

논문 17-1-3

## 파장가변 Sampled-grating Distributed Bragg Reflector (SG-DBR) 레이저 다이오드 제작

### Fabrication and Characteristics of Tunable Butt-Coupled Sampled-grating Distributed Bragg Reflector (SG-DBR) Laser Diodes

이지면<sup>1,a</sup>, 오수환<sup>1</sup>, 고현성<sup>1</sup>, 박문호<sup>1</sup>  
(Ji Myon Lee<sup>1,a</sup>, Su Hwan Oh<sup>1</sup>, Hyun Sung Ko<sup>1</sup>, and Moon Ho Park<sup>1</sup>)

#### Abstract

We present the fabrication and performance of wavelength tunable butt coupled (BT) sampled-grating (SG) distributed bragg reflector (DBR) - planar buried heterostructure (PBH) laser diodes (LD). The fabricated LD showed the high optical output power due to the high coupling efficiency between active and passive components by the BT coupling methods. The series resistance and diode ideality factor of LD were measured to be 3.7  $\Omega$  and 1.35, respectively. The average threshold current was 25 mA. The output powers of BT-SG DBR-PBH-LD were obtained to be as high as 12.3 and 24.56 mW at 100 and 200 mA, respectively. The maximum wavelength tuning range was about 31 nm and the side mode suppression ratio was about 37 dB.

**Key Words** : InP, Laser diode, Sampled grating, DBR, Butt-coupling

#### 1. 서론

발전파장이 wavelength division multiplexing (WDM) 파장 영역을 포함할 수 있는 광대역 파장 가변 레이저 다이오드에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있다[1]. 이러한 파장 가변광원은 WDM trunk 망의 광송신기에 있어서 파장 가변 기능에 의한 임의 파장 채널을 설정할 수 있는 광원으로 활용될 뿐만 아니라 광교환용 파장변환기의 여기 광원으로 사용되며, 광수신기에서 광신호를 선별 검출하기 위한 기준 광원으로도 이용된다[2]. 또한 최근 WDM-passive optical network (PON)에 대한 관심이 증가 함에 따라 downstream 광원으로

서의 파장가변 레이저 다이오드가 유력한 후보 중의 하나로 제안되고 있다[3].

이러한 파장 가변 레이저는 DFB (distributed feedback)-LD(laser diode), 혹은 DBR (distributed bragg reflector)-LD가 주로 사용되고 있는데, DFB/DBR-LD의 경우 파장 가변 범위가 10 nm 이하인 특징을 가진다[4]. 그러므로 C-밴드 영역 (1528 ~ 1568 nm) 전체에서 발진 가능하며, 또한 tuning 가능한 넓은 파장 가변 특성을 보이는 레이저 다이오드 제작이 필수적이다. 이러한 넓은 파장 가변 특성을 나타내기 위해서는 주기적인 다중 반사 스펙트럼이 나오도록 grating 구조의 변화를 주어야 하며, 이 중에는 superstructured grating (SSG)과 sampled-grating (SG)의 대표적인 구조가 있다[5]. 그러나, SSG의 경우 e-beam lithography 방법으로 chirped grating을 제작하여야 하므로 낮은 throughput 혹은 yield 특성을 나타내는 문제점이 있다. SG를 이용한 레이저 다이

1 : 한국전자통신연구원 반도체원천기술연구소  
(대전시 유성구 가정동 161,  
Fax : 042-860-6248

a : Corresponding Author : jimlee@etri.re.kr  
2003년 8월 27일 접수, 2003년 9월 18일 1차 심사완료  
2003년 9월 29일 최종 심사완료

오드에 관해서는 Coldren등이 buried ridge stripe (BRS)/ridge waveguide (RW) 구조의 레이저 다이오드 제작에 관한 연구결과가 보고 되고 있는데 [1], 본 논문에서는 활성층과 도파로층 사이의 결합 효율이 80 % 이상으로 알려져 있는 Butt-joint (BT)[6,7] 구조를 이용한 평면 매립형 (planar buried heterostructure; PBH)[8] SG DBR-LD를 제작하고 그 특성을 분석하고자 한다

