

論文95-32A-8-11

활성층 구조에 따른 DFB-LD의 선폭확대계수 및 미분이득 비교

(Comparison of linewidth enhancement factor
and differential gain of DFB-LDs with
various active layer structures)

朴景鉉*, 曺豪成*, 張東薰*, 李重基*, 金定洙*, 李承遠*,
金弘晚*, 朴亨茂*

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

요약

Bulk, MQW 및 S-MQW 구조의 활성층을 가지는 DFB-LD의 선폭확대계수 α , 선폭, chirping 및 미분이득을 측정하고 비교하였다. 활성층의 최대 이득과장에서의 α 는 각각 6(bulk), 4(MQW) 및 3.2(S-MQW)였으며, 2.5Gbps변조시의 chirping은 각각 1.29nm(bulk), 0.67nm(MQW) 및 0.48nm(S-MQW)였으며, 이 때 각 활성층 구조의 미분이득은 $5.4 \times 10^{-16} \text{cm}^2$ (bulk), $8.6 \times 10^{-16} \text{cm}^2$ (MQW) 및 $2.4 \times 10^{-15} \text{cm}^2$ (S-MQW)였다. 또한 p형 modulation doping된 S-MQW 활성층은 2 이하의 α 값을 가질 수 있음을 확인하였다.

Abstract

Linewidth enhancement factor α , linewidth, chirping and differential gain characteristics were measured and compared for each DFB-LDs containing active layers composed of bulk, MQW, and S-MQW, respectively. α of 6, 4 and 3.2 and chirping measured under 2.5Gbps modulation of 1.29nm, 0.67nm and 0.48nm were given for DFB-LDs of bulk, MQW and S-MQW active layers, respectively. And S-MQW has the largest differential gain of $2.4 \times 10^{-15} \text{cm}^2$ (S-MQW) compared to that of $5.4 \times 10^{-16} \text{cm}^2$ (bulk) and $8.6 \times 10^{-16} \text{cm}^2$ (MQW). Linewidth enhancement factor α of less than 2 is expected with p-type modulation doped S-MQW DFB-LD.

I. 서 론

동적 단일 모드 DFB-LD에 있어서 선폭확대계수 (linewidth enhancement factor) α 는 고속 대신호 변조에 의한 선폭 흔들림(chirping)을 결정하고^[1].

발진 선폭과 외부 광케이블에 대한 안정도를 좌우하는 중요한 소자 변수이다.^[2] α 는 주입전하에 따른 활성층의 굴절률 변화에 대한 이득 변화의 비로 정의되므로 궁극적으로 활성층의 미분이득(differential gain)에 의해 결정된다.^[3] 따라서 미분이득을 증가시킬 수 있는 활성층 구조를 가지는 LD를 제작하게 되면, 공진주파수(resonance frequency)가 높아져서 변조 대역폭이 증가하고^[4]. 선폭확대계수가 작아져서 낮은 chirping을 갖게 될 뿐만 아니라 외부 광케이블의 영향

* 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

을 적게 받아 안정된 동작특성을 얻을 수 있다. LD 제작 초기에는 액상 결정성장 (liquid phase epitaxy)에 의해 주로 결정성장이 이루어져서 수 백Å 이내의 활성층을 제어하기는 어려웠지만, 유기금속 기상증착법 (MOVPE: metal-organic vapor phase epitaxy)이나 분자선 증착법(MBE: molecular beam epitaxy)과 같은 결정성장 기술의 발달에 따라 결정성장층의 두께와 조성을 임의로 조정할 수 있게 됨으로써 양자우물 구조(QW:quantum well, 또는 MQW: multiple quantum well)와 같은 높은 미분이득을 가지는 활성층 제작이 가능해지게 되었다.

