論文95-32A-8-14

압축응력 다중양자우물 구조 InGaAs/InGaAsP PBH-DFB-LD의 제작과 특성 평가

(Fabrication and Characterization of InGaAs/InGaAsP Strained Multiple Quantum Well PBH-DFB-LDs)

李 重 基 *, 張 東 薰 *, 曺 豪 成 *, 朴 景 鉉 *, 金 定 洙 *,
金 弘 晩 *, 朴 亨 茂 *

(Lee Jung Kee, Jang Dong Hoon, Cho Ho Sung, Park Kyung Hyun, Kim Jeong Soo, Kim Hong Man, Park Hyung-Moo)

요 약

1.55㎛ 파장의 SMQW-PBH-DFB-LD를 OMVPE 및 LPE 결정 성장을 통하여 제작하였다. 활성층을 압축응력 다중양자우물 구조로 함으로써 선폭 확대 계수 값이 2.65로 작게 측정되었으며, 42개 모듈의 NRZ code된 2.5Gbps 대신호 변조 신호에서 chirping 값 평균이 0.44nm로 매우 작게 나타났다. 광 출력이 5mW 이상일 때까지 단일 모드로 발진하고, 측 모드 억제율이 30dB 이상인 77개 칩의 평균 발진 임계 전류는 8.72mA 이고, 평균 slope efficiency는 0.181mW/mA였다. 또, 발진 파장의 편차가 3.57nm로 매우 균일한 결정 성장이 이루어졌음을 알 수 있다.

Abstract

Strained multiple quantum well(SMQW) PBH-DFB-LDs emitting at 1.55㎛ wavelength has been fabricated using OMVPE and LPE crystal growth technique. Using the SMQW active layer, a linewidth enhancement factor of 2.65 was obtained at lasing wavelength and consequently, packaged 42 modules showed a very low average chirp of 0.44nm at 2.5Gbps NRZ direct modulation. The 77 devices showed average threshold current of 8.72mA and average slope efficiency of 0.181 mW/mA, and single longitudinal mode operation with SMSR larger than 30dB up to 5mW. Among the 77 devices, standard deviation of lasing wavelength of 3.57nm was obtained owing to a good crystal growth uniformity.

I. 서 론

1.55㎛ 파장에서 발진하는 단일 종모드 반도체 레이저 제작은 장거리, 고속 광통신의 필수적인 요건이 되었다. 이는 단일 종 모드 발진의 레이저가 개발되면서 광섬유의 전송 폭 제한의 큰 요인이던 색분산에 의한 문제점을 크게 해소해 주었기 때문이다. 그러나, 단일 종 모드 발진을 하는 DFB(distributed feedback laser) 혹은 DBR(distributed bragg reflector) 레이저의 경우에도 고속 직접 변조, 장거리(2.5Gbps,

* 正會員, 韓國電子通信研究所 化合物半導體研究部
(Compound Semiconductor Department, ETRI)
接受日字:1994年12月21日, 수정완료일:1995年7月29日

~100km) 전송에서는 파장 chirping에 의한 신호 분산이 발생된다. 이러한 현상은 bit rate × 전송 거리의 크기를 제한하게 되므로 이를 줄이기 위한 노력이 계속되어 왔다. 특히 본 연구실에서는 작은 선폭 확대 계수 값 및 작은 chirping 값을 갖는 고속 광통신용 DFB-LD를 제작하기 위하여 활성층을 bulk, 다중양자우물(multiple quantum well : MQW) 등으로 변화시키면서 소자를 제작한바 있다.[11,12]

