

광통신용 1.55 μm PBH-DFB-LD 스펙트럼 특성*

장동훈 · 이중기 · 이승원 · 박경현 · 김정수 · 김홍만 · 황인덕 · 박형무

한국전자통신연구소 화합물반도체 연구부

조호성 · 홍창희

한국해양대학교 전자통신공학과

(1994년 2월 2일 받음)

LPE와 간섭노광법을 이용하여 1.55 μm 파장의 InGaAsP/InP PBH-DFB-LD를 제작하고 스펙트럼 특성을 평가하였다. 제작된 PBH-DFB-LD의 발진 임계전류는 15 mA 이하이며, 1.55 μm 파장에서 광출력 7 mW 이상까지도 단일 종모우드로 동작하였으며 측모우드 억제율 35dB 이상을 얻었다. 본 연구에서 제작된 PBH-DFB-LD 발진파장의 온도 의존 특성은 $0.9\text{\AA}/^\circ\text{C}$ 이며, 금지대역폭 측정에 의한 회절격자의 결합계수(κ)는 97 cm^{-1} 로 평가되었다.

I. 서 론

통신용 반도체레이저는 광섬유의 영분산 영역인 1.3 μm 와 최저 손실파장인 1.55 μm 이 연구 개발되어 왔으나, [1] 최근 들어 광통신의 고속화 및 장거리화에 따라 1.55 μm 파장의 동적단일모우드의 반도체레이저가 집중적으로 연구되고 있다. 광통신의 장거리, 대용량화가 진행됨에 따라 전송속도 증가에 따라 전송속도를 제한하는 중요한 요인으로서 광섬유를 통하여 전송된 광신호의 왜곡이 부각되었다.[2] 이것은 지금까지 광통신용 광원으로 사용되고 있는 Fabry-Perot형 반도체 레이저로부터 방출된 펄스형 광신호가 단일모우드 광섬유를 통과할 때 다중 종모우드 동작에 의한 색분산을 일으키기 때문이다. [3] 따라서 Gbps 이상의 대용량 광통신 시스템은 고속 변조에도 단일 종모우드 동작을 유지할 수 있을 뿐만 아니라 고속변조시 좁은 발진 선폭을 유지하는 광원이 필요하게 되었다.[4,5] 이러한 대용량, 장거리 광통신용 광원의 요구조건을 만족하는 반도체 레이저로는 외부 회절격자 광 캐비티형 LD, coupled cavity LD, injection locking형 LD 및 브래그 반사형 LD 등이 발표되었으나, 파장선택성을 갖는 회절격자를 활성영역 내에 내장함으로써 주기적인 광캐비티로 동적 단일모우드 동작을 하는

DFB (Distributed Feedback)의 LD와 회절격자를 활성영역 외부에 제작 함으로서 파장선택성을 주는 DBR(Distributed Bragg Reflector) LD가 실용적인 측면에서 각광을 받고 있다. 최근 들어 실용화되고 있는 2.5 Gbps 광통신 시스템에 있어서는 광섬유에 의한 손실과 분산을 줄이기 위하여 단일모우드의 1.55 μm 파장의 단일모우드 반도체레이저인 DFB-LD가 사용 되고 있으며, 광원의 특성 향상에 따라 고속화 및 장거리화가 이루어지고 있다.

본 논문에서는 현재 광통신에서 개발되고 있는 2.5 Gbps 광통신용 광원으로 사용될 동적단일모우드 반도체레이저의 제작과 스펙트럼 특성을 논의 하고자 한다. 먼저 DFB-LD의 제작에 있어서 핵심이 되는 회절격자 제작은 간섭노광법과 습식식각법을 사용하였으며, LD의 단면구조는 임계전류가 낮고 초고속 동작이 가능한 강한 굴절률도파형(strong index guide)인 PBH(Planar Buried Heterostructure) 구조로 하였다. PBH 구조의 제작을 위하여서는 LPE(Liquid Phase Epitaxy)를 이용한 3회의 결정성장 공정을 거쳤으며, 고속동작을 위한 Channel 식각과 전극 패드 공정을 통하여 고속동작 단일모우드 반도체레이저인 PBH-DFB-LD를 제작하였으며, 제작된 반도체레이저의 단일모우드 동작특성과 스펙트럼 특성으로부터 발진파장의 온도특성, 회절격자의 결합계수(coupling coefficient κ)와 측모우드억제율을 측정하였다.

* 본 논문은 한국통신의 출연금에 의하여 수행한 연구 결과임.