일반적으로 bulk의 경우 상태밀도(density of state)가 포물선 형태로 형성되는 반면, 양자우물 구조는 양자구속효과에 의해 계단형 준위를 형성하여 활성층의 이득과 미분이득이 향상되고^[5], 선폭확대계수 값이 bulk 형의 5.7에 비해 3.5로 개선된다는 사실이 확인되었다.^[6] 또한 quantum well에 응력(strain)을 가하면, in-plane 정공의 유효질량을 감소시켜 가전자대의 상태밀도와 전도대의 상태밀도 간의 비대칭성을 줄여 주어 transparency 캐리어 밀도가 감소하고, 미분이득이 증가하게 될 뿐 아니라, 장파장 대역의 LD에서 문제가 되는 비발광 Auger 재결합이나 intervalence band absorption 등을 개선할 수 있다는 것이 제안되었다.^[7] 특히 압축 응력 다중양자우물 (S-MQW: compressive strain MQW) 활성층은 가전자대의 heavy hole band와 light hole band가 분리되어 첫번째 heavy hole subband가 전도대와 주된 천이대를 이루게 되며, LD에서 발진하는 TE 모드에 집중적인 이득을 주게 된다. 이러한 S-MQW 활성층의 경우 격자정합된 MQW에 비해 미분이득을 2배 정도 증가시킬 수 있을 것으로 예상되었는데^[8], 실험을 통해 1.86% 압축응력된 S-MQW는 격자정합된 MQW 보다 미분이득이 3배 증가하고 선폭확대계수 값은 3/4으로 감소된다는 것이 입증되었다.^[9] 한편, MQW 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 barrier 층에 높은 p-doping을 해주게 되면 정공의 준 페르미 준위가 가전자대 내부로 이동되어 매우 큰 미분이득을 얻을 수 있다는 사실이 제안되었고,

MQW 활성층에 비해 공진 주파수는 2.5배 증가되고 chirping은 1/5로 감소한다는 사실이 실험적으로 확인되었다.^[10] 그러나 앞서 언급한 활성층에 따른 실험 결과들은 여러 발진파장 및 활성층 구조에 걸쳐 단편적으로 산재해 있어서 활성층 구조에 따른 α 및 미분이득 등의 일관된 경향을 파악하기는 매우 어려운 실정이다.

따라서 본 논문에서는 발진 파장 1.55 μm 인 PBH(planar buried heterostructure)-DFB-LD에서 활성층을 bulk와 MQW 및 S-MQW 구조로 제작하였을 때 선폭확대계수 α , 선폭(linewidth), 공진 주파수 및 chirping 특성을 조사하고, 아울러 미분이득을 산출함으로서 활성층에 따른 LD의 동작특성을 비교하였다.

II. 특성 측정 및 평가

실험에 사용된 DFB-LD의 세부 구조를 표 1에 보였다. 표 1에서 보인 각 활성층 구조의 DFB-LD에 대한 상세한 제작 과정 및 발진 특성 등은 이미 본 연구실에서 발표한 바 있다.^{[11] ~ [13]}

표 1. 실험에 사용된 DFB-LD의 세부 구조

Table 1. Detailed structures of DFB-LD used in experiments.

| 활성층 구조 항목 | Bulk | MQW | S-MQW |
|-----------------------------------|---|--|---|
| active width | 1.0 μm | 1.0 μm | 1.0 μm |
| upper waveguide (upper SCH) | 0.1 μm (Eg = 1.3 μm) | 0.1 μm (Eg = 1.3 μm) | 0.1 μm (Eg = 1.15 μm) |
| active | 0.1 μm (Eg = 1.55 μm) | well: 8 × 70Å (Eg = 1.65 μm) barrier: 7 × 100Å (Eg = 1.3 μm) | well: 8 × 40Å (In _{0.7} Ga _{0.3} As) barrier: 7 × 100Å (Eg = 1.15 μm) |
| lower waveguide (lower SCH) | 0.1 μm (Eg = 1.3 μm) | 0.1 μm (Eg = 1.3 μm) | 0.1 μm (Eg = 1.15 μm) |
| optical confinement factor | 0.15 | 0.106 (0.0133/well) | 0.0512 (0.0064/well) |
| cross-section structure | PBH | PBH | PBH |
| stop band | 18Å | 22Å | 21Å |
| cavity length(μm) | 300 | 300 | 300 |
| k-L | 1.8 | 2.2 | 2.1 |

활성층 구조를 제외한 LD 구조 변수를 일정하게 유

지하기 위해 본 실험에 사용된 DFB-LD 제작시 활성 층 주위의 광도파로층(SCH층 : separate confinement heterostructure)의 두께를 각각 $0.1\mu\text{m}$ 로 하였고, 활성층의 폭은 $1\mu\text{m}$ 로 유지하였다. 단일 종모드 발진을 위한 1차 회절격자를 아래쪽 광도파로층과 InP 기판 사이에 형성시켰다. 표 1의 광도파로층과 활성층은 doping 하지 않았고, S-MQW의 well은 In mole fraction을 0.7로 하여 약 1.2%의 압축응력이 걸리도록 하였다. 각 구조의 광가둠계수(optical confinement factor) Γ 는 수평방향의 활성층 폭이 $1\mu\text{m}$ 이므로 수평방향의 광가둠계수를 1로 두고 계산하였다. 공진기 길이 $300\mu\text{m}$ 로 제작된 각 구조의 DFB-LD가 $18\text{\AA} \sim 22\text{\AA}$ 의 금지대역폭(stopband)을 보임으로서 2 부근의 균일한 κL 값을 가짐을 확인하였다.