반도체 레이저에서 chirping은 고속 변조의 경우에 발생하며 전류의 증가/감소에 따른 캐리어 밀도(carrier density) 변화로 굴절률이 변화하여 파장이 이동하는 것이 주된 원인으로 알려져 있다.[13,14] 즉, 캐리어에 의해 유도되는 이득(혹은 손실)의 변화가 Kramers-Kronig 관계에 의해 굴절률의 변화를 가져오게 된다. 이들 간의 변화 관계를 선폭 확대 계수(linewidth enhancement factor : α)로 정의한다.[13~15] 선폭 확대 계수는 chirping을 결정하는 중요한 변수이며 이를 줄이기 위한 노력이 계속되고 있는 실정이며 고속 직접 변조의 경우 chirping은 $\sqrt{1+\alpha^2}$에 비례하는 것으로 알려져 있다.[13,16] 이와 같이 중요한 변수인 선폭 확대 계수 값을 감소시키기 위해 많은 연구가 진행되어 왔다. 이 경우 크게 두 가지 방법이 제안되어 왔다. 먼저, 활성층의 구조를 변화시키는 방법이 제안되었다.[7,14] 즉, 활성층을 100Å 이하의 얇은 층으로 형성시키는 양자 우물 구조(quantum well : QW)로 형성시켜 상태 밀도(density of state)를 변화시킴으로써 이득 곡선이 다른 형태를 갖게 되어 미분 이득을 증가시켜 주는 것이다.[8] 이 경우 미분 이득 증가에 따라 선폭 확대 계수와 자연 방출 광 계수(spontaneous emission factor)를 감소시킬 수 있다. 또 다른 방법으로는 일반적인 Fabry-Perot 구조의 레이저에서는 최대 이득과 발진 파장이 일치하는 곳에서 발진하지만 DFB 혹은 DBR 구조의 레이저의 경우 최대 이득과 다른 파장에서 발진하게 할 수 있다. 즉, photon energy가 증가하면 선폭 확대 계수가 감소하므로[9] negative detuning을 형성시켜 주면 미분 이득 증가로 선폭 확대 계수를 줄여 줄 수 있다.[10]

따라서 본 논문에서는 OMVPE 및 LPE를 이용하여 SMQW 구조의 활성층을 갖는 PBH-DFB 레이저를 제작하여 발진 임계 전류, slope efficiency 및 파장 분포 등을 측정하였으며, 선폭 확대 계수 값과 2.5Gbps NRZ 신호로 대신호 변조하였을 때의 chirping 분포를 측정하였다.

Ⅱ. 소자 제작 공정

DFB-LD 제작을 위한 2380Å주기의 회절 격자를 n-InP 기판 위에 He-Cd 레이저를 사용하여 간섭 노광 시킨 후 HBr계를 이용한 식각 공정을 통하여 형성시켰다. 활성층 영역 형성은 다음과 같이 수행되었다. SMQW LD의 활성층은 OMVPE(organo-metallic vapor phase epitaxy)를 사용하여 1.2% 압축 응력된 40Å InGaAs well과 InGaAsP(λ_g=1.12㎛) barrier 층을 8 쌍 성장하여 제작하였다. 1차 성장이 끝난 후의 메사 식각은 $HBr:H_3PO_4:K_2Cr_2O_7$=2:2:1 용액을 이용한 비 선택 식각 방법을 이용하였다. 식각 후 활성층의 폭은 1~1.5㎛였다. 식각 공정 후에 SiN를 마스크로 전류 차단 층(current blocking layer) 성장을 위한 p-n 구조의 2차 선택 결정 성장을 LPE(liquid phase epitaxy)를 이용하여 수행하였다. 이때, p-InP 및 n-InP 층의 두께는 1~1.5㎛가 되도록 하였고, p층의 도핑은 ~1×10^{18}㎝$^{-3}$으로 n층의 도핑은 ~3×10^{18}㎝$^{-3}$이 되도록 In/Zn 및 In/Te alloy를 이용하여 각각 도핑하였다.

2차 성장이 끝난 후에는 p-InP 및 옴 접촉용 p^+-InGaAs 층을 웨이퍼 전면에 LPE를 이용하여 성장시켰다. 여기에서 마지막 p^+-InGaAs층은 옴 접촉 특성을 좋게 하기 위해 ~2×10^{19}㎝$^{-3}$으로 도핑하였다. 결정성장이 끝난 후, photolithography 공정을 이용하여 채널 식각을 위한 SiN 식각 마스크를 형성시킨 후 0.2% Br-methanol 용액을 이용하여 채널 식각을 행하였다. 본 실험에서는 채널 폭 4㎛, 메사 폭이 22㎛인 마스크를 이용하여 6㎛ 깊이로 식각 한 후의 메사 폭은 8㎛였다. 채널 형성 후에 4000Å의 SiN를 증착 한 후 옴 접촉을 위해 메사 중앙에 3㎛ 폭의 contact window를 open한 후 lift-off 공정을 이용하여 Ti/Pt/Au를 형성시켰다. 기생 정전 용량을 감소시키기 위해 60×80㎛ 크기의 본딩 패드를 공진기 좌, 우에 금 도금 공정을 통하여 형성시켰다. DFB 모드의 발진과 출사면의 광출력을 높이기 위해, sputtering장비를 이용하여 레이저 거울면 한쪽을 $\lambda/4$ 두께의 SiO_2로 coating하여 반사율 5% 이하로 낮추었다. 그림 1에 SMQW-DFB-LD의 개략도를 나타냈다.

