

論文94-31A-9-17

2.5Gbps 광통신용 1.55 μm InGaAsP/InP PBH-DFB-LD 제작 및 특성

(Fabrication and Characteristics of 1.55 μm InGaAsP/InP PBH-DFB-LD for 2.5Gbps Optical Fiber Communication)

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

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

要約

변조대역폭이 3GHz 이상이고 측모드 억제율이 35dB 이상인 1.55 μm 파장의 InGaAsP/InP PBH-DFB-LD를 제작하였다. 기생정전 용량을 줄이기 위해 메사폭이 8 μm 인 채널을 형성시켰고 전극패드의 크기도 줄였다. 광출력 5mW에서, 측모드억제율이 30dB 이상인 칩의 발진임계전류는 5~15mA에 분포하였고, slope efficiency는 0.11~0.27mW/mA에 분포하였다.

Abstract

InGaAsP/InP PBH-DFB-LD emitting at 1.55 μm wavelength has been fabricated for 2.5Gbps optical fiber communications. For fabrication of PBH-DFB-LD, interference expose for grating formation and 3-step LPE epitaxial growth were used. Fabricated PBH-DFB-LD operates in single longitudinal mode with larger than 35dB SMSR and wider than 3dB bandwidth of 3GHz. A 8 μm mesa structure was introduced by channel etching to reduce parasitic capacitance. To reduce pad capacitance, we designed a small electrode. The threshold currents lie in the range of 5~15mA and the slope efficiencies lie in 0.11~0.27mW/mA in the case of spectrum shows single longitudinal mode operation with larger than 30dB SMSR measured at 5mW.

1. 서론

반도체 레이저는 높은 광/전 변환 효율을 갖는 소자로 고속 직접 변조가 가능하여 광통신용 광원으로 적용

되기 시작한 이래 정보전송의 장거리화, 대용량화 발전 추세에 맞추어 끊임없이 개선되고 있다. 특히, strongly index guiding 구조인 BH(buried heterostructure)구조 레이저는 발진임계전류가 낮고, 양자효율이 높으며, 온도특성이 우수하고 넓은 변조대역폭을 갖는 등 안정된 동작특성으로 인하여 광통신용 광원으로 널리 사용되고 있다.^[1] 현재 연구 개발이 급속히 진전되고 있는 2.5Gbps급 장거리 대용량 광통신

*正會員, 韓國電子通信研究所 化合物半導體 研究部
(Compound Semiconductor Division, ETRI)
接受日字 : 1994年 2月 12日

시스템의 광원으로서는 광섬유 손실이 최저인 1.55 μm 파장대에서 발진하고, 광섬유의 색분산에 의한 거리 제한을 받지 않는 좁은 선폭을 갖는 단일 파장 반도체 레이저에 대한 필요성이 크게 대두되고 있다.

본 연구에서는 2.5Gbps 광통신용 반도체 레이저로 PBH(planar buried heterostructure)구조의 1.55 μm InGaAsP/InP DFB 레이저를 LPE를 이용하여 제작하였다. BH 구조 반도체 레이저의 경우 기생정전용량의 영향이 없는 intrinsic-LD의 최대변조대역폭은 활성층의 비선형성에 의해 결정되며, 보통 20GHz 이상으로 알려져 있다.^[2] 그러나, 실제 레이저 다이오드의 경우 활성층 주위의 전류 차단층에서 발생하는 기생 정전용량과 완화진동(relaxation-oscillation) 주파수에서의 공진 현상에 의해 변조특성이 좌우된다. 특히 PBH-LD의 경우 blocking 층의 두께 및 도핑농도 등이, 기생정전용량으로 좌우되는 LD의 동특성과 1.3 μm 파장의 경우보다는 심각하지 않지만 고출력 동작시의 p-n-p-n blocking 층의 turn-on, 고온 동작 시 발생하는 누설전류 및 광전 변환효율 등의 정특성 사이에 trade-off 적인 영향을 미친다. 예를 들어 우수한 정특성을 위해 blocking 층의 p-InP 및 n-InP 층의 도핑농도를 각각 $\sim 1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 과 $\sim 3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 으로 하고, 두께를 $\sim 1 \mu\text{m}$ 로 할 경우 1GHz에서의 blocking 층의 기생정전용량이 $\sim 25 \text{pF}$ 으로,^[3] 800MHz 이상의 -3dB 소신호 변조대역폭을 얻을 수 없게 된다.