그림 1에 본 실험에서 사용한 α , 선폭 및 공진 주파수 측정 시스템을 보였으며, chirping은 제작된 각 활성층 구조의 DFB-LD를 단일모드 광섬유 부착 모듈로 제작한 후^[14] 2.5Gbps signal generator와 광 스펙트럼 분석기를 사용하여 측정하였다.

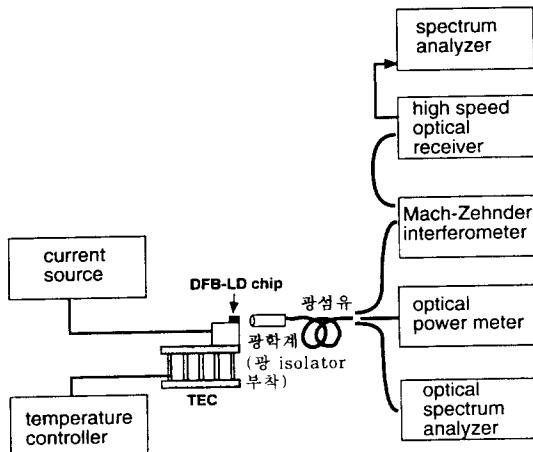


그림 1. 측정 시스템 구성도

Fig. 1. Block diagram of measurement system.

1. 선폭확대계수 α 측정

본 논문에서는 주입 전하량 변화에 따른 광 스펙트럼 분석기로 측정한 자연방출광 스펙트럼에서의 굴절률 변화량과 이득 변화량으로부터 직접적으로 α 를 계산하는 방법을 사용하였다. 즉 α 는 발진 임계전류 이하의 여러 주입 전류 레벨에서의 공진기 모드의 중심파장 이동과 이득 차이로부터 다음과 같이 주어진다.^[15]

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

$\delta\lambda$ 는 공진기 모드 간격이고, $d\lambda_i$ 는 i 번 째 모드의 주입 전류레벨 변화에 따른 중심파장의 이동폭이다. r_i 는 i 번째 모드의 최대와 최소 광출력의 비로서 ($d[\ln\{(\sqrt{r_i}-1)/(\sqrt{r_i}+1)\}]/(\text{공진기 길이})$)는 주입 전류 레벨 변화에 따른 i 번 째 모드의 모드 이득 차이를 의미한다. 측정은 LD의 온도를 $23^\circ\text{C} \pm 0.02^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지시키면서 편광자(polarizer)를 이용하여 TE 모드만 광 스펙트럼 분석기에 입사시켜 측정하였다. 또한 여러 주입 전류 레벨에서의 파장 이동과 모드 이득 차이를 linear fitting하여 α 를 계산하였으며, DFB-LD의 주 모드를 중심으로 여러 파장대에 대한 α 를 계산함으로써 α 의 파장(photon energy)에 대한 분산도 추출하였다. 그림 2에 측정된 결과를 보였다.

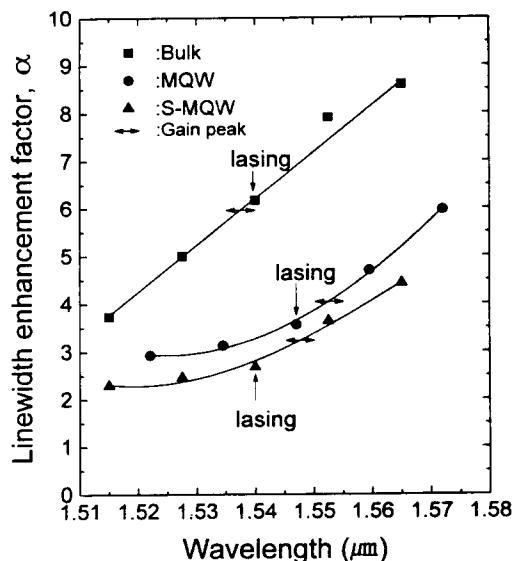


그림 2. 활성층 구조에 따른 α 의 분산특성

Fig. 2. Dispersion of α for various active layer structures.