## 2. 평면매립형 BT-SGDBR-LD 제작

그림 1은 본 연구에서 제작한 BT-SG-DBR-LD의 구조를 나타내고 있다. 활성영역 (Gain section)과 위상제어 영역 (Phase control section), 전면 DBR 영역 (Front DBR section), 및 후면 DBR 영역 (Rear DBR section)으로 구분되며, 각각의 길이는 500  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$ , 및 500  $\mu\text{m}$  이다. 또한 도파로 역할을 하는 층과 활성층 역할을 하는 층이 butt 결합을 통하여 한층으로 집적 되어있다. 활성층 구조는 0.7 % 압축응력을 가진 well과 0.35 % 인장응력을 가진 barrier로 된 응력 완화 다중양자우물 활성층을 사용하였다. BT 결합은 활성층만 성장된 에피 웨이퍼를 건식 식각 방법으로 일정한 부분의 활성층만 남겨둔 후 선택 습식식각 방법으로 에칭하여 MOCVD 재성장으로 InGaAsP ( $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ ; 1.3Q) 도파로층을 성장하였다. 자세한 butt 결합 방법은 참고문헌 [7]에서 찾아볼 수 있다. 이 때 상대적인 결합 효율은 약 85 % 이상으로 나타났으며, 이러한 결과는 재성장 시 butt 결합 성장면에서 생길수 있는 defect가 발생하지 않았으며, 기존의 butt 결합 효율로 알려진 80 % [9]를 증가하는 값으로, BT interface 부분의 성장 특성이 우수함을 알 수 있다.

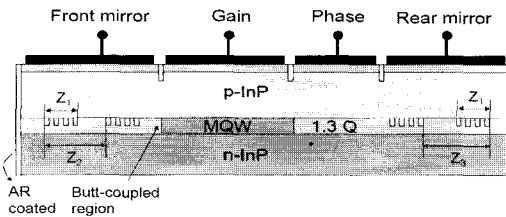


그림 1. 제작된 BT-SGDBR LD의 대략적 그림.  
Fig. 1. Schematic diagram of BT-SGDBR-LD (not in scale).

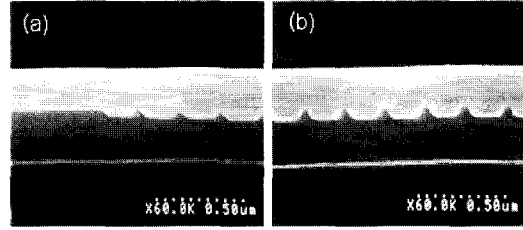


그림 2. (a) sampled 영역과 (b) unsampled 영역의 측면 SEM 사진.

Fig. 2. Cross sectional SEM image of (a) sampled grating and (b) unsampled grating region.

BT영역을 성장한 후 1.3 Q InGaAsP 도파로층에 laser holography 방법을 사용하여 sampled grating을 형성하였다. 이 때 grating 주기 ( $Z_0$ )는 240 nm, grating burst 길이 ( $Z_1$ )는 6.4 nm, 전면 ( $Z_2$ ) 및 후면 ( $Z_3$ ) DBR의 sampling 주기는 각각, 68  $\mu\text{m}$ , 75  $\mu\text{m}$  으로 설계하였으며, 길이는 반응성 이온 식각 방법을 사용하여 800 Å 정도로 하였다. Grating 부분의 SEM단면 사진을 그림 2에 나타내었다. 그림에 나타난 것처럼 전체적인 grating의 모양은 대체적으로 균일하였다.

이와 같이 형성된 에피 웨이퍼를 이용하여 역방향 접합인 p-n-p 전류 차단층을 가지는 PBH-LD를 총 5번의 재성장을 통하여 제작하였다[10]. 그림 3은 제작된 BT-PBH-SGDBR-LD의 활성층 단면사진으로 각각의 고유한 층이 잘 정의된 것을 알 수 있다. 마지막으로 chip scribing 후 전면 cleavage plane에 무반사 coating[11] 하였다.

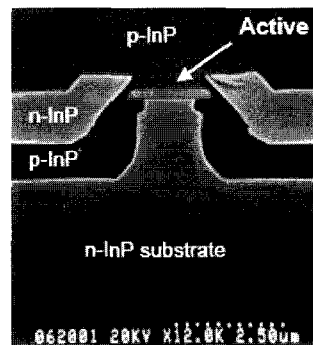


그림 3. 제작 완료 후 활성영역의 SEM 사진.  
Fig. 3. Cross sectional SEM image of active layer after fabrication.