이와 같이 낮은 변조 대역폭을 향상시키기 위해서 constricted mesa 형, semi-insulator embedding 형, semi-insulator 기판 사용 및 채널 형성 등의 방법이 기생 정전용량을 줄이기 위한 방법으로 사용되며, 활성층의 doping농도를 크게 하거나 저온 동작 혹은 short-cavity형성 등이 완화진동 주파수를 높이는 방안으로 제시되어 있다.^[4] 본 연구에서는 위의 방법 중 반도체 레이저의 기본 동작특성에는 영향을 주지 않고 blocking 층의 기생정전 용량만을 감소시켜 변조대역폭을 증가시킬 수 있도록 활성층 주변에 채널을 형성시키고 p-전극도 wire bonding이 가능한 최소 형태로 제작함으로써 2.5Gbps 광통신용 광원으로 적용가능한 고속 변조 PBH-DFB-LD를 제작한 결과를 보고하고자 한다.

II. PBH-DFB-LD 제작공정

n-InP 기판 위에 2380Å 주기의 회절격자를 간섭노광법과 HBr계를 이용한 에칭공정을 통하여 형성시켰다. 에칭시간을 조정하여 격자깊이를 350~400

Å으로 조정하였으며 회절격자 깊이 중심에서 활성층 경계까지는 0.1 μm 두께의 1.3 μm 파장의 waveguide층을 삼입함으로써 결합계수 κ 를 97cm^{-1} 로 조정하였다. 따라서 본 실험에서 제작한 PBH-DFB-LD의 경우 공진기 길이 300 μm 에서의 κL 값은 2.9이다.

(011) 방향으로 형성된 회절격자 위에 1.3 μm n-InGaAsP($\sim 1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$) waveguide, 1.55 μm undoped-InGaAsP 활성층, 1.3 μm undoped-InGaAsP (antimelt-back층, 두께:0.1 μm) 및 p-InP(두께:0.5 μm , 도핑농도 $\sim 4 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$) 클래드층을 LPE를 이용하여 결정성장 시켰다.

1차 성장이 끝난 후의 mesa 에칭은 SiN를 에칭 마스크로 하여 선택식각방법을 이용하였다. 이때의 식각은 InP층은 $\text{HC}_1:\text{H}_3\text{PO}_4=15:85$ 용액을, InGaAsP층은 $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=3:1:1$ 용액을 이용하였다. 에칭 후 활성층의 폭은 1~1.5 μm 였다. 에칭공정 후에 SiN 마스크로 current blocking을 위한 p-n구조의 2차 선택 결정성장을 시켰다. 이때, p- 및 n-InP층의 두께는 1~1.5 μm 가 되도록 하였고, p층의 도핑은 $\sim 1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 으로 n층의 도핑은 $\sim 3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 이 되도록 In/Zn 및 In/Te alloy를 이용하여 도핑 하였다.

2차 성장이 끝난 후에는 SiN 마스크를 BOE(6:1)로 제거시킨 후 p-InP 및 옴 접촉용 p-InGaAs층을 웨이퍼 전면에 성장시켰다. 이때, 마지막 p-InGaAs층은

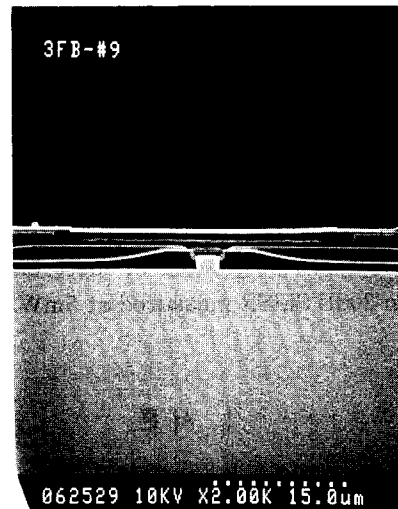


그림 1. LPE를 이용하여 3차에 걸친 결정성장이 끝난 후의 단면사진

Fig. 1. SEM photography of the PBH-DFB-LD after three step LPE growth.