그림 2에서 gain peak는 발진 임계전류 레벨에서의 이득곡선의 최대 이득파장을 의미하며 이것으로부터 발진파장의 detuning 정도를 알 수 있다. DFB 발진파장이 최대 이득에 비해 단파장일 때는 negative detuning이라 하며, 장파장일 경우에는 positive detuning이라 한다. 측정결과 최대 이득 파장에서의 α 는 각각 6(bulk), 4(MQW) 및 3.2(S-MQW)로 나

타났으며, 동일 활성층 구조에서도 negative detuning으로 현저한 α 의 개선이 가능함을 알 수 있다. 여기서 MQW와 S-MQW의 경우는 negative detuning의 효과가 detuning의 커질수록 작아지는 경향을 보이는데 이것은 다른 연구결과^[16]와 유사한 것으로 MQW와 S-MQW 활성층이 bulk형과 비교할 때 좁은 이득 대역폭을 가지기 때문으로 생각된다.

2. 선폭 및 chirping

각 활성층 구조에 따른 DFB-LD의 발진선폭을 광섬유로 제작된 Mach-Zehnder 간섭계와 광수신기, 전기 스펙트럼 분석기를 이용하여 delayed self-homodyne 방법^[17]으로 측정한 결과를 그림 3에 보았다. 측정에 사용된 Mach-Zehnder 간섭계는 한 쪽 arm의 0.76km 광섬유 delay line을 가지는 것으로 선폭 분해능은 1MHz 이하이며, 측정시 외부 광케이블에 의한 선폭 축소가 발생하지 않도록 DFB-LD와 측정 시스템 사이에 케이블 차단율이 60 dB 이상인 광isolator를 삽입하였다.

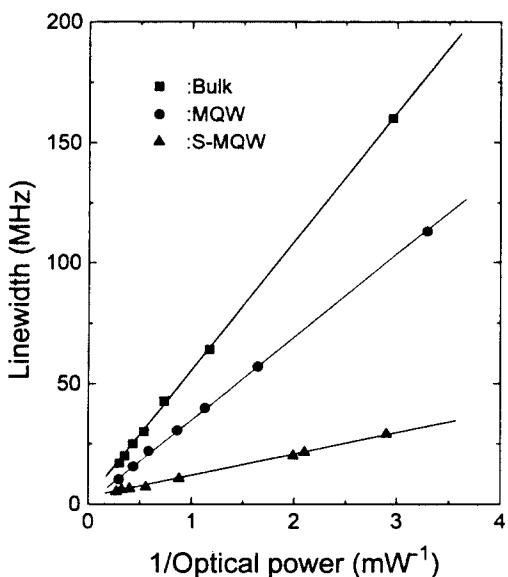


그림 3. 활성층 구조에 따른 발진 선폭 특성
Fig. 3. Dependence of linewidth on optical power for various active structures.

측정결과 (선폭) \times (광출력)/facet 값은 각각 $53.54 \text{ MHz} \cdot \text{mW}(\text{bulk})$, $34.04 \text{ MHz} \cdot \text{mW}(\text{MQW})$ 및 $8.98 \text{ MHz} \cdot \text{mW}(\text{S-MQW})$ 로서 bulk형 활성층을

기준으로 볼 때 선폭이 각각 $2/3$ (MQW), $1/6$ (S-MQW)로 감소하였다. 여기서 주어진 κL 조건에서 S-MQW 활성층을 가지는 DFB-LD는 매우 낮은 선폭을 보임으로서 코히런트 광통신용 광원으로도 활용성이 높음을 알 수 있다. 또한 발진선폭이 α 에 의해 영향을 받는 과정과 동일하게 외부로부터 케이블에 의해 발생하는 활성층의 굴절률 변화를 매개로 하여, 발진 모드의 진폭과 위상이 결합됨으로써 나타나는 외부 광케이블에 대한 영향의 측면에서 볼 때에도 S-MQW 활성층의 경우가 가장 안정됨을 알 수 있다.