II. 회절격자 제작

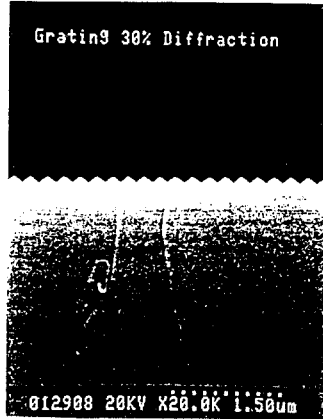
본 연구에서 제작하고자 하는 동적 단일모우드 반도체 레이저 제작을 위하여서는 회절격자의 제작이 필요하다. 1.55 μm 파장의 DFB-LD의 수직구조는 1.55 μm 파장의 InGaAsP 활성층을 중심으로 1.3 μm 파장의 InGaAsP 광도파로층이 대칭적으로 배치되어 있고, InP 클래드층 및 InGaAs 캡층으로 된 이중 이종접합(double heterostructure) 구조이다. 활성층의 두께는 0.1 μm이며 광도파로층의 두께도 각각 0.1 μm이며 주기적인 광캐환을 위한 회절격자는 InP 기판 위에 형성시켰다. 수평구조는 1.5 μm 폭의 Stripe를 만든 후 재성장애 의하여 p-InP, n-InP, p-InP Blocking layer 및 3차 LPE 결정성장으로 p-InP, p-InGaAs clad 및 cap 층이 성장된 구조이다. DFB-LD의 단일 모우드 동작 파장은 회절격자의 주기와 LD 칩의 단면 구조 및 각 층의 조성비(밴드갭)에 의해 주어지는 유효굴절율(effective refractive index)에 의하여 아래 식 (1)에 따라 결정된다.

$$\lambda = 2n_{eff} \Lambda \tag{1}$$

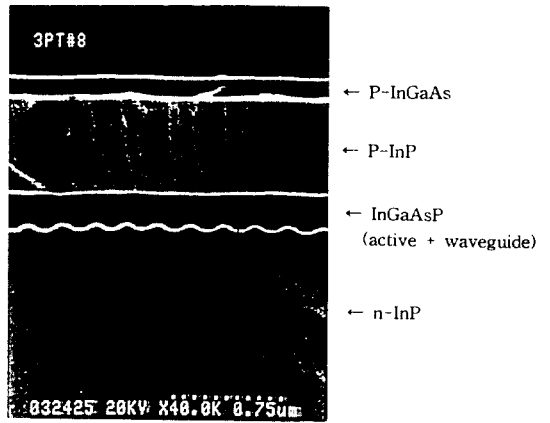
n_{eff} : 유효굴절율
 Λ : 회절격자주기

본 실험의 경우 LPE로 성장된 LD 공진기의 기본도파모우드에 대한 유효굴절율(n_{eff})이 1.55 μm 파장에서 3.256이므로, 발진파장 1.55 μm를 얻기 위한 1차 회절격자 주기는 238 nm임을 알 수가 있다. 그러나 실제 소자 제작에 있어서는 활성층 및 광도파로층의 조성비와 두께에 따라 유효굴절율이 변화되므로 식 (1)에 따라 발진파장이 변화되게 된다.

본 연구에서는 325 nm 파장의 TEM₀₀ 모우드의 He-Cd 레이저를 이용한 간섭 노광법을 사용하였다. 회절격자 제작을 위해 먼저 n-InP 기판 위에 AZ5206E PR과 AZ1500 thinner를 1:4의 비율로 희석한 PR을 spin coater를 이용하여 50 nm 두께로 형성시킨 후 75°C hot plate 위에서 1분간 soft bake 하였다. 노광은 He-Cd 레이저로부터 나온 빔을 두 beam으로 분리한 후 기판 상에서 다시 합칠 때 생기는 간섭무늬를 이용하는 간섭노광법을 사용하였다. 이 때 회절격자의 주기는 두 빔의 입사각을 조정하여 조절하였다. 본 실험의 경우 회절격자주기 238 nm를 얻기 위하여 325 nm의 He-Cd laser의 경우 입사각을 약 43°로 조절하였으며, 회절격자의 방향은 (011) 방향으로 하여 총 광 조사에너지는 20 mJ/cm²이 되도록 노광 시간을 조절하였다. AZ500 MIF를 이용하여 PR을 현상한 후 산소 plasma ashing



(a)



(b)

