

1.3 μm GaInAsP/p-InP BH형 레이저의 상온 연속발전

(CW Operation of 1.3 μm GaInAsP/p-InP BH Lasers at Room Temperature)

劉 泰 京*, 鄭 基 雄*, 權 寧 世*, 洪 彰 禧**

(Tae Kyung Yoo, Gi Oong Chung, Young Se Kwon and Tchang Hee Hong)

要 約

액상 결정성장법을 이용하여 p형 InP 기판 위에 1.3 μm GaInAsP BH형 레이저를 제작하였다. BH형 활성층을 형성하기 위하여 2번의 화학식각 공정과, 2차 결정성장 중에 용액식각 방법을 이용하였다. 제작된 레이저의 문턱전류(I_{th})는 72mA(23 $^{\circ}\text{C}$)였고, 발진파장은 1.2937 μm , 미분 양자효율(η_d)는 10~20%, 특성온도(T_0)는 약 85K로 측정되었다. 문턱전류의 1.4배까지 단일모드로 동작하였고, 상온 연속 발전에 성공하였다.

Abstract

1.3 μm GaInAsP BH (Buried heterostructure) lasers were fabricated on the p-InP substrate. Two step chemical etching processes and melt-back etching technique during 2nd epitaxy were used for BH active layer. BH laser had the threshold current, I_{th} , of 72mA (23 $^{\circ}\text{C}$), peak wavelength of 1.2937 μm , η_d of 10-20%, and T_0 of 85K. They operated in single mode under pulse condition up to 1.4 I_{th} . CW(DC) operation was successfully performed at room temperature.

I. 서 론

1966년 Kao와 Hockem이 광통신의 가능성을 제시한 이후^[1] 광섬유의 제조기술은 급격한 발전을 이루어, 오늘날 극저손실(0.2dB/km, 1.55 μm 근처)과 무분산(1.3 μm 근처)^[2] 광섬유를 이용한 대용량 장거리 정보 전달의 광통신 시대를 열었다. 광통신의 광원으로는

1970년대에 0.9 μm 근처의 GaAlAs/GaAs계의 반도체 레이저의 연구가 활발하였고, 1980년대는 1.3~1.55 μm GaInAsP/InP계의 레이저가 개발되어 1.3 μm 레이저의 경우 상용화가 가능하게 되었다.

광통신의 광원으로써 반도체 레이저가 갖추어야 할 기본적인 중요한 사항들을 열거하면 다음과 같이 요약된다.

- (1) 작은 발진개시 문턱전류
 - (2) 전류대 광출력의 선형성 및 높은 양자효율
 - (3) 좁은 주파수선평폭의 단일모드 광선
 - (4) 상온 연속 동작
 - (5) 긴 수명 및 고출력
 - (6) 고속 변조시 안정화된 단일모드 광선의 유지
- 위의 까다로운 모든 조건들을 만족시키는 레이저를 제작하기란 그리 쉽지 않으며, 이를 위하여서는 매우 복잡하고 어려운 공정등이 재현성있게 개발되어야 한

*正會員, 韓國科學技術院 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., KAIST)

**正會員, 韓國海洋大學 電子通信工學科
(Dept. of Electron. Comm., Korea Maritime Univ.)

接受日字: 1986年 8月 29日

(※ 본 연구는 과학기술처와 한국 광전자산업 연구조합 금성전기, 대우통신, 대한전선, 삼성반도체통신의 출연금(M202)에 의한 연구결과임.)

본 논문에서는 내부 굴절율 도파관으로 단일모드 레이어가 가능하고, 낮은 문턱전류로 상온 연속발진이 가능한 BH형(Buried heterostructure) 레이저의 구조 설계, 제작공정, 광·전특성에 대하여 보고하고자 한다.

II. BH형 구조의 설계

1. 단일모드 동작조건

레이저 공진기내에서 오직 단일모드(Fundamental mode)만이 전파되기 위해서는 공진기의 구조 및 크기가 적정화되어야 한다. BH형 구조의 도식도를 살펴 보고 모드해석 및 단일모드 동작조건에 대하여 살펴보자.(그림1)

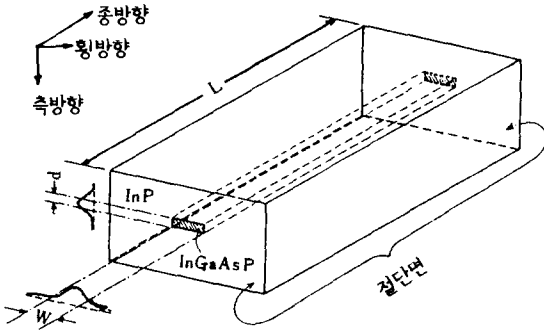


그림 1. BH형 레이저의 대표적 도식도
Fig. 1. A typical schematic diagram of BH laser.

BH형 레이저의 도파관은 굴절율이 높은 GaInAsP (n_1)층이 굴절율이 낮은 InP (n_2)층으로 2차원적으로 둘러싸인 유전체 도파관 형태이다. 다층 유전체 도파관의 해석은 오래 전부터 많이 연구가 되어온 분야이고,^{13,14} 반도체 레이저의 모드해석은 이를 이용하여 쉽게 설명되었다. BH형 구조의 도파관도 유효굴절율 근사방법을 이용하여 적은 오차 범위내에서 간단히 해석할 수 있다.