### 3. PBH BT-SGDBR-LD 동작특성

제작된 BT-SGDBR-LD의 전기적, 광학적 특성을 조사하였다. CW로 구동시켰을 경우 광출력-전류-전압 특성을 그림 4(a)에 나타내었다. 이 때 위상제어 영역과 전/후면 DBR 및 phase영역의 전류는 인가하지 않고, gain영역에 전류를 200 mA까지 인가하였다. 그림에서 알 수 있듯이 활성층에 전류를 100 mA를 인가하였을 경우 출력이 12.3 mW로 나타났고, 전류가 200 mA일 때 출력이 24.56 mW로 나타났으며 고전류를 인가하여도 급격한 광출력 변화와 포화현상이 나타나지 않았다. 또한 각 전류에 대한 광출력 변화량이 일정하게 나타났다. 이 때의 slope efficiency는 약 15 % 이상이었다.

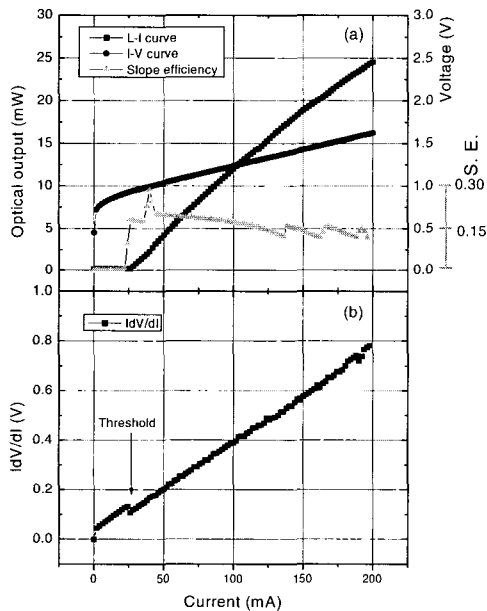


그림 4. (a) 전형적인 PBH-BT-SGDBR-LD의 광출력-전압-전류-전압 곡선, (b) 미분전압 vs. 전류곡선.

Fig. 4. (a) Typical L-I-V curve for PBH-BT-SGDBR-LD, (b) differential voltage-current curve.

이러한 결과는 제작된 BT-SGDBR-LD의 광출력 특성이 기존의 BT-DBR-LD[7,12]와 유사한 특성을 나타내는 것으로 grating 내부에 sampling된 영역이 굴절률의 perturbation으로 인한 photon의

scattering center로써 작용하지 않으며, 또한 이러한 영역이 waveguide loss에 미치는 영향은 무시할 수 있는 정도임을 알 수 있다.

또한 제작된 BT-SGDBR-LD의 전기적 특성을 조사하기 위해 Wright등[13]의 결과에 따라  $I(dV/dI)$  vs.  $I$ 의 그래프를 작도하였다. 그림 4(b)에 나타난 바와 같이, 문턱 전류 이하에서 leaky한 레이저 다이오드의 전형적인 bump가 없는 것으로부터 본 연구에 의해 제작된 매립형 레이저 다이오드는 shunt 누설전류가 없다고 판단할 수 있었다. 또한 이 그래프를 통하여 다음의 알려진 관계식으로부터[14],

$$I \frac{dV}{dI} = \begin{cases} \frac{nk_{\beta}T}{q} + R_s I & \text{for } I < I_{th} \\ R_s I & \text{for } I > I_{th} \end{cases}$$

series resistance ( $R_s$ )와 diode ideality factor ( $n$ )를 계산한 결과,  $R_s$ 은  $3.7 \Omega$ ,  $n$ 은 1.35로 계산되었다. 이러한 결과는 기존에 보고된 ridge waveguide (RW) InGaAsP MQW 레이저 다이오드의  $R_s$  ( $\sim 5$ )[15]와 ridge waveguide (RW) InGaAs MQW 레이저 다이오드의  $n$  ( $\sim 1.86$ )[16]과 비교할 때 우수한 전기적 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

그림 5는 임계 전류 이하인 자발 발광상태에서 LD를 동작할 때 스펙트럼이다. 이 때 각각의 sampled grating에 의한 mode 간격은 다음과 같이 계산된다[1].

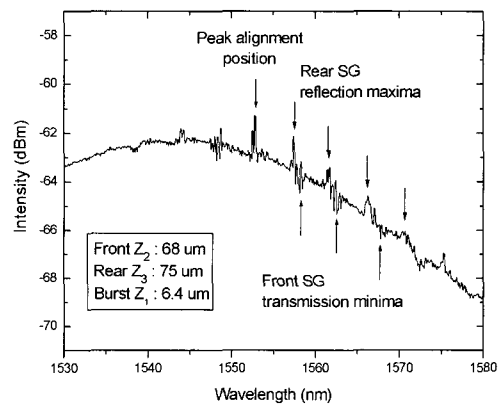


그림 5. (a) 자발발광상태에서 측정된 전면 및 후면 DBR의 모드간격.