그림 1. 회절격자 단면사진.
 (a) 간섭노광법과 습식식각법으로 제작된 회절격자 단면사진
 (b) 결정성장 후의 회절격자 단면사진

공정을 이용하여 현상된 PR 회절격자의 골부분에 완전히 제거되지 않고 남아있는 잔류 PR을 제거함으로써 골과 마루사이의 경계면을 깨끗이 하였으며 반사율을 측정하여 PR 패턴을 추정하였다. 이와 같이 형성된 PR 회절격자를 이용하여 InP 또는 InGaAsP에 등방성 식각 특성을 가지고 있는 1HBr : 1HNO₃ : 20H₂O 용액을 이용하여 회절격자를 InP 기판 상에 제작하였다. 이와 같이 제작된 회절격자의 단면을 그림 1-a에 나타내었다. 그림 1-a에서 제작된 회절격자는 사용한 식각용액의 특성에 따라 삼각형 형태의 단면 구조를 갖고 있으며 식각 깊이는 식각시간에 따라 결정된다. 제작된 회절격자 위에 1.3 μm 파장의 InGaAsP 도파로층, 1.55 μm 파장의

InGaAsP 활성층, 활성층 위의 1.3 μm 파장의 InGaAsP 도파로층, InP 클래드층을 LPE 방법으로 성장하였으며 이때 활성층의 성장온도는 590°C로 하였다. 활성층과 도파로층의 두께는 각각 0.1 μm로 조정하였고, 1.3 μm n-InGaAsP 도파로층의 도핑은 Te을 이용하여 1~2×10¹⁸ cm⁻³이 되도록 조절하였으며, 1.55 μm InGaAsP 활성층과 1.3 μm 광도파층은 도핑을 하지 않았다. p-InP 클래드층은 5~6×10¹⁷ cm⁻³로 Zn를 사용하여 도핑하였다. LPE결정성장 후의 단면을(그림 1-b)에 나타내었다. 그림으로부터 회절격자는 균일하게 형성되어 있으며, 590°C에서의 LPE 결정성장 온도에서도 회절격자가 크게 변형되지 않았음을 알 수 있다.

1.55 μm 파장의 DFB-LD 회절격자는 광도파층의 조성과 두께에 의하여 결합계수(coupling coefficient κ)가 결정된다. 회절격자에 의한 광궤환효율을 나타내는 결합계수는 광파장도의 제곱에 비례하고, 회절격자 양면의 굴절율 제곱의 차에 비례하므로, 회절격자가 활성층에 가까울수록, 굴절율 차가 클수록 결합계수는 커지게 된다.^[6,7] 본 연구에서 제작한 1.55 μm의 PBH-DFB-LD에 있어서는 회절격자가 기판인 InP와 1.3 μm 파장의 InGaAsP이므로 1.55 μm 파장에서의 굴절율이 각각 3.195, 3.399이므로 광도파층을 1.1 μm 파장의 InGaAsP를 사용한 것에 비하여 광궤환 효율이 크므로 실제 소자 제작에 있어서는 회절격자의 식각 깊이를 조절하거나 광도파층의 두께 또는 조성을 1.1 μm 파장의 InGaAsP를 사용하여 결합 효율의 조절이 가능하나 본 연구에서는 식각깊이를 조절하여 소자의 결합계수를 조절하였다.

또한 단일모우드 동작에 있어서는 회절격자에 의한 벽면에서의 phase와 반사율에 따라서도 DFB-LD의 발진모우드 특성이 변화되게 된다. λ/4 phase shift가 들어 있지 않은 일반적인 DFB-LD에 있어서는 금지대 주위의 +1차와 -1차가 동일한 특성을 갖도록 되어 있으나 실제 일반 DFB-LD에 있어서도 벽면의 phase 등에 의한 비대칭성에 의하여 한쪽모우드가 주모우드로 발진하여 단일모우드로 동작하게 되는 경우가 많다.^[8] 또한 Fabry-Perot모우드 발진을 억제하고 한쪽 단면에서의 광출력 증가와 단일모우드 선택성을 증가시키기 위하여 본 연구에서는 SiO₂를 이용하여 한쪽 단면에 무반사막을 증착시켰다.