우선 1차원적 해석으로 축방향(Transverse direction)의 해석은 규격화된 도파관의 두께 D로 설명할 수 있다.

$$D \equiv \frac{2\pi \cdot d}{\lambda} \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1)$$

여기서 d는 활성층의 두께이고 λ 는 레이저의 발진 파장이다.

반도체 레이저의 전체해석의 중요 물리량인 Γ , 광학 제한인수(optical confinement factor)와, b, 규격화된 전파정수(normalized propagation constant)는 d가 $0.2\mu\text{m}$ 이하일 경우 약 2% 오차이내에서 다음과 같이

근사될 수 있다.¹⁵

$$\Gamma \equiv \frac{\text{도파관내의 전계세기}}{\text{전체 전계의 세기}} \approx \frac{D^2}{2+D^2} \quad (2)$$

$$b \approx \frac{D^2}{4} \cdot \left(\frac{\sqrt{9+4D^2}-1}{2+D^2} \right) \quad (D < 2) \quad (3)$$

Γ 와 b를 이용하여 1차원 3층 대칭형 유전체 도파관에서 기본모드만이 전파되기 위한 유효굴절율(N_{eff})을 표현하면 다음과 같다.

$$N_{eff}^2 = n_2^2 + b \cdot (n_1^2 - n_2^2) + \Gamma \delta n_1^2 + (1-\Gamma) \delta n_2^2 \quad (4)$$

δn_1^2 과 δn_2^2 은 주변환경에 따른 n_1^2 과 n_2^2 의 미소 변화량이다.

앞에서 정의된 물리량을 이용하여 BH형 직사각형 유전체 도파관에서 1차모드를 차단하고 기본모드를 전파할 조건은 아래와 같이 표시된다.¹⁵

$$\frac{2\pi W}{\lambda} \sqrt{N_{eff}^2 - n_2^2} \leq \pi \quad (5)$$

이 조건을 만족시키는 d와 W는 아래식으로 근사된다.¹⁶

$$W \cdot d \left(\frac{\sqrt{9+175d^2}-1}{2+43.8d^2} \right) \leq 0.145 \quad (6)$$

W와 d의 관계식을 이용하여 1차모드를 차단할 조건을 도식화하면 그림 2와 같다. 그림에서 곡선위의 W와 d의 쌍이 BH형 구조의 수동형 도파관에서 기본모드만을 전파할 수 있는 크기에 해당한다.

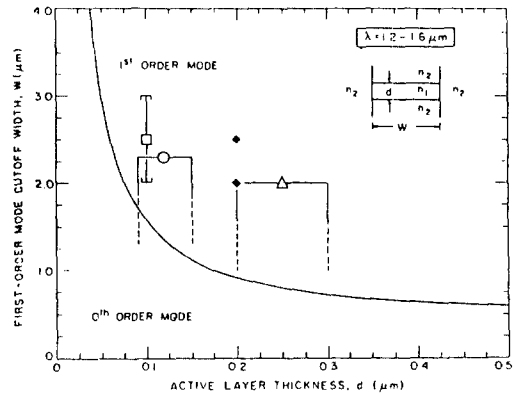


그림 2. BH형 도파관에서 1차모드 차단조건
Fig. 2. First-order mode cutoff condition for BH waveguide.

지금까지의 해석은 수동 BH형 도파관의 이론적 결과이나 실제 레이저의 발진 영역에서는 지금까지 고려하지 않았던 이득과 손실을 고려해야 한다. 실제로 1차모드 차단곡선위의 W와 d의 쌍에서도 수백의 문턱전류값까지 기본모드로 발진하였다고 보고되었다. (□⁷, ○⁸, ◆⁹, △¹⁰) 이런 이유로는 1차모드에 대한 기본모드의 이득영역이 중복되어 나타난다는¹¹ 설과 도

파관 세로면에서 산란손실이 1차모드가 기본모드보다 훨씬 크다는 주장이^[12] 있으나 아직 확실한 해석은 없다.

반도체 레이저의 문턱전류를 최소화하기 위한 d의 크기가 보통 0.1~0.2 μm 근처로 거의 고정되어 있으므로 기본모드만 존재하기 위한 도파관의 폭 W의 크기는 2 μm 이하이어야 한다.

2. 전류차단층의 설계

BH형 구조는 stripe형 레이저와는 달리 활성층(GaInAsP) 좌·우에 전류차단층(current blocking layer)을 삽입하는 구조이므로 전류차단층의 두께, 위치 및 불순물 농도를 결정해야 한다. 특히 전류의 양을 증가시키면, 활성층 밖으로 흐르는 전류의 양이 증가하게 되므로 고출력을 기대하기가 어렵게 된다. 활성층 이외 부분으로의 전류흐름을 최소화하기 위해서는 활성층 바로 좌·우층은 p형 InP층이어야 한다. 왜냐하면 같은 불순물 농도값에서 p형 InP의 저항성이 n형 InP층보다 약 10배정도^[13] 높기 때문이다.

p형 InP층을 기판으로 사용할 경우 n형 기판보다 전류차단층의 항복현상(breakdown)이 더 안정하며, 더 높은 전압하에서도 전류차단을 할 수 있고, 기판 뒷면을 p형 접착으로 전면사용할 수 있기 때문에 n형보다 상당히 ohmic저항을 줄일 수 있다.

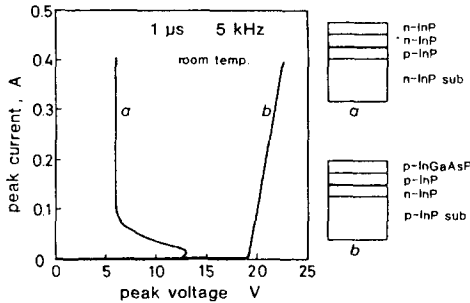


그림 3. n형, p형 기판 위의 전류차단층의 전류-전압 특성

Fig. 3. I-V characteristics of current blocking layers on n and p substrates.

