

변조 도핑된 SMQW-PBH-DFB-LD의 고속변조 특성

장동훈 · 이중기 · 조호성 · 박경현 · 김정수 · 박철순 · 김홍만 · 편광의

한국전자통신연구소 화합물반도체 연구부

(1995년 4월 28일 반음)

초고속 광통신을 위한 고속변조용 단일모드 반도체레이저로서 변조 도핑된 SMQW-PBH-DFB-LD를 제작하고, 변조특성을 측정하였다. 제작된 소자의 최소 임계전류는 16.0 mA, 최대 slope efficiency는 0.275 mW/mA 였다. 고속변조를 위한 활성층의 변조도핑으로 소자의 내부손실은 37 cm⁻¹로 크게 주어졌으나, 이득계수의 증가에 따라 선폭확대계수는 1.8로 감소 되었다. 소신호 변조 특성 측정 결과, 46 mA ($I_{th} + 30$ mA) 에서의 공진주파수 8 GHz, -3 dB 차단주파수 10 GHz 이상으로서 고속변조 특성이 우수한 변조도핑된 SMQW-PBH-DFB-LD를 시험 제작하였다.

I. 서 론

초고속 광통신 기술의 발전에 따라 광원으로 사용되는 반도체레이저는 광섬유의 분산의 영향을 배제하기 위하여 동적단일모드 동작을 유지하면서 대용량 전송을 위한 초고속 변조특성을 가져야 한다. 이와같이 동적단일모드의 DFB-LD에 고속변조 기능을 주기 위하여서는 반도체레이저의 기생정전용량의 감소, damping factor의 감소, 공진주파수(resonance frequency)의 향상이 필수적이다.^[1-2] 기생정전용량은 소자의 RC 시간정수에 의하여 변조속도를 제한하게 되므로 반도체레이저의 일반적인 저항 5 Ω에 대하여 20 GHz 이상의 변조대역폭을 얻기 위하여서는 정전용량 1.6 pF 이하를 요구하게 되므로 체널식각 또는 반절연 전류차단층을 사용 하므로서 해결되고 있다. 활성층의 재료로부터 결정되는 반도체레이저의 이득축소(gain compression)에 의한 damping factor(K)는 본연구에서 사용하는 InP계 PBH-LD 구조에 있어서는 약 20 GHz 이상을 나타내게 되므로 20 GHz 이하의 광통신용 광원으로 사용될 DFB-LD에서 변조 특성은 활성층의 미분이득으로부터 주어지는 공진주파수에 의하여 주로 결정되게 된다.

반도체레이저에 있어서 공진주파수는

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{S_0 \Gamma}{\tau_p} \left(\frac{dg}{dn} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

의 식으로 표시될 수 있으며^[3] 강도변조의 유효한 대역폭을 결정하는 -3 dB 차단주파수는 공진주파수에 대해서 1.55배로 계산된다. 식 (1)에서 광자밀도와 미분이득의 증가 또는 광자의 평균수명의 감소에 따라 변조속도를 향상시킬 수 있음을 알 수가 있다.

한편 활성층의 이득은

$$g \propto |M_b|^2 D_{nd} (f_c - f_r) \quad (2)$$

의 식으로 표현될 수 있다.^[3] 위 식에서 M_b 와 D_{nd} 는 각각 천이화율 및 유효상태밀도로서 활성층에 양자구조의 도입에 따라 증가될 수 있는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 bulk의 경우 상태밀도(density of state)가 포물선 형태로 형성되는 반면, 양자우물 구조는 양자구속효과에 의해 계단형 준위를 형성하여 활성층의 이득과 미분이득이 향상된다.^[4] 또한 quantum well에 응력(strain)을 가하면, in-plane 정공의 유효질량을 감소시켜 가전자대의 상태밀도와 전도대의 상태밀도 간의 비대칭성을 줄여주어 transparency 캐리어 밀도가 감소되어 미분이득을 증가시킬 수 있다. 특히 압축응력 다중양자우물(SMQW: compressive strain MQW) 활성층은 가전자대의 heavy hole band와 light hole band가 분리되어 첫 번째 heavy hole subband가 전도대와 주된 천이대를 이루게 되며, LD에서 발진하는 TE 모드에 집중적인 이득을 주게 된다. 이러한 SMQW 활성층의 경우 격자 정합된 MQW에 비해 미분이득을 2배 정도 증가시킬 수 있을 것으로 예상되었는데^[5], 실험을 통해 1.86% 압축응력된 S-MQW는 격자정합된 MQW 보다 미분이득이