III. 특성측정 및 평가

본 연구에서 제작된 PBH-DFB-LD의 발진파장은 2.5 Gbps 동작을 위한 1.53 μm에서 1.55 μm의 파장 범위

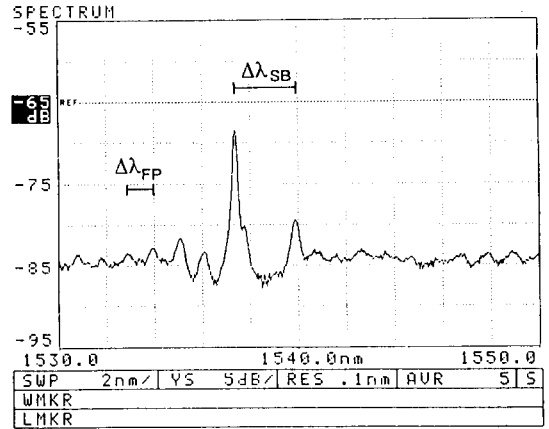


그림 2. PBH-DFB-LD의 금지대역폭 스펙트럼(I=0.8 I_{th}).

내에서 단일모우드로 동작하였으며 strong index guide구조의 특징인 임계전류 15 mA 이하 (최저 5 mA)의 작은 값을 갖고 있으며 무반사막 단면에서의 slope efficiency도 0.08 mW/mA에서 0.27 mW/mA의 높은 효율 특성을 보였다. 이와 같은 낮은 임계전류와 높은 광효율은 회절격자에 의한 DFB 모우드의 파장과 활성층의 이득분포가 일치되었으며 blocking layer에 의한 효율적인 전류 및 광가둠이 되었음을 나타낸다.

고속변조용 PBH-DFB-LD 칩의 발진스펙트럼을 광스펙트럼 분석기(ANDO AQ6310B)를 이용하여 측정하였다. 측정시스템은 광섬유를 LD칩의 출력면에 정렬시키고 출력측 광섬유를 광스펙트럼 분석기에 접속하는 형태로 구성되어 측정하였다. 한쪽 단면만 무반사막 형성된 DFB-LD는 칩 상태(mirror 면에서의 내장 회절격자의 위상값)에 따라 DFB모우드의 임계이득(threshold gain)값이 달라지므로^[9] 이에 따라 단일모우드 또는 다모우드로 동작하게 된다. 회절격자에 의한 공진기내부를 진행하는 광파에 대한 역방향 계환 효율 값을 나타내는 결합계수(κ)은 임계전류 이하에서의 광출력 스펙트럼으로부터 근사계산 할 수가 있다.^[9,10] 그림 2의 0.8 I_{th}에서의 스펙트럼으로부터 DFB모우드의 +1차와 -1차에 의한 stop band (Δλ_{SB})는 2.4 nm이며 Fabry-Perot 모우드 간격(Δλ_{FP})은 1.04 nm이므로 아래 식 (2)에 따라