Fig. 5. Mode spacing of front and rear DBR.

표 1. 설계 및 측정된 모드 간격값의 비교.  
Table 1. Designed and measured mode spacing.

	설계	측정
$\Delta\lambda_2$ (Front mode spacing)	4.8 nm	4.6 nm
$\Delta\lambda_3$ (Rear mode spacing)	4.3 nm	4.1 nm

$$\Delta\lambda_n = \frac{\lambda^2}{2\mu_g z_n}$$

여기서  $\lambda$ 는 중심파장 (1.55  $\mu\text{m}$ ),  $\mu_g$ 는 group index, 그리고  $Z_n$ 은 전면 및 후면 sampling period 이다. 측정된 전면 SG에 의한 mode 간격은 4.6 nm 이었고, 후면 SG에 의한 mode 간격은 4.1 nm 이었다. 계산된 모드 간격과 측정된 모드 간격을 비교하여 표 1에 나타내었으며 계산값과 측정값이 0.2 nm의 측정 오차 범위 내에서 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

그림 6은 제작된 LD의 파장가변 특성을 나타내었다. 위상제어 영역에는 전류를 인가하지 않은 상태에서 활성층에 120 mA의 전류를 인가하고, DBR영역의 전류를 50 mA까지 인가하면서 파장가변 특성을 조사해 보았다. 전면 반사로부터 기인한 comb reflectivity가 7개, 그리고, 후면 반사로부터 기인한 comb reflectivity가 7개로 동일하게 존재함을 알 수 있으며 이것으로부터 파장가변 구간은 31 nm의 파장가변 구간 특성을 나타내었다.

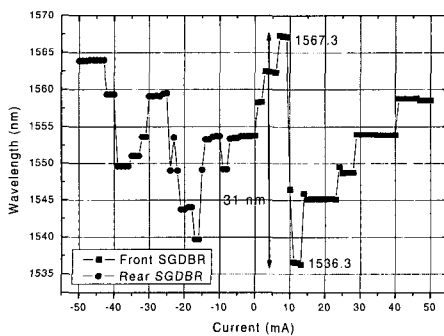


그림 6. 전면 및 후면 DBR에 각각 전류를 인가할 때 측정된 peak 파장의 변화, (-)전류는 후면 DBR 전류를 표시.

Fig. 6. Peak wavelength variation under either current on front and rear DBR region.

또한 제작된 BT-PBH-SGDBR-LD의 스펙트럼 및 측모드 억제율(side mode suppression ratio; SMSR) 특성을 그림 7에 나타내었다. LD에서 측모드가 효과적으로 억제 되지 않으면, LD가 단파장으로 동작하지 않으며, 데이터 전송시 모듈레이션 특성에 큰 영향을 미쳐 noise등을 야기 할 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 본 연구에서 제작된 LD의 측모드 억제율은 37 dB이상으로 우수하게 나타났으며, 광출력 변화율도 3 dB이하로 우수한 특성을 나타내었다.

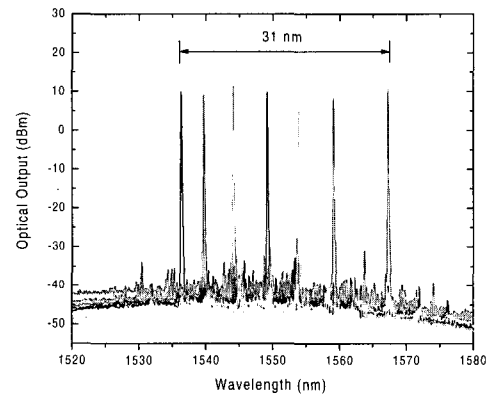


그림 7. 31 nm 파장 가변 영역을 나타내는 스펙트럼.

Fig. 7. Wavelength spectrum presenting the 31 nm tuning range.

#### 4. 결론

5번의 성장을 통하여 PBH구조를 갖는 파장가변 BT-SGDBR-LD를 제작하고 특성을 조사하였다. 도파로 영역과 active 영역을 butt-coupling 방법으로 집적하여 높은 광출력 특성을 나타나도록 유도하여 연속전류를 인가 했을 때, 광출력이 100 mA에서 12.3 mW, 200 mA에서 24.56 mW로 측정되었다. Gain영역에 고전류를 주입하여도 급격한 광출력 변화와 포화현상이 나타나지 않았다. 이때의 series resistance 값과 diode ideality factor 값은 각각 3.7  $\Omega$  및 1.35로 계산 되었다. 양쪽 DBR영역의 전류인가만을 이용한 최대 파장가변 폭은 31 nm, SMSR비는 37dB 정도로 나타났다.