음 접촉 특성을 좋게 하기 위해 $\sim 2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 으로 도핑하였다. 3차에 걸친 결정성장 후의 단면을 그림 1에 나타내었으며 각 층의 조성은 그림 3-(a)에 나타내었다.

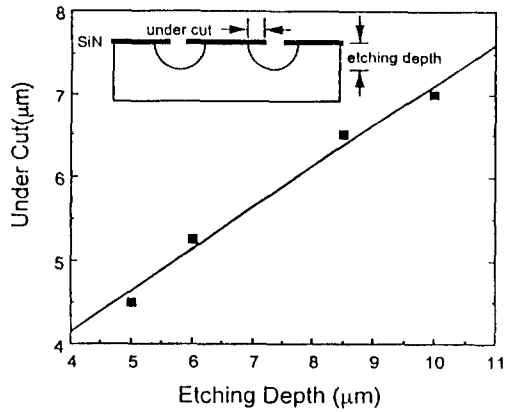
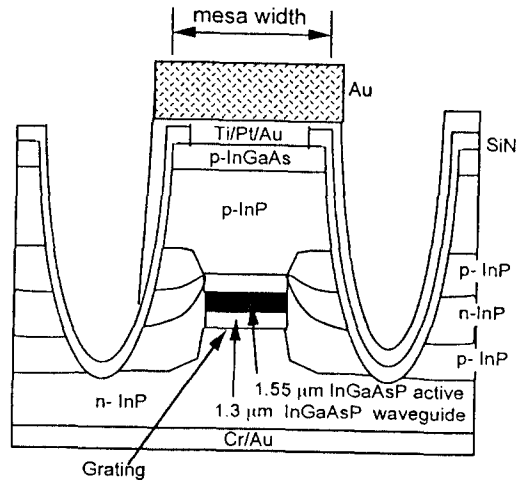


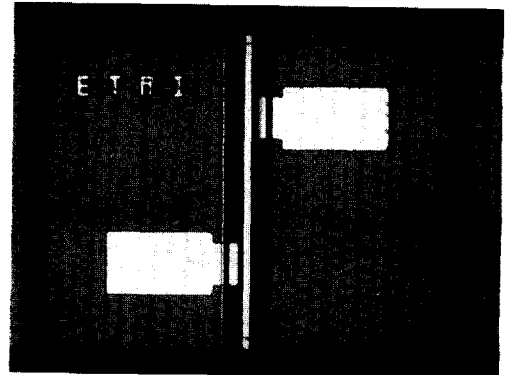
그림 2. 채널에칭 시 에칭깊이에 따른 under cut 정도

Fig. 2. Undercut variation with respect to channel etching depth.