*본 논문은 한국 통신의 출연금에 의하여 수행한 연구 결과입니다.

3배 증가함이 입증되었다.^[6]

또한 식 (2)를 활성층에 대한 주입전하 밀도에 대한 이득변화로 표현하면

$$\frac{dg}{dn} \propto |M|^2 D_{red} \frac{d(f_c - f_i)}{dn} \quad (3)$$

으로 주어지며 dg/dn 은 미분이득으로 정의 된다. 여기서 활성층을 p-type으로 높게 도핑함에 따라 주어진 주입 전하의 변화량에 대해서 Fermi-Dirac term($f_c - f_i$)을 크게 증가시킴으로서 미분이득을 크게 할 수 있다. SMQW 활성층에서 정공의 유효질량이 전자의 유효질량에 비해 10배 이상 크기 때문에 준 페르미 준위(quasi Fermi level)는 전도대쪽으로 치우치게 된다. 즉, 전자의 준 페르미 준위는 전도대 내부에 있지만 정공의 준 페르미 준위는 가전자대 위에 있게 되는데, 이 경우 barrier층에 높은 p-doping을 해주게 되면 정공의 준 페르미 준위가 가전자대 내부로 이동되어 Fermi-Dirac term($f_c - f_i$)의 증가로 매우 큰 이득계수를 얻을 수 있다. 이와같이 변조도핑된 SMQW 활성층은 일반적인 SMQW 활성층에 비해 공진 주파수는 2.5~4배 증가한다고 보고되어 있다.^[3] 그러나 양자우물 내의 높은 도핑농도는 이온화된 불순물들에 의하여 발생되는 비발광 결합결합 tailed states들에 의하여 광학적이들이 감소하게 되므로 활성층 구조내의 barrier층만 높은농도의 p-type 불순물로 변조도핑한다. 따라서 본 논문에서는 정전용량을 줄이기 위해 채널 식각된 발진 파장 1.55 μm인 압축응력 1.2%인 SMQW-PBH-DFB-LD에서 활성층 내 barrier층을 Zn로 변조도핑한 구조의 DFB-LD의 제작 및 고속변조 특성을 조사하였다.

II. 제작 및 특성 평가

본 실험에 사용된 변조도핑된 SMQW-PBH-DFB-LD의 활성층 구조를 그림 1에 나타내었다. 채널식각된 SMQW-PBH-DFB-LD의 제작 과정은 이미 본 연구실에서 발표한 바 있다.^[7,10]

1.55 μm 단일모드 동작을 위한 2430 Å의 회절격자는 InP 기판위에 간접노광과 습식식각을 이용하여 제작하였다. 회절격자위에 성장되는 GaInAsP의 광도파로층은 1200 Å의 n-type($1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)과 300 Å의 p-type($1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)으로 구성 되었다. 이와같은 높은농도로 도핑된 1500 Å의 광도파로층 위에 undoped GaInAs(40 Å)와 Zn에 의한 $1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 로 도핑된 GaInAsP(60 Å) 10 pair의 활성층을 MOVPE로 결정성장 하였다. 양자

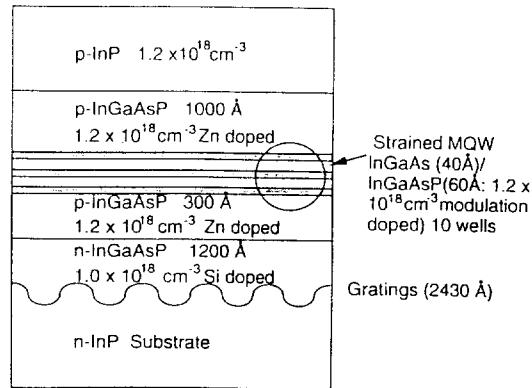


그림 1. 변조도핑된 SMQW-PBH-DFB-LD 활성층 구조.