### 참고 문헌

- [1] V. Jayaraman, Z. M. Chuang, and L. A. Coldren, "Theory, design, and performance of extended tuning range semiconductor lasers with sampled gratings", *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. 29, No. 6, p. 1274, 1997.
- [2] J. Hourany, C. Chauzat, M. Bilard, D. De Bouard, and R. Lefeve, "Wavelength optical/electronic encoding module for ATM optical-switching", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 7, No. 11, p. 1306, 1995.
- [3] M. Okayasu, N. Tamaki, N. Shibata, and I. Yamashita, "Performance evaluation of an upgradable passive access network employing downstream WDM packet routing", *Optical Fiber Communication Conference '97*, p. 56, 1997.
- [4] S. Murata, I. Mito, and K. Kobayashi, "Tuning ranges for 1.5  $\mu\text{m}$  wavelength tunable DBR lasers", *Electron. Lett.*, Vol. 24, No. 10, p. 577, 1988.
- [5] B. S. Kim, Y. Chung, and S. H. Kim, "Dynamic analysis of widely tunable laser diodes integrated with sampled- and chirped-grating distributed Bragg reflectors and an electroabsorption modulator", *전기전자재료*, 11권, 11호, p. 28, 1998.
- [6] Y. Abe, K. Kishino, Y. Suematsu, and S. Arai, "GaInAsP/InP integrated laser with butt-jointed built-in distributed Bragg reflector waveguide", *Electron. Lett.*, Vol. 17, No. 25, p. 945, 1981.
- [7] 오수환, 이철욱, 김기수, 이지면, 고희성, 박상기, 박문호, "Butt-coupled DBR LD 제작 및 동작 특성", *한국광학회지*, 14권, 3호, p. 327, 2003.
- [8] 강명구, 오환술, "광 통신용 1.3  $\mu\text{m}$  DCPBH-DFB 레이저 다이오드 제작", *전기전자재료학회논문지*, 10권, 4호, p. 381, 1997.
- [9] T. Kunii, Y. Ogawa, H. Wada, T. Nonaka, and Y. Kawai, "Narrow-spectral-linewidth, high-output-power operation, and FM response characteristics in 1.5 $\mu\text{m}$  butt-jointed DBR lasers", *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. QE-27, No. 6, p. 1773, 1991.
- [10] H. S. Cho, D. H. Jang, J. K. Lee, K. H. Park, J. S. Kim, S. W. Lee, H. M. Kim, and H. Park, "High-performance strain-compensated multiple quantum well planar buried heterostructure laser diodes with low leakage current", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 35, No. 3, p. 1751, 1996.
- [11] 류정선, 윤영섭, "고출력 laser diode를 위한 AR, HR coating simulation에 관한 연구", *전기전자재료학회논문지*, 9권, 5호, p. 498, 1996.
- [12] Y. Matsui, T. Kunii, H. Horikawa, and T. Kamijoh, "Narrow-linewidth ( $< 200\text{KHz}$ ) operation of 1.5 $\mu\text{m}$  butt-jointed multiple-quantum-well distributed bragg reflector laser", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 3, No. 5, p. 424, 1991.
- [13] P. D. Wright, W. B. Joyce, and C. Craft, "Electrical derivative characteristics of InGaAsP buried heterostructure lasers", *J. Appl. Phys.*, Vol. 53, No. 3, p. 1364, 1982.
- [14] G. P. Agrawal and N. K. Dutta, "Semiconductor Lasers", Van Nostrand Reinhold, p. 193, 1993.
- [15] J. G. Simmons, B. B. Eleckrig, S. Smetona, B. Takasaki, and J. D. Evans, "Series resistance and its effect on the maximum output power of 1.5  $\mu\text{m}$  strained-layer multiple-quantum-well ridge waveguide InGaAsP lasers", *Proc. Optoelectronic and microelectronics materials devices '98*, p. 120, 1998.
- [16] E. C. Larkins, W. Benz, I. Esquivias, W. Rothmund, M. Baeumler, S. Weisser, A. Achonfelder, J. Fleissner, W. Jantz, J. Rosenzweig, and J. D. Ralston, "Improved performance form pseudomorphic InGaAs-GaAs MQW lasers with low growth temperature AlGaAs short-period superlattice cladding", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 7, No. 1, p. 16, 1995.