결정성장이 끝난 후, photolithography 공정을 이용하여 채널에칭을 위한 SiN 에칭마스크를 형성시킨 후 0.2% Br-methanol 용액을 이용하여 채널에칭을 행하였다. 이때 비교적 큰 under-cut이 발생하며, 에칭 깊이에 따른 under-cut 정도를 그림 2에 나타냈다. 본 실험에서는 채널 폭 $4\mu\text{m}$ 메사에칭 마스크 폭이 $22\mu\text{m}$ 인 마스크를 이용하여 $6\mu\text{m}$ 깊이로 에칭 한 후의 메사 폭은 $8\mu\text{m}$ 였다. 채널 형성 후에 4000\AA 의 SiN를 증착 한 후 음 접촉을 위해 메사 중앙에 $3\mu\text{m}$ 폭의 contact window를 open한 후 lift-off 공정을 이용하여 Ti/Pt/Au를 형성시켰다. 기생전용량을 감소시키기 위해 그림 3-(b) 모양의 bonding pad를 금 도금 공정을 통하여 형성시켰다. n-InP 기판의 음 접촉은 n-InP 기판을 $100\mu\text{m}$ 두께로 lapping 한 후 Cr-Au를 증착 시켜 형성하였다. p-InGaAs 및 n-InP에서의 음 접촉저항을 줄이기 위해 10% H_2/N_2 분위기에서 RTA를 이용하여 425°C 에서 30초, 400°C 에서 30초로 각각 열처리하였다. 전극형성 공정이 끝난 후 die bonding을 위하여 Au/Sn을 $1\mu\text{m}$ 두께로 진공증착 하였다. 이와 같은 공정을 통해 제작된 PBH-DFB-LD의 단면은 그림 3-(a)와 같다. DFB 모드의 발진과 출사면의 광출력을 높이기 위해, sputtering장비를 이용하여 레이저 거울면 한쪽을 $\lambda/4$ 두께의 SiO_2 로 coating하여 반사율 5% 이하로 낮추었다.



(a)



(b)

그림 3. (a) PBH-DFB-LD의 단면도 (b) 공정이 완료된 PBH-DFB-LD칩의 표면사진(칩 크기: $300\mu\text{m} \times 400\mu\text{m}$)

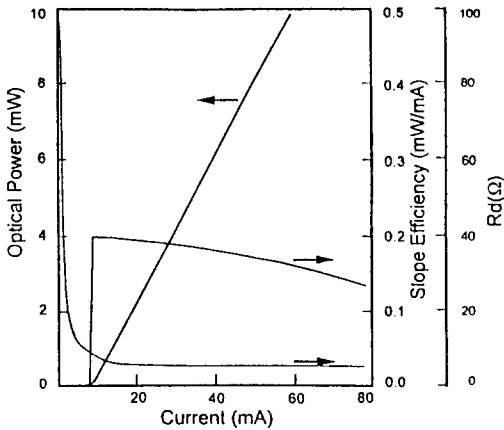
Fig. 3. (a) Schematic cross section of the PBH-DFB-LD (b) photography of the surface of PBH-DFB-LD chip.

III. PBH-DFB-LD 특성

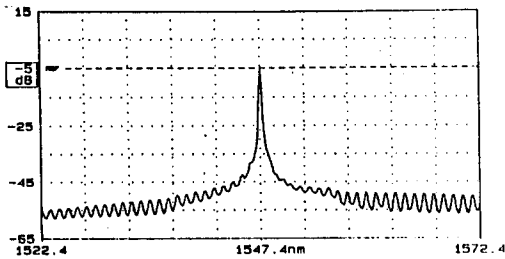
그림 4-(a)는 상온에서 측정된 PBH-DFB-LD 칩의 일반적인 I-V-L 특성곡선이다. 그림 4-(a)에서 발진개시 전류는 6.7mA , slope efficiency는 0.198mW/mA 이다. 그림 4-(b)는 5mW 광출력에서의 스펙트럼 특성곡선으로, 측 모드억제율

(SMSR:side mode suppression ratio)이 35dB 이상이고 발진 파장은 1.547 μ m 이다.

T_0 . [$I(T)=I_{th}\exp(T/T_0)$]를 정의하여 반도체 레이저의 발진임계전류의 온도의존성을 나타내고 있다.



(a)



(b)

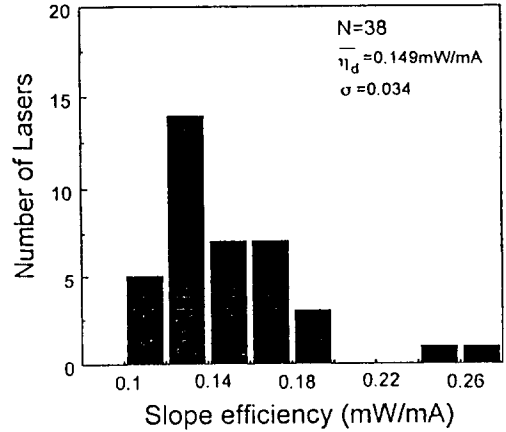
그림 4. PBH-DFB-LD 칩의 (a) I-V-L 특성.