$$\kappa L = y - \frac{\pi^2}{4y}$$

$$y = \frac{\pi}{2} \frac{\Delta\lambda_{SB}}{\Delta\lambda_{FP}} \tag{2}$$

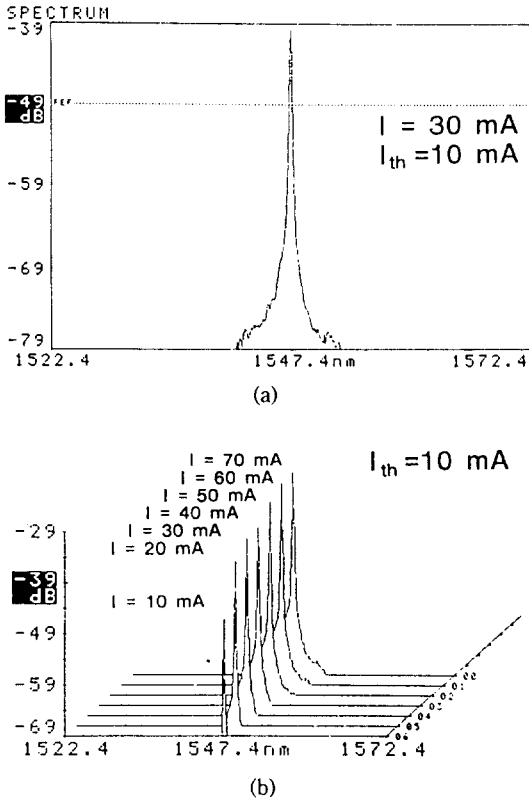


그림 3. PBH-DFB-LD의 스펙트럼.
 (a) PBH-DFB-LD의 단일모우드 동작 스펙트럼
 (b) 주입전류에 따른 스펙트럼 특성

DFB-LD의 발진모우드에 중요한 변수인 κL 은 근사 값으로 2.9의 값을 얻었다. 본 연구에서 제작한 PBH-DFB-LD의 cavity 길이가 $300 \mu\text{m}$ 이므로 결합계수 κ 는 97 cm^{-1} 로 매우 높은 값을 갖고 있다. 이와 같이 높은 κ 값을 갖는 것은 회절격자 제작시에 식각시간을 조절하여 식각 깊이를 조절하였으나 회절격자위에 LPE 결정성장시 회절격자의 변형이 작게 일어나기 때문으로 생각된다. 따라서 광도파로층을 $1.1 \mu\text{m}$ 파장의 InGaAsP로 함으로서 InP와의 굴절률 차를 줄이거나, 광도파로층의 두께를 두껍게 하여 줄이어서 낮출 수가 있을 것으로 생각된다. 일반적으로 κL 값은 1에서 2 정도의 값일 때 모우드선택성이 가장 좋은 것으로 알려져 있으며^[10] κL 값의 증가에 따라 측모우드와의 임계이득 차이가 작아져서 측모우드의 억제율이 낮아지므로 다모우드 발진 확률이 증가하고 반사율의 증가에 따라 hole-burning이 심하여 지며 광변환효율이 낮아지는 것으로 알려져 있다.

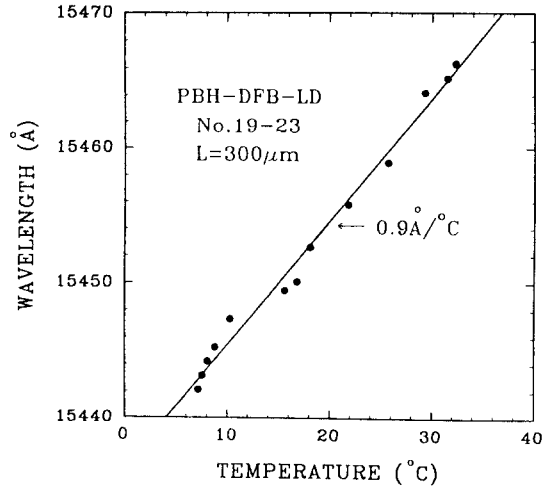


그림 4. PBH-DFB-LD 발진파장의 온도의존 특성.

그림 3-a에는 임계전류 10 mA PBH-DFB-LD의 구동전류 30 mA에서의 단일 DFB 모우드 동작 스펙트럼을 보였다. 본 연구에서 제작한 PBH-DFB-LD는 임계전류에서도 측모우드억제율 30 dB 이상을 보였으며 그림 3-a로부터 구동전류 $3 I_{th}$ 에서 발진파장은 $1.5474 \mu\text{m}$ 이며 측모우드 억제율(SMSR; side-mode suppression ratio)은 35 dB 이상임을 알 수 있다. 주입전류 변화에 따른 발진 스펙트럼 측정결과를 그림 3-b에 나타내었다. 그림 3-b에서는 구동전류 $7 I_{th}$ 이상(광출력 7 mW 이상)까지도 mode hopping 없이 단일 DFB 모우드로 동작함을 확인할 수 있었다. 이와 같이 단일모우드로 동작하는 칩들은 임계전류 이하에서도 임계이득차가 커서 임계전류 이하의 스펙트럼에서 stop-band의 구별이 어렵게 되며 단일모우드로 동작하게 된다. 그림 4에는 동작온도에 따른 DFB모우드의 발진파장 변화를 나타내었다. 그림 4에서 동작온도 증가에 따라 발진파장이 장파장 쪽으로 이동(red shift)됨을 알 수 있으며, 온도에 따른 파장변화율은 약 $0.9 \mu\text{m}/\text{C}$ 이다. 일반적으로 DFB-LD는 온도상승에 따라 굴절률이 변화하게 되어 발진파장이 변화하게 되며 온도에 따른 발진파장의 변화율은 반도체 레이저의 최대이득파장 변화에 따르는 Fabry-Perot LD에 비하여 약 1/5 정도의 값을 가지는 것으로 알려져 있다.^[11] 이와 같은 발진파장의 온도의존특성에 따라 Fabry-Perot LD에 비하여 DFB-LD가 파장 안정성이 우수하므로 파장 안정도가 필요한 시스템에도 사용이 가능하다. 그러나 활성층의 온도가 상승하게 되면 활성층 내에서의 비발광결합효율이 증가하게 되고, 활성층의 최대이득 파장이 유효굴절률에 의하여 식 (1)에 따라 결

정되는 DFB 발진과장에 비하여 장과장 쪽으로 이동하게 되어 발진 DFB모우드의 이득을 낮추게 되어 DFB-LD의 특성을 열화 시키게 된다.