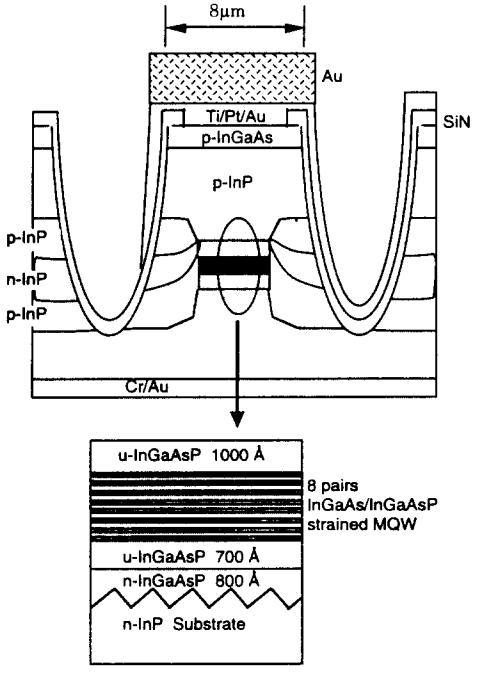


그림 1. SMQW-PBH-DFB-LD의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of SMQW-PBH-DFB-LD.

Ⅲ. SMQW-PBH-DFB-LD의 특성

동일 웨이퍼 내에서 단일 종 모드로 발진하고 5 mW 광 출력에서 측 모드 억제율이 30 dB 이상인 77개 칩의 발진 임계 전류, slope efficiency 및 발진 파장 분포를 측정하였다.

그림 2는 발진 임계 전류 분포를 나타내고 있다. 77개 칩의 평균 임계 전류는 8.72mA 이고 표준 편차가 2.97mA로 나타났다. 이는 본 연구실에서 LPE로 활성층을 제작한 PBH-LD의 경우(평균 임계 전류 : 11.36mA, 표준 편차 : 5.11mA)[1] 보다 낮은 발진 임계 전류 값과 작은 표준 편차 값을 나타내고 있다. 발진 임계 전류 값은 활성층 구조, waveguide 층 조성 및 도핑 농도 등 여러 변수에 의해 좌우되지만 본 연구에서 비교한 결과는 활성층 이외의 구조를 동일하게 하였다. 따라서 활성층이 SMQW 인 경우 활성층에 압축 응력을 가해 줌으로써 in-plane 정공 질량이 감소하여 transparency 전류 밀도가 낮아져서 임계 전류가 낮아진 것으로 생각된다.[11]

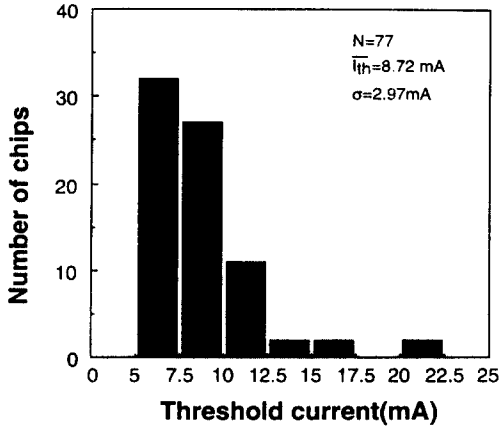
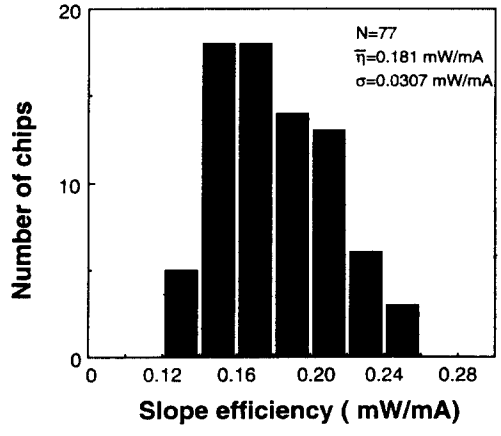


그림 2. 1.55μm SMQW-PBH-DFB-LD의 발진 임계 전류 분포
Fig. 2. Distributions of threshold currents of 1.55μm SMQW- PBH-DFB-LDs.