DFB-LD가 광통신 시스템의 광원으로 사용되었을 때 고속 디지털 변조에 의해 발생하는 chirping은 시스템의 dispersion penalty를 결정하므로 매우 중요한 요소이며, 이 값은 $\sqrt{1 + \alpha^2}$ 에 비례하는 것으로 알려져 있다. DFB-LD의 광 스펙트럼의 최대치로부터 20dB 아래 부분에서의 스펙트럼 폭으로 정의되는 chirping은 NRZ(non return zero) 형태의 2.5Gbps 신호로 변조하면서 측정하였다. 이 때 변조 전류는 30mA_{p-p}이고 pre-bias는 1.0 I_{th}에서 2.0 I_{th}까지 변화시키면서 측정하였다. 그림 4에 이와 같이 측정된 결과를 보였다.

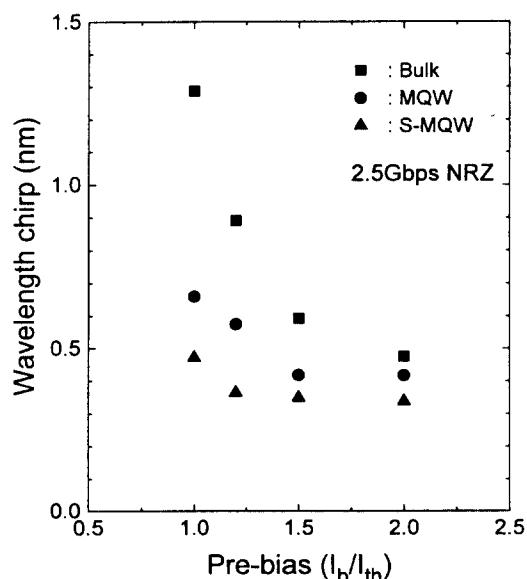


그림 4. pre-bias에 따른 chirping 특성(변조 전류: 30mA_{p-p})
Fig. 4. Chirping with pre-bias level (modulation current: 30mA_{p-p}).

$1.0I_{th}$ 의 pre-bias 조건에서 chirping은 각각 1.29

nm (bulk), 0.67nm (MQW) 및 0.48nm (S-MQW)로 나타났으며, bulk형을 기준으로 할 때 MQW는 1/2, S-MQW는 1/3의 chirping 감소가 얻어졌다. 그림 4로부터 chirping^o 현저하게 증가되는 pre-bias 레벨은 2.0I_{th}(bulk), 1.5I_{th}(MQW) 및 1.2I_{th}(S-MQW)로 평가됨으로서 α 가 작아질수록 큰 폭의 활성층 전하밀도 변화에도 chirping^o 억제됨을 알 수 있다.

3. 공진 주파수 측정 및 미분이득 추출

LD를 연속 발진시키면서 주파수에 따른 광전력 분포를 보면 LD 자체의 공진주파수대에서 큰 강도 잡음이 발생하여, 특히 외부로부터 광궤환이 있을 때 잡음은 더욱 크게 나타난다. 이것을 이용하여 고속 광수신기와 전기 스펙트럼 분석기로 실험대상 DFB-LD의 광출력의 제곱근에 따른 공진 주파수를 측정한 것이 그림 5에 나타나 있다.

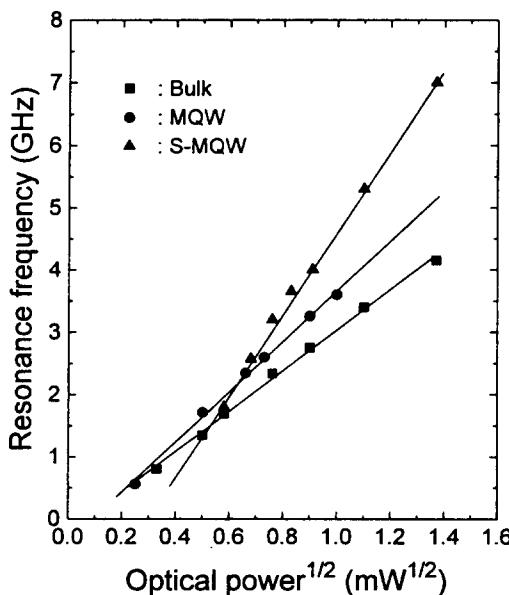


그림 5. 광출력의 제곱근에 따른 DFB-LD의 공진 주파수

Fig. 5. Resonance frequency of DFB-LD with square root of optical power.

