오드의 횡모드와 축모드에 관련되며, 특히 복사각도는 중요한 파라미터로 광섬유 도파관이나 기타의 광학부품들과 레이저 다이오드 사이의 광결합 효율과 관계된다. 따라서 결합효율을 높이기 위해서는 단일모드로 동작해야 하며, 이를 확인하기 위하여 제작된 MQW-PBH-LD의 FFP를 측정하였으며, 그림 10에 결과를 나타내었다. $4I_{th}$ 까지 단일모드로 동작하였으며, 접합면에 수평인 경우 FWHM이 35° 이었으며, 수직인 경우는 40° 이었다.

III. 결 론

meltback으로 mesa 모양을 형성하기 위하여 성장온도 630°C를 기준으로 InGaAsP(1.55 μm)의 70%, 80%, 90%의 용액으로 meltback를 실행하여 mesa 모양을 관찰한 결과, 80%용액으로 meltback을 하는 것이 가장 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

본 연구에서는 PBH-LD 제작을 위하여 화학에칭에 이어 성장온도를 기준으로 1.55 μm InGaAsP 80%용액으로 10초간 meltback 방법으로 mesa 모양을 형성한 후 이어서 전류 차단층을 성장시킨 다음, SiNx stripe를 제거하고 캡층을 성장시켜 PBH-LD를 제작하였다.

meltback 온도는 610°C로 하였으며, 제작된 LD가 측방향 단일모드로 동작하도록 하기 위해 활성층의 폭을 0.8~1.5 μm 정도 되게 제어하였다. 전류 차단층을 통한 누설전류를 줄이기 위해 p-InP층은 약 1.2 μm , n-InP층은 약 1.6 μm 정도 성장시켰다.

이렇게 제작된 MQW-PBH-LD의 전기·광학적 특성을 조사한 결과 순방향 임계전압은 약 0.8 V이었고, 역방향 항복전압은 5.6 V이었으며 동적인 저항은 5 Ω 이었다. 공진기 길이가 300 μm 일 때 임계전류는 10 mA, 내부양자효율은 82%, 내부손실은 9.2 cm^{-1} 이고, 특성온도는 20~45°C까지는 65 K이고, 45~65°C 사이에서는 42 K로 나타났다. 그리고 Far Field Pattern을 측정한 결과 $4I_{th}$ 까지 접합면에 수평방향과 수직방향 모두 단일모드로 동작하는 것을 확인하였다.

이러한 결과들을 고려해 볼 때, 제작된 PBH-MQW-LD의

전기·광학적 특성은 일반 상용의 LD와 비교될 수 있을 정도이며, 접합계면의 특성도 우수한 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 98년 한국과학재단 핵심전문(981-0914-067-1)연구비 지원으로 연구되었습니다.

참고문헌

- [1] E. Kuphal, J. Crystal Growth **67**, 441 (1984).
- [2] K. Nakajima, T. Kusunoki, K. Akita, T. Kotani, J. Electrochem. Soc. **125**, 123 (1978).
- [3] M. A. Pollack, R. E. Nahory, J. C. DeWinter and A. A. Ballman, Appl. Phys. Lett. **33**, 314 (1978).
- [4] H. Nagai, Y. Noguchi and T. Matsuoka, J. Crystal Growth **71**, 225 (1985).
- [5] W. Y. Lum and A. R. Clawson, J. Appl. Phys. **50**, 5296 (1979).
- [6] H. Beneking, N. Grote and J. Selders, J. Crystal Growth **54**, 59 (1981).
- [7] Besomi, P., P. B. Wilson, W. R. Wagner and R. J. Nelson, J. Appl. Phys. **54**, 535 (1983).
- [8] B. H. Chin, G. P. Schwartz, W. C. Daurremont-Smith, and J. R. Dick, J. Electrochem. Soc.: SOLID-STATE SCIENCE AND TECHNOLOGY **133**, 2162 (1986).
- [9] 조호성, 박경현, 이중기, 장동훈, 김정수, 박기성, 박철순, 김홍만, 편광의, 대한전자공학회지, A **33**, 188 (1996).
- [10] 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, Jpn. J. Appl. Phys. **35**, 1751 (1996).
- [11] M. Yamada and H. Isiguro, Jpn. J. Appl. Phys. **20**, 1279 (1981).
- [12] H. Kressel and J. K. Butler, *Semiconductor Lasers and Heterojunction LEDs* (Academic Press, 1977).
- [13] J. M. Semior, *Optical Fiber Communications* (Prentice Hall, 1992).

The mesa shape formation and fabrication of planar buried heterostructure laser diode by using meltback method

Sang Ku Hwang, Su Hwan Oh, Jeong Ho Kim, Weoun Seub Kim,
Tong Ook Kim and Tchang Hee Hong

Department of Electronics & Communication, Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

(Received September 28, 1999, Revised manuscript received November 12, 1999)

In this study, we made experiments to form a mesa shape by meltback method with various concentration of solutions and found that unsaturated (20%) InGaAsP (1.55 μm) solution at a growth temperature was the most suitable for the formation of a mesa shape on the wafer which has an InGaAsP active layer and an InP cap layer on an n-InP substrate. It was difficult to form a proper mesa shape for the fabrication of PBH-LDs only by the meltback method; therefore, we fabricated PBH-LDs by forming the mesa shape with the meltback method after wet etching and by growing a current-blocking layer successively. As the electrical and optical characteristics of MQW-PBH-LDs fabricated by above methods, when the cavity length was 300 μm , the threshold current was about 10 mA, internal quantum efficiency 82%, internal loss 9.2 cm^{-1} , and characteristic temperature was 65 K at 25~45°C and 42 K at 45~65°C.