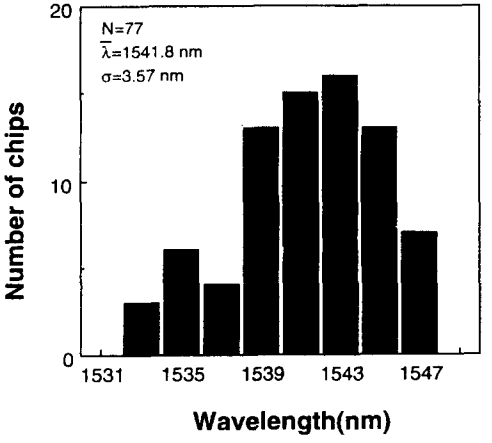
그림 3은 77개 칩의 slope efficiency 분포를 나타내고 있다. 평균 slope efficiency는 0.181 mW/mA 이며 표준 편차 0.031mW/mA를 나타냈다. 이는 앞서 논의된 LPE로 제작된 시료의 경우[1] 보다 18% 정도 향상된 특성이며 최고 0.243 mW/mA의 slope efficiency 값을 얻었다.



Distributions of Slope efficiencies of 1.55μm SMQW-PBH-DFB_LDs

그림 3. 1.55μm SMQW-PBH-DFB-LD의 slope efficiency 분포
Fig. 3. Distributions of slope efficiencies of 1.55μm SMQW- PBH-DFB-LDs.

그림 4는 5mW 광 출력에서의 77개 칩의 발진 파장 분포를 나타내고 있다. 그림 4에서의 표준 편차가 3.57nm로서 회절 격자 위에 OMVPE로 성장된 DH(double heterostructure) 구조에서 회절 격자가 일정한 깊이로 형성되었고 결정성장이 균일하게 되었음을 알 수 있다. 이는 LPE로 제작된 20개의 시료가 6.2nm의 표준편차를 보였으므로 OMVPE로 수행한 회절 격자 위의 결정 성장 층의 두께 및 조성이 균일함을 알 수 있다.



Distributions of Slope efficiencies of 1.55㎛ SMQW-PBH-DFB LDs

그림 4. 1.55㎛ SMQW-PBH-DFB-LD의 발진 파장 분포

Fig. 4. Distributions of lasing wavelengths of 1.55㎛ SMQW- PBH-DFB-LDs.

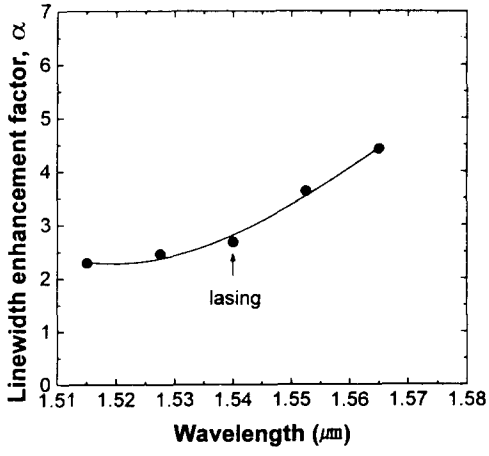
측정에 사용된 소자의 300㎛ 공진기에서의 온도 변화(15℃~45℃)에 따른 파장 이동은 0.8Å/℃로 측정되었으며 온도 변화(290K~320K)에 따른 발진 임계 전류 변화로부터 측정한 특성 온도 T_0는 65K 였다. 이는 일반적인 SMQW 소자의 경우와 유사한 결과이다.[12]

DFB-LD는 기본적으로 Gbps 급 이상의 고속 대신호 변조용 광원으로서 제작된다. 따라서 Gbps 급 대신호 변조시 발진 모드의 chirping 특성을 예측할 수 있는 선폭 확대 계수에 대한 평가가 중요한 항목이 된다.