우물 구조 위의 광도파로층은 $Zn 1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 농도의 GaInAsP층 1000 Å을 사용 하였으며 clad층도 Zn로 $1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 농도의 InP층을 사용 하였다. 이와같은 1차 결정성장을 통하여 삼각형 형태의 회절격자는 변형되어 단일모드동작에 최적의 결합계수를 얻을 수 있다. 단일모드의 동작을 위하여 습식식각을 이용하여 활성층의 폭은 1 μm로 하여 p-n-p-InP blocking layer의 2차 결정성장과 clad 및 cap층의 3차 결정성장은 LPE로 행하였다. 제작된 칩의 정전용량 감소를 위하여 8 μm 폭의 도파로 주위에 습식식각법을 사용하여 채널을 형성 하였으며 bonding pad의 면적도 최소화 하였다. 제작된 칩의 단일모드선택성 향상과 단면 광출력 증가를 위하여 SiO_2 를 이용하여 무반사막 coating을 행하였다.

변조도핑된 SMQW-PBH-DFB-LD는 활성층에서의 높은 도핑농도에 의한 광흡수의 증가에 따라 임계전류의 증가와 slope efficiency가 감소하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 제작한 변조도핑된 SMQW-PBH-DFB-LD는 평균임계전류 24.88 mA(최소 16 mA)로 같은구조의 변조도핑되지 않은 SMQW-PBH-DFB-LD의 평균임계전류 8.72 mA에 비하여 크게 증가되어 있음을 알 수 있다. 그러나 변조도핑된 SMQW-PBH-DFB-LD의 평균 slope efficiency는 0.197 mW/mA(최대 0.275 mW/mA)로 변조도핑되지 않은 LD의 0.181 mW/mA에 비하여 오히려 증가하고 있음을 알 수가 있다. 이와같은 변조도핑에 의한 slope efficiency의 증가는 변조도핑된 활성층에 의한 이득계수의 증가에 따른 영향으로 생각된다.

본 연구에서는 주입전하량의 변화에 따른 자연방출 스펙트럼에서의 굴절율 변화량과 이득변화량을 측정 하였으며 이로부터 직접적으로 선폭확대계수를 계산 하였다. 그림 2에 본 연구에서 사용한 이득, 주 mode 파장

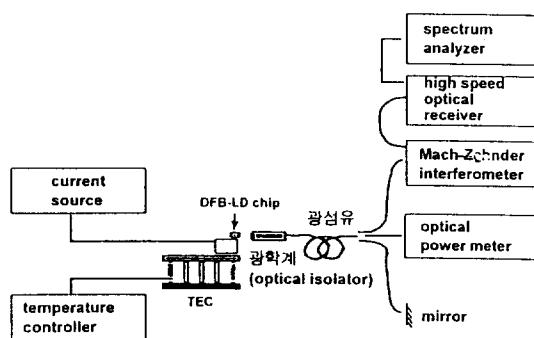


그림 2. 측정시스템 구성도.