그림 4는 BH형 구조를 전기적 등가회로로 나타낸 것이다. 가해진 전류가 점점 증가하면 활성층 밖으로의 누설전류가 증가하는데, 이 누설전류의 도통로는 n-p-n, p-n-p 트랜지스터의 전류이득에 좌우된다. 소수 반송자(minority carrier)의 확산거리(diffusion length)의 차로 얇은 base층의 불순물 종류에 따라 트랜지스터의 동작이 크게 변하는데, 얇은 base층이 n형이

면 트랜지스터는 turn-on을 하지 않게 되어 p형인 구조에 비하여 누설전류를 줄이는데 큰 효과가 있다.^[14]

위의 내용을 종합하면 활성층 옆은 p형 InP층이어야 하고 활성층 밑에 n*형 InP층이 존재하여야 한다. 위의 조건을 만족시키려면 p형 기판이 효율적이다.

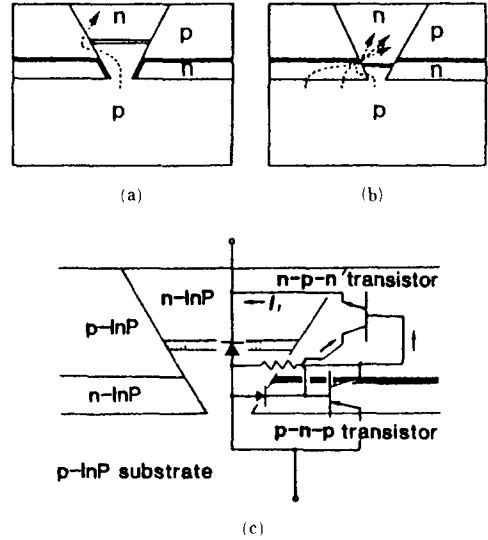


그림 4. (a) 활성층 옆이 p형 층인 경우
(b) 활성층 옆이 n형 층인 경우
(c) BH형 구조의 등가회로

Fig. 4. (a) p-current blocking layer adjacent to active.
(b) n-current blocking layer adjacent to active.
(c) Equivalent circuit to BH structure.

III. 제작 공정

BH형 구조의 레이저를 제작하기 위해서는 보통의 이중접합(DH: Double heterostructure)구조보다 1번의 결정성장(epitaxy)이 더 요구되며, 화학식각(chemical etching)공정 및 활성층의 stripe과 금속접착부의 stripe을 일치시키는 까다로운 공정등이 필요하다. DH구조의 stripe형 레이저에 대한 공정은 이미 자세히 언급되었으므로,^[15] BH형 레이저 제작시 생기는 문제점, 새로운 공정에 대하여 보고하기로 한다.

1. 1차 결정성장(First Epitaxy)

액상 결정성장법(liquid phase epitaxy)으로 DH구조의 결정을 성장시킬 경우, 중요한 것은 기판과의 격자정수정합(lattice matching)뿐 아니라, 이형 p-n 접합(p-GaInAsP/n-InP)을 위한 불순물 농도의 조절이다. 보통 p형 불순물로 Zn, n형으로 Sn을 사용하는데

확산계수가 Zn가 Sn보다 100배 정도 크기 때문에 ($D_{zn} \approx 1 \times 10^{-10} \text{cm}^2/\text{sec}$, 630°C 근처)¹¹⁶⁾ 매우 얇은 undoped GaInAsP 활성층은 p형 인접층의 불순물 농도와 같게 된다. 활성층에서 Zn의 농도가 $0.5 \sim 2 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 이상이면 문턱전류 밀도(J_{th})가 급상승하고 양자효율(η_q)은 떨어지기 때문에 p-InP층은 $1.0 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 근처의 농도로 결정성장되어야 한다. p형 농도를 조절하기 위하여 Zn양을 조절하는 것은 매우 어렵다. Honig의 자료에 의하면 $600 \sim 660^\circ\text{C}$ 근처에서 Zn의 승화압력(sublimation vapor pressure)이 약 10~40Torr로 매우 높아, 대부분의 Zn가 In용액속에 섞이기전에 승화하기 때문에, p형 불순물 농도를 재현성있게 조절하는 것은 거의 불가능한 것으로 알려져 있다.¹¹⁷⁾ 이의 해결책으로 1wt% (weight%)의 In-Zn alloy를 사용하였다. 이런 1차 In-Zn alloy를 충분히 In용액에 녹이기 위하여 Zn가 완전히 승화하는 온도 400°C 보다 100°C 정도 낮은¹¹⁸⁾ 300°C 근처에서 In과 In-Zn를 완전히 녹인 후(1~2시간) 균일화 온도까지 급상승시켰다. 1차 결정성장 후 전자현미경 사진이 그림5에 나타나 있다. 성장된 층은 n⁻InP/undoped GaInAsP/p⁻InP/p-sub순서이다.

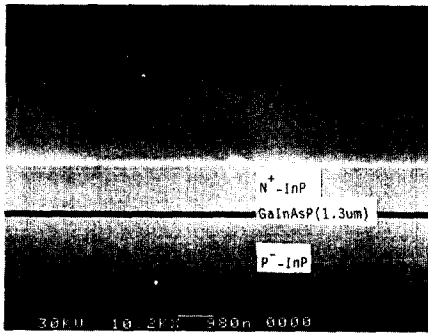


그림 5. 1차 결정성장 후의 단면사진
Fig. 5. SEM cross-section of DH wafer after first epitaxy.