선폭 확대 계수는 주입 전하 밀도 변화에 따른 굴절률 변화와 이득 변화의 비로 정의되며 다음 식을 이용하여 추출할 수 있다.[3],[13]

$$\alpha = -\frac{4\pi}{\lambda}\frac{dn/dN}{dg/dN} = \frac{2\pi}{\delta\lambda}\frac{d\lambda_i}{d[\ln\{(\sqrt{r_i}+1)/(\sqrt{r_i}-1)\}]} \quad (1)$$

(1)식에서 n은 굴절률, N은 캐리어 밀도, g는 이득, $\delta\lambda$는 Fabry-Perot 종 모드 간격이고, $d\lambda_i$는 주입 전류 레벨(전하 밀도에 비례)에 따른 i번째 모드의 파장 변화, r_i는 i 번째 모드의 peak와 valley의 광출력 비이다. 그림 5는 300㎛ 공진기 길이를 갖는 소자의 발진 파장에 따른 선폭 확대 계수를 나타내고 있다. 이는 발진 임계 전류 값 보다 작은 여러 주입 전류 레벨에서 광 스펙트럼 분석기로 측정한 $d\lambda_i$(파장 변화)와 상대적인 이득 증가 ($d[\ln\{(\sqrt{r_i}+1)/(\sqrt{r_i}-1)\}]$)를 이용하여 측정하였다.



The linewidth engancement factor versus wavelength of SMQW-PBH-DFB-LDs. The lasing wavelength is indicated by the arrow.

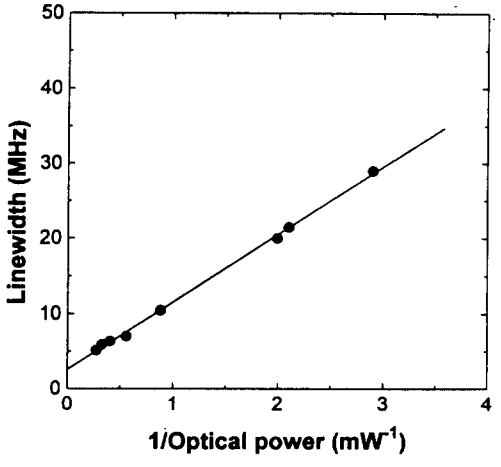
그림 5. SMQW-PBH-DFB-LD의 파장에 따른 선폭 확대 계수. 화살표는 발진 파장을 나타낸다.

Fig. 5. The linewidth enhancement factor versus wavelength of SMQW-PBH-DFB-LDs. The lasing wavelength is indicated by the arrow.

즉, 주 모드를 중심으로 장 파장 쪽 모드 및 단 파장 쪽 모드에 대해 수행하였으며 측정 중 LD 칩의 온도를 23℃±0.02℃로 일정하게 유지하였다. 측정 데이터의 기울기로부터 구한 선폭 확대 계수 값은 2.3~4.4에 분포하였다. 그림 5에서 화살표로 표시된 부분이 발진 파장을 나타낸다. 발진 파장에서의 선폭 확대

계수 값이 2.65로서 일반적인 SMQW의 경우와 유사하다.[12] 또, 그림 5에서 선폭 확대 계수 값이 측정된 모드의 파장에 따라 크게 달라졌는데 장 파장쪽 모드와 단 파장쪽 모드 사이의 파장 간격에 따라 다르게 나타났다. 즉, 단 파장쪽에서는 25nm의 파장 간격에서 0.39 만큼 차이가 났고, 장 파장쪽에서는 25nm의 파장 간격에서 1.74 만큼 차이가 났다. 이것은 DFB-LD 제작에 있어서 활성층의 최대 이득 파장에 대해서 회절 격자로 조절되는 DFB 모드의 발진 파장을 단 파장 쪽으로 이동(negative detuning)시킴으로써 어느 정도의 선폭 확대 계수 값을 감소시켜 전송 특성의 개선을 이룰 수 있음을 의미한다.