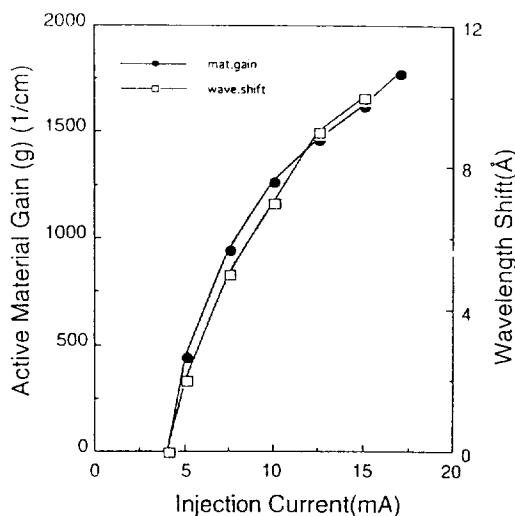


그림 3. 주입전류에 따른 변조도평된 SMQW-PBH-DFB-LD의 이득 및 파장 변화.

변화, 공진주파수 측정시스템을 나타내었다.

반도체레이저에서 임계전류 이하의 전류에서는 활성 층에 의한 이득과 손실은

$$Ig - \alpha = \alpha_m + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{\sqrt{r_i} - 1}{\sqrt{r_i} + 1} \right) \quad (4)$$

의식으로 표현된다.^[11-12] I 는 광가둠계수(optical confinement factor), α 는 광도파로 내부손실, α_m 은 공진기 mirror 손실이며 우변의 마지막 항은 활성층의 이득으로부터 주어지는 공진기 모드의 강도변조 진폭을 나타낸다. 식 (4)에서 r_i 는 i 번째 mode에서의 최대와 최소의 광출력의 비로서 전류주입에 따라 측정된다. 본 연구에서 제작한 임계전류 16 mA인 변조도평된 SMQW-PBH-DFB-LD에서 회절격자에 의한 mirror 손실은 77 cm^{-1} 로

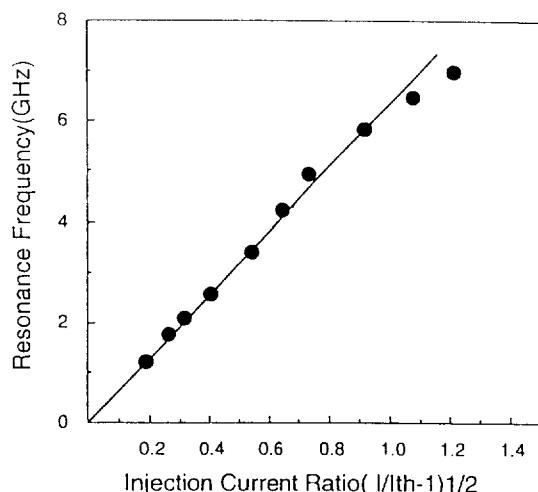


그림 4. 주입전류에 따른 변조도평된 SMQW-PBH-DFB-LD의 공진 주파수.

환산 되었으며, 공진기 길이 $300 \mu\text{m}$, 광가둠계수(I) 0.064 일 때 주입전류에 따른 DFB 모드의 매질이득과 주모드 파장의 변화를 그림 3에 나타내었다.

그림 3에서 발진임계전류에서의 반도체레이저의 발진 조건으로부터 내부손실은 약 37 cm^{-1} 로 평가되었으며, 이는 활성층 주위가 도핑되지 않은 구조의 내부손실값 약 10 cm^{-1} 와 비교하여 크게 증가하고 있음을 알 수가 있다. 또한 그림 3에서 이득은 주입전류에 따라 직선적으로 증가하지 않고 있으며, 이는 주입전하의 수명이 주입밀도에 따라 감소함으로서 주입전류와 실제 매질이득을 결정하는 주입전하 밀도가 비례하지 않기 때문이다. 그림 3의 주입전류(전하밀도)에 따른 활성층의 매질이득으로부터