2. Stripe형성 및 화학식각

단일모드 도파관 형성을 위하여 $2\mu\text{m}$ 근처의 균일한 stripe형성과 화학식각에 대하여 설명한다.

화학식각제에 대한 mask로써 2500 \AA 두께의 SiO_2 를 sputtering으로 증착하였다. 이 SiO_2 mask는 또한 2차 결정성장(2nd epitaxy)시 결정성장에 대한 mask로 작용하기 때문에 순도라든지, 사전 기판 세척처리가 매우 중요하다. sputtering을 이용한 SiO_2 증착은 두께가 2000 \AA 이하일 경우 미세구멍(pinhole)이 많이 존재하고, 화학식각제에 대한 완전한 mask역할을 못할 경

우도 있는데 주의하여 SiO_2 절연막을 증착하여야 한다.

stripe 방향은 역mesa(reverse mesa)구조가 생길 수 있게 (011) 방향을 택했다. 화학식각 공정은 GaInAsP와 InP를 동시에 제거할 수 있는 $\text{Br}_2-\text{CH}_3\text{OH}$ 용액으로 1차 식각하고, 오직 InP만을 식각할 수 있는 $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}_2$ 용액으로 2차 식각하여 GaInAsP 결정층을 표면에 드러냈다. 이 이유는 GaInAsP 결정이 InP 결정보다 열에 강하여 2차결정 성장중 받을 수 있는 열적충격(thermal damage)를 줄이고자 함이다.¹¹⁹⁾ 그림6에 지금까지의 과정이 도식화 되어 있고 그림7에 1차 식각후의 단면 현미경 사진이 나타나 있다.

3. 제 2차 결정성장 (Second Epitaxy)

2차원의 문헌 굴절을 도파관을 제작하고 활성층(GaInAsP) 이외의 부분으로 흐르는 전류를 제한하기 위하여 1차 결정성장 후 화학식각으로 제거된 n⁻InP층을 p-InP/n⁻InP의 두 층으로 메운다. 이 두 층을 차례로 성장시키기 전에, 표면에 드러난 활성층이 될 이외의 GaInAsP층을 불포화된 In용액($2\text{mg InP}/1\text{g In}$, 598°C 근처)으로 3초간 용액식각(melt-etching)하였다. 이 때 In용액의 불포화 정도와 용액식각되는 시간이 얼마만한 두께를 제거하느냐를 좌우하는데, 이 두께에 따라 앞에서 설계한대로 n⁻InP전류차단층의 위치가 결정되므로 주의하여야 한다.

n⁻InP층의 불순물 농도는 Sn으로 $2 \sim 5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$

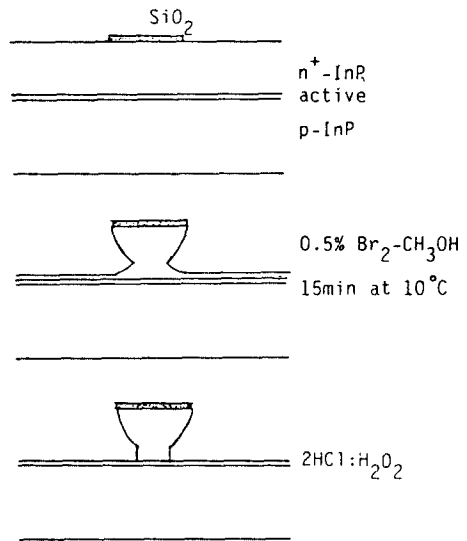


그림 6. 화학 식각공정의 도식도
Fig. 6. Schematic diagrams of chemical etching processes.

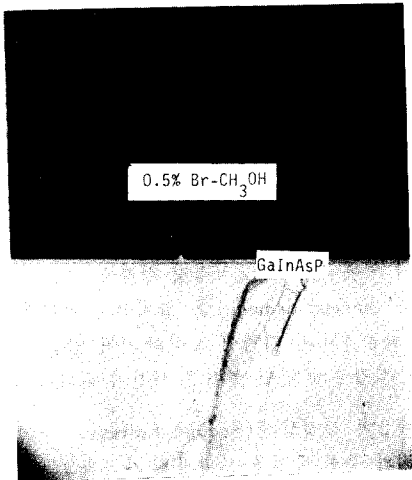


그림 7. 1차 식각 후의 단면사진(X400)
Fig. 7. Cross-section of the wafer after 1st etching.

정도로 거의 포화농도(carrier saturation concentration)에 이르도록 했다. n⁺-InP층 바로 위에 p-InP를 두께 2~3 μ m 정도로 성장시켰다. p층의 농도는 약 $5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 정도로 기대되었다.

2차 결정성장에서 주의할 것은 고온의 상태에서 P형 기관(Zn, $5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$)으로부터 Zn가 p-InP층을 p⁺-InP층으로 만들면서 활성층 속으로 뚫고 들어오는 상태가 발생하게 되는 현상이다. 심한 경우 n-InP층의 농도가 낮으면 1차 결정 성장시 n-InP/p-GaInAsP 경계면에 생겼던 p-n접합이 이동되어 레이저가 발진 불가능하게 된다. 따라서 2차 결정성장은 짧은 시간에 비교적 낮은 온도(600 $^{\circ}$ C~580 $^{\circ}$ C)에서 실시되어야 한다.