그림으로부터 (공진주파수)/(광출력의 제곱근)에 해당하는 기울기는 각각 3.58GHz/(mW)^{1/2} (bulk), 4.04GHz/(mW)^{1/2} (MQW) 및 6.43GHz/(mW)^{1/2} (S-MQW)으로 주어졌으며, 이 값으로부터 다음 식을 이용하여 미분이득 값을 구할 수 있다.^[18]

$$\frac{\partial g}{\partial n} = (2\pi A)^2 \hbar \omega S_{eff} \tau_p \quad (2)$$

식 (2)에서 A 는 그림 5에서 구한 기울기이며, S_{eff} 는 LD의 유효 광도파로 단면적으로서 (활성층단면적)/ Γ 로 주어지며 τ_p 는 광자 수명으로 ($1/v_g(\alpha_{int} + \alpha_m)$, v_g : 군속도, α_{int} : 내부손실, α_m : 거울면 손실)로 주어진다. 여기서 τ_p 는 활성층 구조에 따라 다음과 같이 주어진다. 먼저 α_m 은 표 1에서 보인 κL 값에 의해 각각 74cm⁻¹(bulk), 54cm⁻¹(MQW) 및 62cm⁻¹(S-MQW)로 계산되어 지고^[19]. α_{int} 는 동일한 활성층 구조의 Fabry-Perot LD에 대한 공진기 길이에 따른 외부 양자 효율 측정 실험으로부터 25cm⁻¹(bulk), 12cm⁻¹(MQW) 및 8cm⁻¹(S-MQW)로 주어졌다. 여기에 Fabry-Perot 모드 간격으로부터 구할 수 있는 군속도 8.045×10⁹cm/sec(bulk), 7.716×10⁹cm/sec(MQW) 및 7.864×10⁹cm/sec(S-MQW)를 대입하면 τ_p 는 각각 1.25ps(bulk), 1.96ps(MQW) 및 1.82ps(S-MQW)로 주어졌다. 따라서 식 (2)에 의한 미분이득은 5.4×10⁻¹⁶cm²(bulk), 8.6×10⁻¹⁶ 및 2.4×10⁻¹⁵cm²(S-MQW)로서 MQW 활성층은 bulk 활성층에 비해 1.6배, S-MQW 활성층은 MQW 활성층에 비해 2.8배의 미분이득 증가를 보였다. 실험결과 MQW 활성층을 격자정합 조건으로부터 압축응력이 걸리는 조건으로 변화시킬 때 얻어지는 큰 미분이득 증가 (약 3배) 및 선폭확대계수의 감소 (약 3/4배)는 다른 실험결과와도 일치하고 있다.^[19]

4. MD S-MQW 활성층의 특성평가

표 1에 보인 S-MQW 활성층 구조에서 barrier 층과 양쪽 광도파로층을 1.2×10¹⁸/cm³으로 p-doping 한 MD S-MQW 활성층의 α , 선폭 및 공진 주파수 특성을 측정해봄으로서 MD S-MQW-DFB-LD의 고속 광통신용 저 chirping 광원으로서의 활용성을 평가하였다. 그림 6에 파장에 따른 MD S-MQW-DFB-LD의 α 값을 보였다.

측정결과 발진파장(1555nm)에서의 α 는 3.4로 주어졌다. 여기서 발진 임계전류 값에서 측정한 최대 이득파장은 1517nm 부근으로 나타났다. 실험에 사용된 MD S-MQW LD는 약 38nm의 positive detuning 된 상태로 발진함으로서 높은 α 값을 가지는 것으로 분석되며, 활성층의 이득 대역을 발진 파장에 일치시키거나 negative detuning^o 되도록 조정할 경우를 가

정하면, 그림 2 및 그림 6에서 보인 α 의 분산특성으로부터 2 또는 그 이하의 α 값이 가능함을 추측할 수 있다.

MD S-MQW에 대한 발진 선폭과 공진 주파수 특성을 측정한 결과 각각 $90\text{MHz} \cdot \text{mW}$ 와 $2.3\text{GHz}/(\text{mW})^{1/2}$ 를 얻었다. 이 값들은 bulk형 보다 오히려 더 나쁜 선폭 및 공진 주파수 특성을 의미하는데 이것은 매우 큰 positive detuning의 영향뿐만 아니라 높은 p-doping에 사용된 Zn가 인접된 well에 확산됨으로서 활성층의 내부손실을 증가시켰기 때문으로 생각된다. 즉 Zn에 의한 hole free carrier 흡수 때문에 증가된 활성층의 내부손실이 선폭을 결정하는 총 손실을 증가시키고, 식 (2)의 광자수명을 감소시킴으로서 넓은 선폭과 낮은 공진 주파수를 유발시킨 것으로 추정해 볼 수 있다. P-doping 된 활성층 내부 손실은 doping되지 않은 S-MQW 활성층과의 내부손실 비교 실험에서 4배 이상의 손실을 갖는 것으로 확인되었다.