(b) 광출력 5mW에서의 스펙트럼 특성

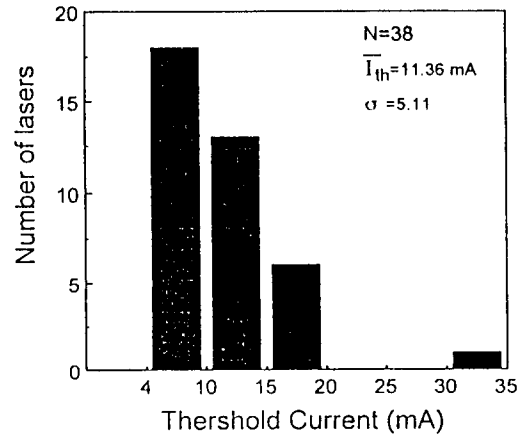
Fig. 4. (a) I-V-L characteristics and (b) lasing spectrum of the PBH-DFB-LD chip measured at 5mW.

그림 5에는 동일 웨이퍼에서 slope efficiency가 0.1mW/mA 이상이고 5mW 광출력에서 측모드억제가 30dB 이상인 칩의 발진임계전류와 slope efficiency 분포를 나타내었다. 그림 5에서 발진개시 전류가 가장 낮은 소자는 4.63mA 였으며, slope efficiency가 가장 높은 소자는 0.27mW/mA로 측정되었다. 발진임계전류는 주로 5~15mA에 분포되어 있고 이의 평균 값은 11.36mA 이었다. slope efficiency는 0.11~0.27mW/mA에 분포되어 있었고 평균 slope efficiency 값은 0.149mW/mA 였다.

반도체 레이저의 동작특성은 반도체 재료의 고유 특성에 의해 온도의 변화에 민감하기 때문에 특성온도



(a)



(b)

그림 5. PBH-DFB-LD 칩의 (a) slope efficiency와 (b) 발진임계전류 분포

Fig. 5. The distribution of (a) the slope efficiency and (b) the threshold current of a PBH-DFB-LD chip.

제작된 반도체 레이저의 T_0 값을 조사하기 위하여 온도에 따른 발진임계전류의 변화를 그림 6에 나타내었다.

그림으로부터 상온 부근에서의 T_0 값이 60K로 일반적인 InGaAsP/InP계 반도체 레이저의 T_0 값 보다 높으므로 활성층의 결정특성이 우수함을 알 수 있다.

그림 7에는 p-InP 전류차단층과 n-InP 전류차단층의 불순물 농도가 각각 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 과 $3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 일 때 메사 폭이 4 μ m 및 8 μ m 인 경우의 주파수 변화

에 따른 정전용량을 simulation한 결과를 나타내었다.^[5] 그림 7에서 보면 메사 폭이 8 μm 인 경우가 4 μm 인 경우보다 정전용량이 크고 주파수 변화에 따른 정전용량 값의 변화가 큰 것을 알 수 있는데, 이는 주파수가 높아질수록 실제 blocking 층을 따라 측면으로 전류가 퍼지는 폭의 넓이가 적어져서 메사 폭이 클수록 주파수 변화에 따른 정전용량 값의 변화가 크게 나타나기 때문이다.^[6]

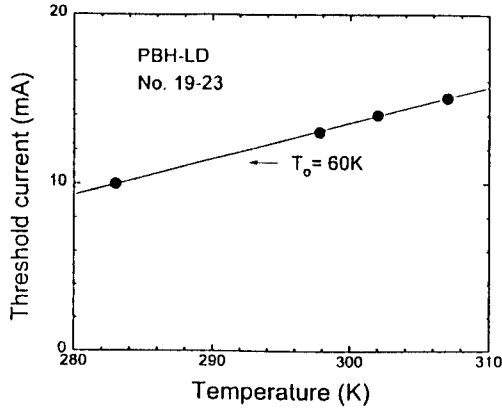


그림 6. PBH-DFB-LD 칩의 온도에 따른 발진임계전류의 변화

Fig. 6. Threshold current variation of the PBH-DFB-LD chip with temperature.