2차 성장이 끝난 후의 단면 도식도와 전자 현미경 사진이 그림8, 9에 나타나 있다. 2차 성장 후 기관의 표면 사진이 그림10에 100배 현미경 사진으로 나타나 있다.

4. 절연막 증착 및 금속 집착

1, 2차 결정성장(1st, 2nd epitaxy)이 모두 끝난 BH형 기관은 활성층으로만 전류를 통과하고, 이외의 부분에서 전류를 제한하도록 SiO₂ 절연막으로 stripe을 형성하였다. 이 SiO₂ 절연막은 p-n-p, n-p-n 트랜지스터의 전류차단이 완벽하면 필요없으나, 전류 차단층으로 흐를 수 있는 전류를 최대한 줄이자는 의도이다.

이를 위하여서는 활성층의 stripe과 SiO₂ stripe이 정확히 일치(aligning)해야 하는 까다로운 석판인쇄공정(photolithography)을 거쳐야 한다. 두 stripe이 일

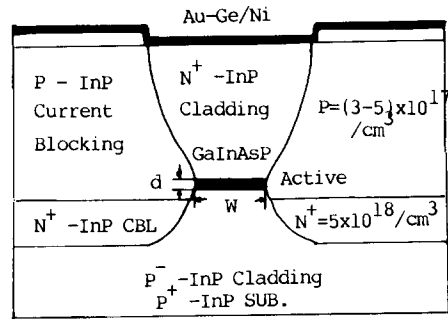


그림 8. BH형 구조의 단면도
Fig. 8. Cross-section of the BH wafer.

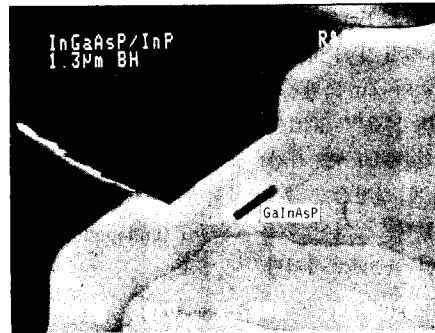


그림 9. BH형 레이저의 단면 SEM사진
Fig. 9. SEM cross-section of the BH laser.

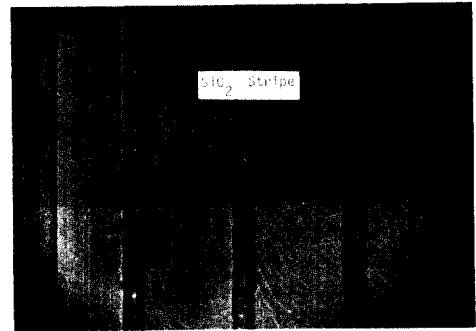


그림10. 2차 결정성장 후의 표면사진(X100)
Fig. 10. Surface photograph after 2nd epitaxy.

치하지 않으면 레이저 성능에 큰 역효과가 나타나고 문턱전류에 큰 영향을 미치게 된다.

화학식각용 stripe을 형성할 때 사용한 Cr-mask를 이 석판인쇄공정에서 사용하게 되었으므로 lift-off 공정이 시도되었다. stripe 모양을 형성하고 SiO₂를 증착하기전에 SiO₂가 증착될 부분의 photoresist(PR)가 완전히 제거되어야 한다. 왜냐하면 PR제거 후에 기관세

척(cleaning)이 거의 불가능하기 때문이다. 따라서 석판기술 제 과정마다 청결도 문제에 세심한 주의가 필요하다. 그림11에는 제 공정의 개략도가 도식화되어 있다.

SiO₂의 stripe 모양이 형성된 후 반도체와 금속간의 저항성 접촉(ohmic contact) 공정이 시도되었다. 낮은 저항이 레이저의 수명 및 성능을 향상시키기 때문에 매우 중요한 공정이다.

n형 금속증착용으로는 Au-Ge(88 : 12)의 혼합물과 Ni의 이중 금속막을 이용하였고, p형 금속용으로는 InP계에서 가장 일반적인 Au-Zn(90 : 10)을 열 증착한 후에 열처리하였다.¹²⁾

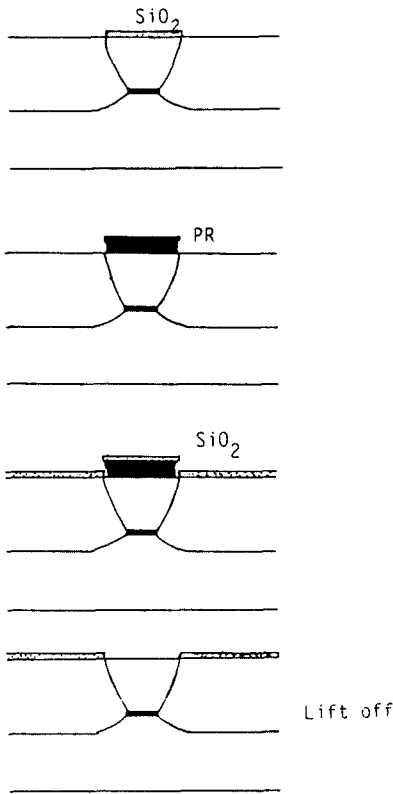


그림11. 절연막 형성을 위한 공정
Fig. 11. Process steps for insulation film.

IV. 특성 측정

제작된 소자의 전기적, 광학적 특성을 조사하여 보므로써 제작공정의 양·부 및 소자의 성능이 어느 정도인지 알 수 있고, 측정된 결과를 참고하여 제 공정의 개선을 꾀하므로써 소자의 성능이 향상되기 때문

에 측정 및 이에 대한 해석은 매우 중요한 의미를 지닌다.