$$g = a(n - n_o) \quad (5)$$

로 주어지는 이득상수 a 를 구할 수가 있다. 본 실험에서는 활성층의 이득이 0일 때의 transparency 전하밀도 (n_o)로서 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 을 얻었고 이에 대한 a 는 $9 \times 10^{16} \text{ cm}^2$ 을 얻었다. 또한 주입전류 증가에 따라 DFB mode의 파장도 단파장 쪽으로 변화하게 되며 변화량을 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 주입전류에 따른 파장변화량과 이득증가의 비로부터 선폭확대 계수 α 를 계산하여^[11] 약 1.8을 얻었다. 이 값은 변조도평 되지 않은 SMQW-PBH-DFB-LD에서의 2.7에 비하여 변조도평에 의하여 크게 감소되었음을 알 수가 있다. 이와 같은 선폭확대계수의 감소로부터 고속변조시의 chirping도 감소될 것으로 예

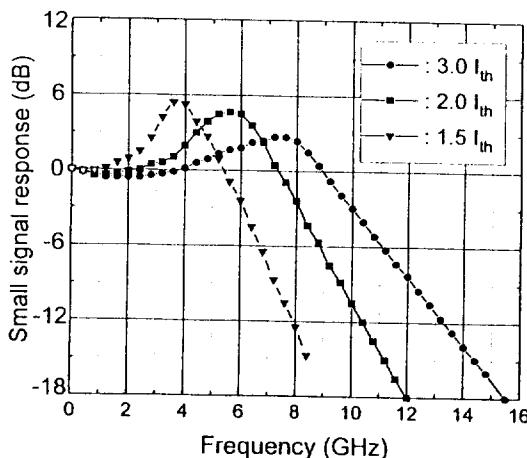


그림 5. 변조도핑된 SMQW-PBH-DFB-LD의 소신호 변조특성.

상된다.

LD를 연속 발진시키면서 주파수에 따른 광전력 분포를 보면 LD 자체의 공진주파수대에서 큰 강도 잡음이 발생하며, 특히 외부로부터 광궤환이 있을 때 잡음은 더욱 크게 나타난다. 이것을 이용하여 고속 광수신기와 전기 스펙트럼 분석기로 실험대상 DFB-LD의 주입전류에 따른 공진 주파수를 측정한 결과를 그림 4에 나타내었다.

그림 4에서 주입 전류의 증가에 따라 광자밀도가 증가하므로 공진주파수는 주입전류의 증가에 따라 선형적으로 증가되며, 본 연구에서 제작한 소자에서는 $2I_{th}(36 \text{ mA})$ 에서 6 GHz의 높은 값을 갖고 있음을 알 수 있다.

그림 5에는 본 연구에서 제작한 변조도핑된 SMQW-PBH-DFB-LD의 소신호 변조특성을 나타내었다. $1.5 I_{th}$ 에서 공진주파수 3.6 GHz, $2.0 I_{th}$ 에서 공진주파수 5.5 GHz, $3.0 I_{th}$ 에서 공진주파수 8.0 GHz의 높은 값을 갖고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 5에서는 46 mA($I_{th} + 30 \text{ mA}$)에서 소신호 변조의 -3dB 차단주파수는 그림 5에서 10 GHz 이상이 될 수 있음을 알 수 있다. 이와 같은 높은 주파수 응답특성은 미분이득 증가와 함께 활성층의 높은 도핑에 의한 전하의 주입이 쉽게 이루어지기 때문으로 생각된다.

III. 결 론

$1.5 \mu\text{m}$ 파장대의 초고속 광통신용 광원으로서 변조도핑된 SMQW-PBH-DFB-LD를 제작하였다. 광도파로층과 활성층내의 barrier층은 Zn를 사용하여 $1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