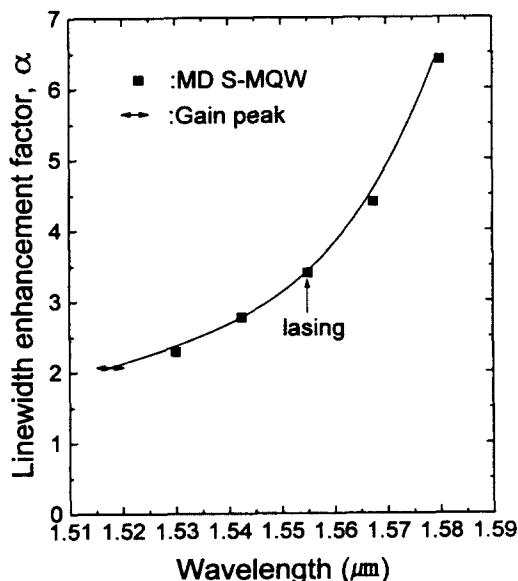


그림 6. MD S-MQW 구조의 α 분산 특성
Fig. 6. Dispersion of α of MD S-MQW active layer structure.

III. 결 론

1.5 μm 파장대의 고속 광통신용 광원인 DFB-LD의 활성층으로 사용되고 있는 bulk, MQW 및 S-MQW 구조의 α , 선폭, chirping 및 미분이득을 측정 비교

하였다. 측정결과는 표 2에 요약하였다.

실험결과 DFB-LD의 활성층이 bulk형으로부터 MQW형, S-MQW형으로 갈수록 현저한 성능 개선이 이루어지고 있음을 알 수 있으며, 선폭확대계수 α 와 그에 따른 chirping 특성은 광통신 시스템의 광원으로서의 가장 중요한 요구 규격이며 특기할 만한 개선이라고 볼 수 있다. 또한 α , 선폭, chirping 및 공진 주파수에 대한 전반적인 성능 개선은 미분이득의 개선에 의한 것으로 실험 결과 S-MQW 활성층은 MQW 활성층 보다 2.8배의 미분이득을 가졌으며, MQW 활성층과 bulk 활성층과의 비교에서는 MQW 활성층이 1.6배의 미분이득을 가졌다.

본 실험과 병행하여 측정된 MD S-MQW 활성층에 대한 평가에서는 발진 파장을 적절히 negative detuning 시킬 경우 2 이하의 α 값을 얻을 수 있음을 보였으며, 이 경우 활성층의 내부손실 증가를 억제하기 위한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

표 2. 측정 결과 요약
Table 2. Summary of measurements.

| 항 목 | bulk | MQW | S-MQW |
|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| α (최대이득파장) | 6 | 4 | 3.2 |
| α (발진파장) | 6.2 | 3.6 | 2.7 |
| 선폭(MHZ · mW)/facet | 53.54 | 35.64 | 8.98 |
| chirping at $I_b=I_{th}(\text{nm})$ | 1.29 | 0.67 | 0.48 |
| 공진 주파수(GHz/ $(\text{mW})^{1/2}$) | 3.58 | 4.04 | 6.43 |
| 미분이득(cm^2) | 5.4×10^{-16} | 8.6×10^{-16} | 2.4×10^{-15} |

감사의 글

* 본 논문은 한국 통신의 출연금에 의하여 수행한 연구 결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] T. L. Koch and H. E. Bowers, "Nature of wavelength chirping in directly modulated semiconductor laser", Electron. Lett., vol.20, no. 25/26, pp. 1038-1040, 1984.
- [2] B. R. Clarke, "Effect of reflections on the system performance of intensity