1. 전기적 특성

레이저 다이오드의 전기적 특성중 기본적인면서 중요한 것은 전류대 전압특성으로 p-n접합의 위치, 경계면 결함등에 대하여 간접적으로 알 수 있고, 주변 p-n층의 불순물 농도 및 금속 반도체간의 접촉저항등을 알 수 있다.

1차 결정성장 특성을 평가하기 위하여 n⁺-InP/p-GaInAsP의 p-n접합 특성을 3층 결정성장 기관으로 다이오드를 제작하여 전류대 전압특성을 조사하였다. 이 때 stripe형성, 금속증착 및 열처리 공정은 BH형 표본기관과 동일하였다.

내부 형성전압(built-in voltage)은 약 0.7[V] 정도를 나타내었다. 이것은 1.3μm파장에 해당하는 bandgap을 갖는 n⁺-InP/p-GaInAsP 경계면의 다이오드 특성에 대표적인 값이다. 역 방향 항복전압(reverse breakdown voltage)의 경우, p-n접합의 근접층 중 더 낮은 불순물 농도를 갖는 층의 농도에 따라 항복전압이 결정된다. n⁺-InP층이 굉장히 농도가 높은 점을 고려하면 p-GaInAsP층의 불순물 농도가 곧 항복전압과 관련된다고 볼 수 있다. 1차 결정 성장후에 p-n다이오드를 제작하여 측정된 항복전압이 약 6[V] 정도로 나타났으므로 활성층의 p형 불순물 농도는 약 2~3 × 10¹⁷/cm³임을 간접적으로 알 수 있다.¹²⁾ 실제로 활성층의 농도를 약 1 × 10¹⁷/cm³ 이하로 내려야(항복전압은 약 10[V]) 레이저의 문턱전류를 낮추는 최적 값이 된다.

BH형 구조를 만들기 위하여 화학식각, 2차 결정성장을 거친 후 전류대 전압특성이 어떻게 변화하였는가를 BH형 구조의 완성된 레이저 다이오드 특성으로 살펴보자. 다음은 완성된 BH형 레이저의 전류대 전압

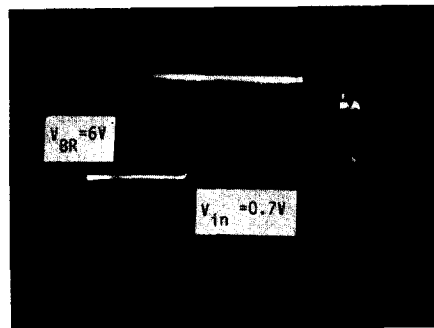


그림12. DH wafer 다이오드의 전류-전압 특성
Fig. 12. I-V characteristics of DH diode.

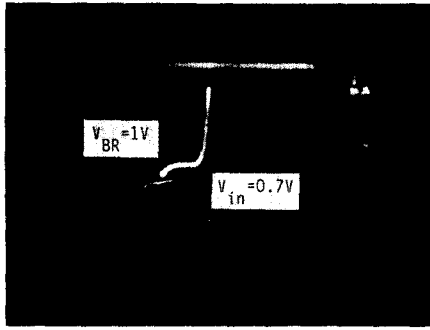


그림 13. BH레이저의 전류-전압 특성
Fig. 13. I-V characteristics of BH laser diode.

특성곡선이다.

전류-전압곡선에서 내부형성전압은 약 0.7[V]를 그대로 유지한 것으로 보아 p-n접합의 위치는 변화하지 않았다. 그러나 항복전압이 약 6[V]에서 1[V]로 줄어 들었다. 이 현상은 활성층의 p형 불순물 농도가 크게 증가하거나, 활성층 세로 벽면에 결함이 2차 결성성장 중에 생겨, 이곳으로 누설전류의 통로가 형성될 가능성을 나타내어 준다. 이 현상에 대하여서는 더 깊은 연구가 필요하다.

전류-전압의 순방향 기울기로서 레이저 다이오드의 동작저항을 근사적으로 알 수 있다. 측정 결과 약 20~40 Ω 의 큰 값을 나타내었다. 이 값은 수 Ω 정도 낮아야 고성능 소자의 제작이 가능하게 된다. 약 5 μm × 300 μm 근처의 좁은 면적에 수 Ω 의 낮은 저항값을 갖는 금속-반도체 접착기술의 개선이 요구된다.

2. 광 특성

제작된 레이저의 광 특성은 주로 발전개시 문턱전류 (I_{th}), 단일모드 가능성, 양자효율 (η_i), 공진기 손실 (α_{loss}), 특성온도 (T_0), 및 상온연속발전 가능성 타진 등으로 요약될 수 있다. 레이저 개발초기 단계에서 아직 체현성 있는 공정 미숙으로 소자간에는 큰 특성 차이가 있었으나, 비교적 양호한 특성을 보인 소자에 대하여 언급하고자 한다.