IV. 결 론

저임계전류, 높은 slope efficiency 특성을 갖는 PBH-DFB-LD를 간섭노광법과 3회의 LPE 결정성장으로 제작하고 전기적, 광학적 특성을 측정하였다. DFB-LD제작에 있어서 파장이 325 nm인 He-Cd 레이저 광을 이용한 간섭무늬 노광법으로 InP기판 상에 주기 238 nm의 1차 회절격자를 형성시켰으며, 결정성장은 LPE로 수행하였다.

제작된 PBH-DFB-LD 칩의 발진임계전류는 15 mA 이하였으며 (최저 5 mA) 스펙트럼 측정결과 발진과장은 1530~1550 nm이고 $7 I_{th}$ 이상의 주입전류, 광출력 7 mW 이상까지도 단일 종모우드 동작을 유지하였으며, 이 때의 측모우드 억제율은 35 dB 이상이었다. 이와 같이 본 연구에서 제작된 PBH-DFB-LD 칩의 특성은 2.5 Gbps 광통신 시스템에 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구에서 제작된 PBH-DFB-LD의 금지대역폭은 2.4 nm로 측정되었으며 칩의 공진기 길이가 300 μm 이므로 이 값으로부터 회절격자에 의한 결합계수(κ)는 97 cm^{-1} 로 평가되었다. κL 값은 약 2.9로 평가되어 높은 κL 에 의하여 낮은 발진임계전류 값을 얻었으나 단일모우드의 선택성은 낮으므로 회절격자 진폭을 작게 하거나 회절격자와 활성층 사이의 도파로층 두께를 두껍게 또는

광도파로층의 조성을 1.1 μm 파장으로 바꿈으로서 κ 값을 감소시킬 경우 동일한 공진기 길이에 대해 파장선택성을 향상시키고 광효율을 증가 시킬 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

[1] G. P. Agrawal and N. K. Dutta, *Long-Wavelength Semiconductor Lasers* (VNR, New York, 1986).
 [2] T. Kimura, IEEE J. of Lightwave Technol., **LT-6**, 611(1988).
 [3] G. P. Agrawal et al., IEEE J. of Lightwave Technol., **LT-6**, 620(1988).
 [4] N. Henmi et al., IEEE J. of Lightwave Technol., **LT-6**, 636(1988).
 [5] J. C. Cartledge and G. S. Burley., IEEE J. of Lightwave Technol., **LT-7**, 668(1989).
 [6] H. Kogelnik and C. V. Shank, Appl. Phys. Lett., **18**, 152(1971).
 [7] W. Streifer, D. R. Scifres, R. D. Burnham, IEEE J. of Quantum Electron., **QE-11**, 867(1975).
 [8] P. P. G. Mols et al., IEEE J. of Quantum Electron., **QE-25**, 1303(1989).
 [9] L. D. Westbrook, I. D. Henning, A. W. Nelson and P. J. Fiddymnt, IEEE J. of Quantum Electron., **QE-21**, 512(1985).
 [10] L. J. P. Ketelsen, I. Hoshino, and Ackerman, IEEE J. of Quantum Electron., **QE-27**, 965(1991).
 [11] Y. Suematsu, S. Arai, and K. Kishino, IEEE J. Lightwave Technol., **LT-1**, 161(1983).

Spectrum Characteristics of 1.55 μm PBH-DFB-LD

D. H. Jang, J. K. Lee, S. W. Lee, K. H. Park, J. S. Kim, H. M. Kim,
 I. D. Hwang and H. M. Park

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

H. S. Cho and T. Hong

Department of Electronics and Communication, Korea Maritime Univ., Pusan 606-791, Korea

(Received: February 2, 1994)

PBH-DFB-LD emitting at 1.55 μm wavelength has been fabricated for 2.5 Gbps optical fiber communications. For fabrication of PBH-DFB-LD, interference expose for grating formation and 3-step LPE epitaxial growth was used. Fabricated PBH-DFB-LD operates in single longitudinal mode with more than 35dB SMSR and its threshold current is less than 15 mA. The operating wavelength is 1530~1550 nm with the temperature dependence of $0.9\text{\AA}/\text{C}$. Coupling coefficient(κ) was estimated as 97 cm^{-1} by means of stop-band measurement. PBH-DFB-LD fabricated in this experiment can be applicable as light source for 2.5 Gbps optical fiber communication system.