- modulated laser diodes". *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol.9, no.6, pp. 741-749, 1991.
- [3] M. Osinski and J. Buus, "Linewidth broadening factor in semiconductor laser-An overview", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol.QE-23, no.1, pp.9-29, 1987.
- [4] J. E. Bowers, "High speed semiconductor laser design and performance", *Solid-State Electron.*, vol.30, no.1, pp.1-11, 1987.
- [5] 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.
- [6] C. A. Green, N. K. Dutta and W. Watson, "Linewidth enhancement factor in InGaAsP/InP multiple quantum well lasers", *Appl. Phys. Lett.*, vol.50, no.20., pp.1409-1410, 1987.
- [7] E. Yablonovitch and E. O. Kane, "Band structure engineering of semiconductor lasers for optical communications", *J. Lightwave Technol.*, vol.6, no.8, pp.1292-1299, 1988.
- [8] S. W. Corzine and L. A. Coldren, "Theoretical gain in compressive and tensile strained InGaAs/InGaAsP quantum wells", *Appl. Phys. Lett.*, vol.59, no.5, pp.588-590, 1991.
- [9] K. Kikuchi, M. Kakui, C. E. Zah and T. P. Lee, "Differential gain and linewidth enhancement factor of $1.5\mu\text{m}$ multiple quantum well active layers with and without biaxially compressive strain", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.3, no.4., pp.314-127, 1991.
- [10] K. Uomi, "Modulation doped multi quantum well(MD-MQW) lasers", *Japanese J. Appl. Phys.*, vol.29, no.1, 81-94, 1990.
- [11] 이중기, 장동훈, 조호성, 이승원, 박경현, 김정수, 김홍만, 박형무, 홍창희, "2.5Gbps 광통신용 1.55 μm InGaAsP/InP PBH-DFB-LD 제작 및 특성", 전자공학회논문지, 제 31 권, A 편, 9 호, pp. 139~145, 1994
- [12] 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.
- [13] 이중기, 장동훈, 조호성, 박경현, 김정수, 김홍만, 박형무, "압축응력 다중 양자우물 구조 InGaAs/InGaAsP PBH-DFB-LD의 제작과 특성 평가", 전자공학회논문지 투고 중.
- [14] 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, "Fabrication and transmission experiments of distributed feedback laser modules for 2.5Gbps optical transmission systems", *Optical and Quantum Electronics*, to be published.
- [15] I. D. Henning and J.V. Collins, "Measurement of the semiconductor laser linewidth broadening factor", *Electron. Lett.*, vol. 19, no.22, pp. 927-929, 1983.
- [16] N. K. Dutta, H. Temkin, T. Tanbun-Ek and R. Logan, "Linewidth enhancement fator for InGaAs/InP strained quantum well lasers", *Appl. Phys. Lett.*, vol.57, no.14, pp. 1390-1391, 1990.
- [17] M. Nazarathy, W. V. Sorin, D. M. Baney, and S. A. Newton, "Spectral analysis of optical mixing measurements", *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol.7, no.7, pp.1083-1096, 1989.
- [18] I. Suemune, "Theoretical study of differential gain in strained quantum well structures", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 27, no.5, pp. 1149-1159, 1991.
- [19] J. Wang, N. Schunk, and K. Petermann, "Linewidth enhancement for DFB lasers due to longitudinal field dependence in the laser cavity", *Electron. Lett.*, vol.23, no.14, pp.715-717, 1987.

저자소개

朴 景 鉉(正會員) 第 32 券 A編 第 6 號 參照

현재 한국전자통신연구소 화합물소자
연구실 선임연구원

曹 豪 成(正會員) 第 32 券 A編 第 6 號 參照

현재 한국전자통신연구소 화합물소자
연구실

張 東 薫(正會員) 第 32 券 A編 第 6 號 參照

현재 한국전자통신연구소 화합물소자
연구실 선임연구원

李 重 基(正會員) 第 32 券 A編 第 6 號 參照

현재 한국전자통신연구소 화합물소자
연구실 선임연구원

金 定 珠(正會員) 第 32 券 A編 第 6 號 參照

현재 한국전자통신연구소 광전자
연구실 선임연구원

李 承 遠(正會員) 第 32 券 A編 第 6 號 參照

현재 한국전자통신연구소 광전자 연구
실 선임연구원

金 弘 晚(正會員) 第 32 券 A編 第 6 號 參照

현재 한국전자통신연구소 광전자
연구실 실장

朴 亨 茂(正會員) 第 32 券 A編 第 6 號 參照

현재 한국전자통신연구소 반도체 연구
단장