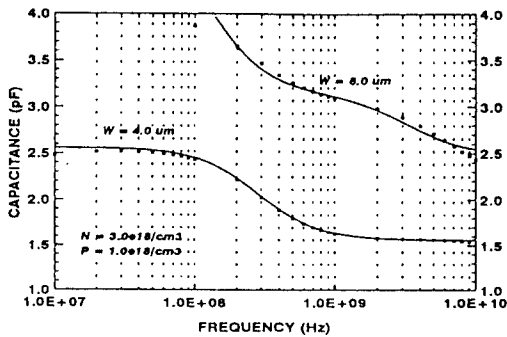


그림 7. Blocking layer 농도와 주파수 변화에 따른 기생 정전용량의 변화

Fig. 7. Parasitic capacitance of the PBH-DFB-LD chip with blocking layer doping concentration and frequency variation.

즉, 메사 폭이 4 μm 인 경우 DC 기생정전용량이 2.6pF 이고 주파수 변화에 따른 정전용량 변화도 매우 작다. 이는 역 방향 p-n 접합 면적이 작기 때문에

이에 기인하는 기생정전용량이 작기 때문이며 이 경우에는 주로 전극에 의한 정전용량이 변조대역폭을 좌우할 것으로 예상된다. 본 연구에서는 메사 폭 8 μm 인 소자를 제작하였는데 이는 메사 폭 4 μm 인 소자의 경우 제작이 어렵고, 활성층을 제외하면 blocking 층 영역이 좁아 활성층에 stress를 주어 reliability 특성을 나쁘게 할 것으로 예상되었기 때문이다.

그림 8에 제작된 소자의 소신호 변조 특성을 나타냈다. 측정에 사용된 변조대역폭 측정장비(light-wave component analyzer)의 대역폭이 ~3GHz 이므로 정확한 차단 주파수는 알 수 없으나 -3dB 차단 주파수가 3GHz 이상이 됨을 알 수 있다.

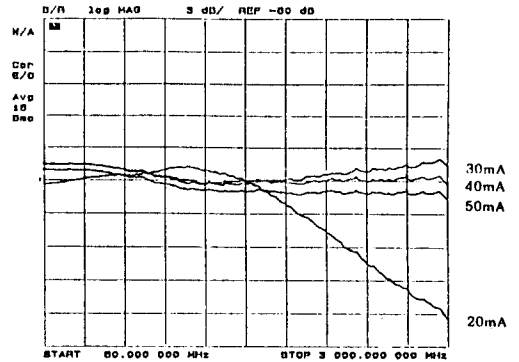


그림 8. PBH-DFB-LD 칩의 전류변화에 따른 소신호 변조특성 (I_{th}=15mA)

Fig. 8. Small signal response of the PBH-DFB-LD chip with injection current (I_{th}=15mA).

따라서 변조대역폭을 결정하는 변수들을 고려하여 본 실험에서 제작된 소자의 변조대역폭을 예상하여 보면, 메사 폭이 8 μm 일 때의 1GHz에서의 전류차단층의 정전용량이 3pF 정도이고, metal insulator semiconductor (MIS) 구조의 전극 패드에서의 정전용량이 3pF 가량 되므로 레이저 전체의 정전용량은 6pF이 된다. R이 레이저의 직렬저항 이고, C가 레이저의 정전용량일 때 차단주파수는 $f_c = 1/(2\pi RC)$ 의 식으로 나타내어진다. 그림 4에서 알 수 있듯이 직렬저항이 6 Ω 이므로 앞의 식에 대입하면, 본 실험에 사용된 메사 폭 8 μm 인 PBH-DFB-LD의 -3dB 변조대역폭은 4.4GHz가 될 것으로 예측된다.