비교적 stripe 경계면이 양호하고 거울반사면도 잘 만들어진 BH-27형의 광 출력 특성이 그림14에 나타나 있다. 발전 과정은 1.2937 μm 이었고 문턱전류가 72mA (23 $^{\circ}\text{C}$)이며 1.4배의 문턱전류까지 단일모드 발전한 레이저로, 주파수 선폰 역시 FWHM에서 2 \AA 이내였다. 광 출력 곡선의 기울기인 미분양자효율(differential quantum efficiency) 역시 약 20% 정도로 양호한 레이저로 상온연속발전에 성공하였다. 레이저의 총 저항값은 25 Ω 정도로 크게 나타났다. 이 저항값이 수 Ω 근처

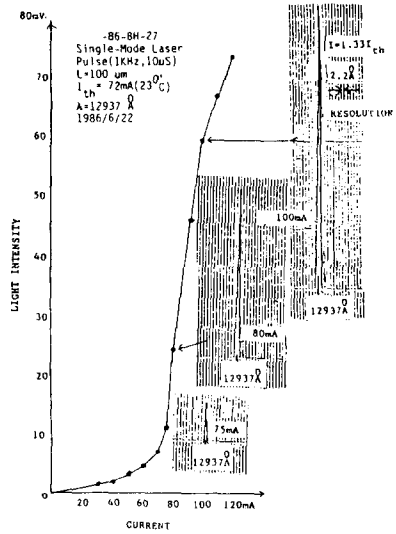


그림 14. 단일모드 레이저의 전류 광출력 특성
Fig. 14. I-L characteristics of single mode laser.

이면 더 낮은 문턱전류 및 고온 연속발전이 가능할 것이다. 1.4배 이상에서 2개의 모드로 발전하였는데 이것은 활성층이 약간 두껍게 (0.2 μm 이상) 성장되었기 때문인 것 같다.

공진기 길이에 따른 η_i 의 값의 관계로 내부양자효율 (η_i : internal quantum efficiency)과 공진기 손실을 측정할 수 있다. 그림15로부터 η_i 는 약 27%로 측정되었다. 이 값은 1.3 μm GaInAsP에 대하여 통상적으로 알려져 있는 값과 잘 일치한다.^[22]

따라서 활성영역의 결정상태는 대단히 양호한 것으로 판단되어진다. α_{loss} 는 약 45/cm로 일반적인 값인 30/cm^[23] 보다는 크게 나타났다. 이것은 η_i 가 양호하다는 점으로 미루어 보아 stripe 벽면이 불균일하여 생긴 산란손실이기 때문이라 추측되며 stripe 제작시 주의하면 쉽게 해결될 수 있을 것이다.

역시 상온연속발전에 성공한 BH-31형 레이저의 온도에 따른 문턱전류변화를 구한 것이 그림16에 나타나 있다. 문턱 전류가 온도에 대한 관계식은 지수함수에 비례하며 특성온도는 레이저의 성능 평가에 중요한 변수 중 하나이다

$$I_{th} = I_0 \exp(T/T_0)$$

측정된 T_0 는 약 85K였고, 레이저의 열저항은 약 64 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 로 측정되었다. T_0 는 1.3 μm 레이저의 경우 대표적인 값이다. 열저항 측정은 입력펄스의 duty에 따른 문턱전류의 증가량 ($\Delta I_{th}/\Delta P_{in}$)과 온도증가에 따른 문턱전류의 증가량 ($\Delta I_{th}/\Delta T^{\circ}\text{C}$)로 측정 하였었는데 보통의 값 30~50 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 보다 크게 나타났는데, 이것도 T_0

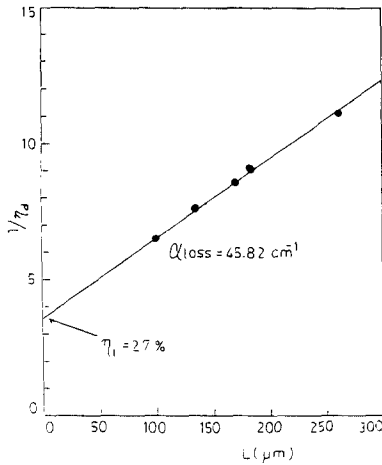


그림15. η_a 와 L 의 관계도
Fig. 15. η_a plot as a function of L .

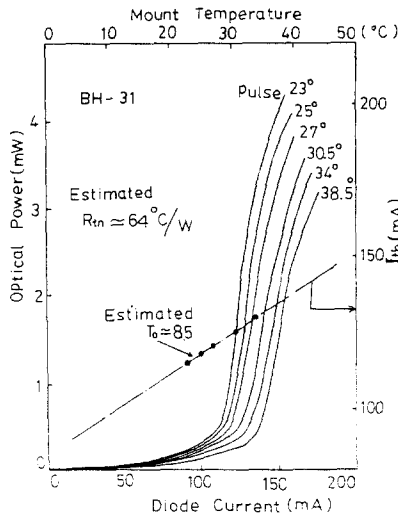


그림16. 온도에 따른 광출력 특성
Fig. 16. Optical-power dependence on T .

의 값을 고려하여 본다면 역시 ohmic저항 때문이라 해석된다.

반도체 레이저의 상온연속발진은 레이저 상용화의 기초조건으로 실험적 기술이 요구된다. 일단 레이저가 동작하면 열이 발생하고 이에 따른 문턱전류의 증가로 일정한 광출력에 필요한 전류는 더욱 필요하게 되기 때문에 상온 연속발진이 가능하려면 높은 특성온도, 낮은 열저항 및 낮은 ohmic저항이 필수이다. 실험적으로 연속발진이 가능한 문턱전류의 범위를 T_0 , R_{th} , R 로 나타낸 식을 참조하여 보자.^[24]

$$I_{th} \cong \frac{T_0}{R_{th} \cdot E_g} \cdot \frac{2}{1 + \sqrt{1 + 4RT_0/R_{th} \cdot E_g^2}} \exp\left(-\frac{1}{2} - \frac{1}{1 + \sqrt{1 + 4RT_0/R_{th} \cdot E_g^2}}\right) \quad (7)$$

이식에 $T_0 = 85K$, $R_{th} = 65^\circ C/W$, $R = 25\Omega$, $E_g = 0.95eV$ 를 대입하면 문턱전류가 125mA 이하에서 상온 연속발진 가능하게 된다.