으로 도핑하였으며, 1.2% 압축응력 SMQW-PBH-DFB-LD에서는 변조도핑에 따른 내부손실의 증가와 이득상수의 증가에 따라 최소 임계전류 16 mA(평균임계전류: 24.88 mA), 최대 slope efficiency는 0.275 mW/mA(평균 slope efficiency: 0.197 mW/mA)를 얻었다. 임계전류 이하에서의 주입전류에 따른 이득의 변화로부터 이득상수 a 는 $9 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ 의 높은 값을 갖고 있으며 선폭확대계수는 1.8로서 변조도핑되지 않은 SMQW-PBH-DFB-LD에서의 선폭확대계수 2.7과 비교하여 크게 감소되었다. 공진주파수는 광자밀도의 제곱근에 비례하여 증가하고 있으며, $1.5 I_{th}$ 에서 공진주파수 3.6 GHz, $2.0 I_{th}$ 에서 공진주파수 5.5 GHz, $3.0 I_{th}$ 에서 공진주파수 8.0 GHz의 높은 값을 갖고 있음을 알 수 있다. 바이어스 전류 46 mA($I_{th} + 30 \text{ mA}$)에서 소신호 변조의 -3 dB 차단주파수는 10 GHz 이상으로서 작은 선폭확대계수와 함께 광통신에 활용될 수 있을 것으로 예상 된다.

참 고 문 헌

- [1] K. Uomi, M. Aoki, T. Tsuchiya and A. Takai, Fiber and Integrated Optics, **13**, 17(1994).
- [2] R. Olshansky, P. Hill, V. Lanzisera and W. Powazinik, IEEE J. Quantum Electron., **QE-23**, 1410 (1987).
- [3] K. Uomi, Jap. J. Appl. Phys., **29**, 81(1990).
- [4] Y. Arakawa and A. Yariv, IEEE J. Quantum Electron., **QE-21**, 1666(1985).
- [5] S. W. Corzine and L. A. Coldren, Appl. Phys. Lett., **59**, 588(1991).
- [6] K. Kikuchi, M. Kakui, C. E. Zah and T. P. Lee, IEEE Photonics Technol. Lett., **3**, 314(1991).
- [7] 이중기, 장동훈, 조호성, 이승원, 박경현, 김정수, 김홍만, 박형무, 홍창희, 전자공학회논문지, **31**, 139 (1994).
- [8] 장동훈, 이중기, 조호성, 김정수, 박경현, 김홍만, 박형무, 한국광학회지, 5, no. 3, 418(1994).
- [9] 이중기, 장동훈, 조호성, 박경현, 김정수, 김홍만, 박형무, 전자공학회논문지 투고 중.
- [10] K. H. Park, D. H. Jang, J. K. Lee, H. S. Cho, J. S. Kim, J. H. Han, H. T. Lee, N. Hwang, H. M. Kim, H.-M. Park and S.-C. Park, Optical and Quantum Electronics, accepted for publish.
- [11] I. D. Henning and J. V. Collins, Electron. Lett., **19**, 927(1983).
- [12] H. C. Casey, Jr. and M. B. Panish, *Heterostructure Lasers* (Academic Press, New York, 1978), part B, 236.

Fabrication of High Speed Modulation Doped SMQW-PBH-DFB-LD

D.H. Jang, J.K. Lee, H.S. Cho, K.H. Park, J.S. Kim,

C.S. Park, H.M. Kim and K.E. Pyun

Compound Semiconductor Department, ETRI, Taejon 305-606, Korea

(Received: April 28, 1995)

We have made modulation doped SMQW-PBH-DFB-LD for high speed optical communications. The waveguide and barrier layers were doped by Zn with the concentration of $1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Mean threshold current and slope efficiency were 24.88 mA (minimum 16 mA) and 0.197 mW/mA (maximum 0.275 mW/mA) respectively. Linewidth enhancement factor (α) of MD-SMQW-PBH-DFB-LD was reduced than that of SMQW-PBH-DFB-LD. Linewidth enhancement factor of 1.8 owes to the large gain coefficient of modulation doped active layer. The resonance frequency was linearly increased with the square root of optical power. The resonance frequency in small signal modulation was measured as 8 GHz and -3 dB modulation bandwidth was 10 GHz at $46 \text{ mA}(I_{th} + 30 \text{ mA})$.