IV. 결론

1.55 μm 파장의 장거리 대용량 광통신용 PBH-DFB-LD를 제작하였다. grating제작은 He-Cd 레

이저를 사용하여 간섭노광법에 의해 제작하였으며 PBH 구조를 위해 3회의 결정성장을 LPE로 행하였다. 결정성장이 끝난 후 기생정전용량을 줄이기 위해 메사 폭이 8 μ m 인 채널을 형성시켰고 전극패드의 크기도 줄였다. 동일 웨이퍼에서 광출력이 5mW 이상 일 때까지 단일모드로 발진하고, 측모드억제율이 30dB 이상인 칩의 발진임계전류는 5~15mA에 주로 분포하였고 이들의 slope efficiency는 0.11~0.27mW/mA에 분포하였다. 특성온도 To=60K 이었고 메사 폭 8 μ m 인 PBH-DFB-LD의 변조대역폭은 3GHz 까지 평탄함을 확인할 수 있었으며 이로부터 본 연구에서 제작된 PBH-DFB-LD가 2.5Gbps 광통신용 광원으로 적용 가능함을 보였다.

감사의 글

본 논문은 한국통신의 출연금에 의하여 수행한 연구결과입니다.

參考文獻

[1] G. P. Agrawal and N. K. Dutta, Long-Wavelength Semiconductor Lasers, VNR, New York, p.193, 1986.

[2] J. E. Bowers, "High speed semiconductor laser design and performance", Solid-St. Electron., vol.30, no.1, pp.1~11, 1987.
 [3] H. Ishikawa, K. Kamite, K. Kihara and H. Nishimoto, "DFB lasers for high bite-rate communication systems", optoelectronics, vol.3, no.2, pp.247~256, Dec. 1988.
 [4] K. Kamite, H. Sudo, and M. Yano, "Ultra-high speed InGaAsP /InP DFB lasers emitting at 1.3 μ m wavelength", IEEE J. of QE, QE-23, no.6, pp.1054~1058, June 1987.
 [5] 김상배, "DFB-LD 구조가 발진 모드에 미치는 영향에 관한 연구", 최 중연구보고서, 한국전자통신연구소, p.67, 1993년 11월
 [6] H. Ishikawa, H. Soda, K. Wakao, K. Kihara, K. Kamite, Y. Kotaki, M. Matauda, H. Sudo, S. Yamakoshi, S. Isozumi, and H. Imai, "Distributed feedback laser emitting at 1.3 μ m for gigabit communication systems", J. Lightwave Technol., vol.LT-5, no.6, pp.848~855, 1987.

著者紹介



李重基(正會員)
 1962年 2月 5日生. 1985年 2月 광운대학교 전자재료공학과 졸업. 1987年 2月 광운대학교 대학원 전자재료공학과 공학 석사. 1987年 2月 ~ 현재 한국전자통신 연구소 화합물반도체개발실 선임연구원. 주관심 분야는 통신용 반도체 레이저 제작 및 초고속 광통신용 소자 제작 등임.

張東薰(正會員) 현재 한국전자통신연구소 화합물 반도체개발실 선임연구원

李承遠(正會員) 현재 한국전자통신연구소 광전자 연구실 선임연구원

朴景鉉(正會員) 현재 한국전자통신연구소 화합물 반도체개발실 선임연구원

曹豪成(正會員) 第 26卷 第 11號 參照
 현재 한국전자통신연구소 화합물 반도체개발실

— 著 者 紹 介 —

金 定 洙(正會員) 현재 한국전자통신연구소 화합물
반도체개발실 선임연구원

金 弘 晚(正會員) 第 22卷 第 4號 參照
현재 한국전자통신연구소 광전자
연구실 실장

•
朴 亨 茂(正會員) 第 31卷 第 7號 參照
현재 한국전자통신연구소 화합물
반도체연구부 부장

•
洪 彰 禧(正會員) 第 26卷 第 11號 參照
현재 한국해양대학교 전자통신공학과
교수