SMQW-PBH-DFB-LD의 광출력에 따른 선폭을 측정한 결과를 그림 6에 보였다. 선폭은 5km의 광섬유가 삽입된 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계와 스펙트럼 분석기를 사용하여 delayed self-homodyne 방법으로 측정하였다. 측정 결과 (선폭)·(광출력) 값으로 10MHz·mW를 얻었으며 $(1+\alpha^2)$ 항이 부가된 변형된 Schawlow-Townes 선폭 식에서 DFB 모드에 결합되는 자연 방출 광 비율(spontaneous emission rate)을 상수로 두고 그림 6의 기울기와 $(1+\alpha^2)$을 비교할 경우 선폭 확대 계수는 3으로 주어졌다.[14] 이는 그림 5의 결과와 유사한 값이다.

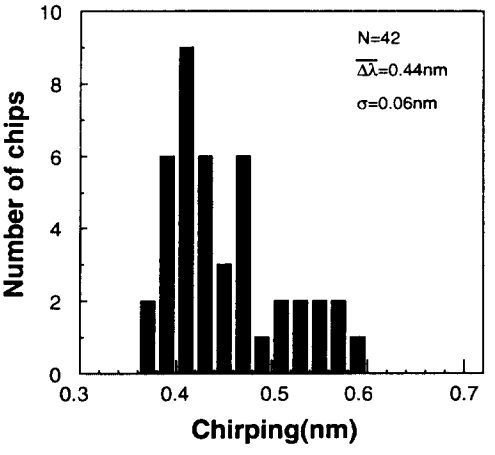


Spectral linewidth as a function of the inveres output power

그림 6. 광 출력에 따른 선폭
Fig. 6. Spectral linewidth as a function of the inverse output power.

그림 5와 그림 6의 결과로부터 SMQW 활성층에서 기인한 낮은 선폭 확대 계수 값 때문에 선폭도 작게 나타났을 뿐만 아니라 chirping도 $\sqrt{1+\alpha^2}$에 비례하여 커질 것으로 예측되므로 활성층의 중요성을 알 수 있다.

그림 7에는 변조 전류를 $30mA_{p-p}$로 하고, pre-bias를 $1.5I_{th}$로 하였을 때의 42개 모듈의 chirping 값 분포를 나타냈다. 이 때의 변조 신호는 NRZ code된(pseudorandom binary sequence : 2^{23}-1) 2.5Gbps 변조 신호 였다. 그림 7에서 chirping 값의 평균이 0.44nm로 매우 작으며 표준 편차도 0.06nm로 우수한 특성을 보였다.



Distributions of 20dB down chirping of 1.55㎛ SMQW-PBH-DFB-LDs under 2.5Gbps NRZ direct modulation at 1.5 I_{th}

그림 7. 1.55㎛ SMQW-PBH-DFB-LD의 chirping 분포
Fig. 7. Distributions of 20dB down chirping of 1.55㎛ SMQW- PBH-DFB-LDs under 2.5Gbps NRZ direct modulation at 1.5 I_{th}.

Ⅳ. 결 론

1.55㎛ 파장의 장거리 대용량 광통신용 SMQW-PBH-DFB-LD를 제작하였다. 회절 격자 제작은 He-Cd 레이저를 사용하여 간섭 노광법에 의해 제작하였으며 PBH 구조를 위해 3회의 결정성장을 OMVPE 및 LPE로 행하였다. 동일 웨이퍼에서 광출력이 5mW 이상일 때까지 단일 모드로 발진하고, 측모드억제율이 30dB 이상인 77개 칩의 발진임계전류의 평균이 8.72mA 이고 2.97mA의 표준 편차를 보였다. 이들의

slope efficiency 평균은 0.181mW/mA였다. 발진 파장의 편차가 3.57nm로 매우 균일한 결정 성장이 이루어 졌음을 알 수 있다. 발진 파장에서의 선폭 확대 계수 값이 2.65로 측정되었으며, 42개 모듈의 NRZ code된 2.5Gbps 변조 신호에서 chirping 값 평균이 0.44nm로 매우 작게 나타나 SMQW 활성층을 가지는 DFB-LD가 우수한 특성을 보임을 알 수 있었으며, 향후 modulation 도핑을 활성층에 도입하면 더욱 우수한 특성을 얻을 수 있을 것이다.