단일모드 발진에 성공한 BH-27형 레이저로 상온연속발진(DC) 실험을 하여 얻은 전류-광출력 특성곡선이 그림17에 표시되어 있다.

BH-31형 레이저로 수명측정을 하었는데 레이저 mount의 온도변화에 따른 광 출력의 변화를 살펴보았다. 50% duty인 구형파로 동작시켰고, 약 1시간 후의 레이저 특성에 별 변화는 없었다.(그림18)

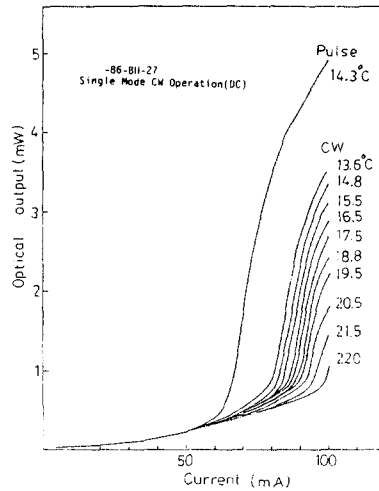


그림17. CW 전류-광출력 특성
Fig. 17. CW L-I characteristics.

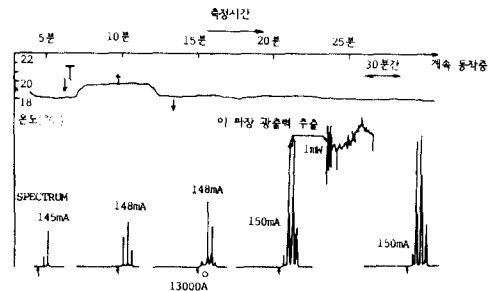


그림18. 레이저의 수명 측정
Fig. 18. Life-time test of CW laser.

V. 결 론

p형 기판을 이용한 1.3 μm GaInAsP BH형 레이저 제작에 대하여 보고하였다. 제작된 레이저의 고유 특성치는 내부양자효율(η_i)는 약 30%, 외부양자효율(η_d)는 10~20%, 특성온도(T_0)는 85K, 열 저항(R_{th})은 65°C/W의 값을 나타내었다. 단일모드 특성을 나타낸 레이저로 상온연속발진(DC)에 성공하였다. 레이저 제작 공정중에 금속접착 기술개선으로 저항값(R)을 낮추고 미숙한 공정이 조금만 개선되면, 단일모드 장파장 레이저의 상용화가 가능하리라 기대된다.

參 考 文 獻

- [1] K.C. Kao and G.A. Hockem., "Dielectric-fiber surface waveguide for optical frequency," *Proc. Inst. Electron. Engineers.*, vol. 113, July 1966.
- [2] T. Miya, "Ultimately low loss single mode fiber at 1.55 μm ," *Electron. Lett.*, vol. 15, pp. 106, Feb. 1979.
- [3] D. Marcuse, *Theory of dielectric waveguide*, Academic Press, pp. 44, 1974.
- [4] H. Kressel and J.K. Bultler, *Semiconductor lasers and heterojunction*, Academic Press, pp. 145, 1977.
- [5] D. Botez, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-17, pp. 178, Feb. 1981.
- [6] D. Botez, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-18, pp. 865, May 1982.
- [7] I. Mito, *IECE, Japan*, vol. OQE, pp. 80, 1981.
- [8] R.J. Nelson, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-17, pp.202, Feb. 1981.
- [9] H. Nagai, *Jpn J.A.P.*, vol. 19, pp. L218, Apr. 1980.
- [10] H. Kano, *J.A.P.*, vol. 50, pp. 7934, Dec. 1979.
- [11] J. Buss, *Appl. Opt.*, vol. 20, pp. 1884, May 15, 1981.
- [12] C.H. Henry, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-17, pp.2196, nov. 1981.
- [13] Y. Nakano, *Electronics Letters*, pp. 782 15 zh, Oct. 1981.
- [14] Y. Nakano, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-21, pp.452, May 1985.
- [15] 권영세의, 광통신용 반도체 발광소자 개발에 관한 연구, 과학기술처 M97-2271-4, 1984.
- [16] O. Wada, *J. Electro chem. Soc.*, vol. 127, no. 10, Oct. 1981.
- [17] R.E. Honig, *RCA Rev.* 23, pp 567, 1962.
- [18] K. Tabatabaie-Alavi, *J. Electronchem. Soc.*, vol. 129, no. 9, pp.2085, 1982.
- [19] S. Arai, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-17, no. 5, pp.640, May 1981.
- [20] 권영세의, 광통신용 반도체 발광소자 개발에 관한 연구, 과학기술처 M202-2539-4, 1985.
- [21] Y. Itaya, ph.D. Thesis, T.I.T, Jpn, 1980.
- [22] M. Asada. *Appl. Phys. Lett.*, 41, pp. 353-355, 1982.
- [23] Y. Itaya, *Jpn. J.A.P.*, pp 1975, 21, 1979.
- [24] R.W. Keyes, *IBMJ. Res. Develop.*, 9, pp. 303-314, 1965.