감사의 글

※ 본 논문은 한국 통신의 출연금에 의하여 수행한 연구 결과입니다.

참 고 문 헌

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

[2] 장동훈, 이중기, 조호성, 김정수, 박경현, 김홍만, 박형무, "2.5Gbps 광통신용 저 chirping MQW-PBH-DFB-LD의 제작", 한국광학회지, vol. 5, no. 3, pp. 418~422, 1994

[3] C. H. Henry, "Theory of the linewidth of semiconductor lasers", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-18, no. 2, pp. 259~264, 1982.

[4] M. Osinski, J. Buus, "Linewidth broadening factor in semiconductor lasers-An overview", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-23, no. 1, pp. 9~29, 1987.

[5] F. Kano, Y. Yoshikuni, M. Fukuda, and J. Yoshida, "Linewidth enhancement factor of 1.3㎛ InGaAsP/InP strained-layer multiple-quantum-well DFB lasers", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, no. 10, pp. 877~879, 1991.

[6] T. Yamanaka, Y. Kiyoyuki, K. Yokoyama, W. Lui, and S. Seki "Theoritical study on enhanced differential gain and extremely reduced linewidth enhancement factor in quantum-well lasers", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 6, pp. 1609~1616, 1993.

[7] J. Buus, *Single Frequency Semiconductor Lasers*, Vol TT5, SPIE, Washington, chapter 8, 1991.

[8] Y. Arakawa and A. Yariv, "Theory of gain, modulation response, and spectral linewidth in AlGaAs quantum well lasers", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-21, no. 10, pp. 1666~1674, 1985.

[9] K. Kikuchi, M. Kakui, C. E. Zah, and T. P. Lee, "Differential gain and linewidth enhancement factor of 1.5-㎛ multiple-quantum-well active layers with and without biaxially compressive strain", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, no. 4, pp. 314~317, 1991.

[10] F. Kano, T. Yamanaka, N. Yamanaka, Y. Yoshikuni, H. Mawatari, Y. Tohmoro, M. Yamamoto, and K. Yokoyama, "Reduction of linewidth enhancement factor in InGaAsP-InP modulation-doped strained multiple-quantum-well lasers", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 6, pp. 1553~1559, 1993.

[11] C. E. Zah, R. Bhat, F. J. Favire, Jr., S. G. Menocal, N. C. Andreadakis, K.-W. Cheung, D.-M. D. Hwang, M. A. Koza, and T. P. Lee, "Low-threshold 1.5 ㎛ compressive-strained multiple- and single-quantum-well lasers", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 27, no. 6, pp. 1440~1450, 1991.

[12] P. J. A. Thijs, L. F. Tiemeijer, P. I. Kuindersma, J. J. M. Binsma, and T. V. Dongen, "High-performance 1.5㎛ wavelength InGaAs-InGaAsP strained quantum well lasers and amplifiers", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 27, no. 6, pp. 1426~1439, 1991.

[13] N. K. Dutta, H. Temkin, T. Tanbun-Ek,

and R. Logan, "Linewidth enhancement factor for InGaAs/InP strained quantum well lasers", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 57, no. 14, pp. 1390~1391, 1990.

[14] I. Suemune, "Theoretical study of differential gain and strained quantum well structures", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 27, no. 5, pp. 1440~1450, 1991.

저 자 소 개

李 重 基(正會員) 第 32券 A編 第 6號 參照
현재 한국전자통신연구소 화합물소자 연구실 선임연구원

曺 豪 成(正會員) 第 32券 A編 第 6號 參照
현재 한국전자통신연구소 화합물소자 연구실

金 定 洙(正會員) 第 32券 A編 第 6號 參照
현재 한국전자통신연구소 광전자 연구실 선임연구원

朴 亨 茂(正會員) 第 32券 A編 第 6號 參照
현재 한국전자통신연구소 반도체 연구단 단장

張 東 薰(正會員) 第 32券 A編 第 6號 參照
현재 한국전자통신연구소 화합물소자 연구실 선임연구원

朴 景 鉉(正會員) 第 32券 A編 第 6號 參照
현재 한국전자통신연구소 화합물소자 연구실 선임연구원

金 弘 晩(正會員) 第 32券 A編 第 6號 參照
현재 한국전자통신연구소 광전자 연구실 실장