

# 저 전류 및 고 효율로 동작하는 양자 우물 매립형 butt-coupled sampled grating distributed bragg reflector laser diode 설계 및 제작

오수환<sup>†</sup> · 이철욱 · 김기수 · 고현성 · 박상기 · 박문호

한국전자통신연구원 반도체 원천기술연구소 광통신소자연구부

Ⓢ 305-350 대전시 유성구 가정동 161번지

## 이지면

순천대학교 금속재료 공학과

Ⓢ 540-742 전라남도 순천시 메곡동 315번지

(2004년 5월 6일 받음, 2004년 8월 2일 수정본 받음)

본 논문에서는 저 전류 및 고 효율로 동작하는 planar buried heterostructure(PBH) 구조로 sampled grating(SG) distributed bragg reflector(DBR) laser diode(LD)를 처음으로 설계하고 제작하였다. 특히 활성층과 도파로층의 높은 결합 효율을 얻기 위해 전식 식각과 습식 식각을 같이 사용하여 결합이 거의 없는 butt-coupling(BT) 계면을 형성하였다. 제작된 파장 가변레이저의 평균 발진 임계전류는 약 12 mA로 ridged waveguide(RWG) 와 buried ridge stripe(BRS) 구조로 제작된 결과 보다 두 배 정도 낮게 나타났으며, 광 출력은 200 mA에서 약 20 mW 정도로 RWG 와 BRS 보다 각각 9 mW, 13 mW 더 우수하게 나타났다. 그리고 파장 가변 영역을 측정된 결과 44 nm로 설계결과와 일치하였으며, 최대 파장 가변 영역 안에서 출력 변화 폭이 5 dB 이내로서 RWG 구조의 9 dB보다 출력변화 폭이 4 dB 적게 나타났다. 전체 파장 가변 영역에서 SMSR이 35 dB 이상으로 나타났다.

주제어 : semiconductor laser, tunable laser, sampled grating distributed bragg reflector laser diode, integrated laser.

## I. 서 론

파장 가변 레이저 다이오드는 광통신 네트워크를 구성하는데 있어서 고정 파장 레이저 다이오드에 비하여 상당한 이점을 제공한다. 즉, 파장 가변 레이저 다이오드를 활용하는 경우 네트워크 계획을 용이하게 하고, 백업용 광원의 수를 급격히 저감할 수 있으며, 동적으로 파장을 제공할 수 있을 뿐만 아니라 네트워크 제어 소프트웨어를 단순화 할 수 있다. 더구나, 파장 가변 레이저는 가입자 네트워크에서부터 메트로 네트워크, 장거리 네트워크에 이르기 까지 모든 응용 영역에서의 광 네트워크 개발 노력에 필수적인 것으로 인식되고 있다.<sup>[1-3]</sup>

다양한 응용영역에서 요구하는 사양을 동시에 만족시키기 위해서는, 고출력(>10 mW), C-band 전체에 대한 파장 가변(>32 nm), 신속한 파장 가변(<10 ns), 고속 직접 변조(>2.5 GHz), 고 신뢰성(>20 year MTTF(mean time-to-failure)) 및 대량 생산을 가능하게 하는 파장 가변 레이저 다이오드가 필요하다. 현재 다양한 형태의 파장 가변 레이저 다이오드가 존재하지만, 집적 광원 형태의 sampled grating(SG) distributed bragg reflector(DBR)-laser diode(LD)가 상기의 조건을 만족하는 유일한 소자로 인식되고 있다.<sup>[4,5]</sup> 이러한 SGDBR-LD는 활성층, 앞 SGDBR 영역, 뒤 SGDBR 영역과 위상제어영역

과 같이 4부분으로 집적되어 있는 소자로서 제작공정이 어렵다. 그래서 SGDBR-LD는 활성층과 도파로의 집적화가 간단한 2중 도파로 구조, 제작공정이 간단한 weakly index guided LD인 ridge waveguide(RWG)와 buried ridge stripe(BRS)로 제작되고 있다. weakly index guided LD는 저전류 및 고효율 동작이 어려우나<sup>[6]</sup>, BH(buried heterostructure)와 같은 strongly index guided LD는 저전류 및 고효율 동작이 가능한 반면 제작공정이 어렵다는 단점이 있다.<sup>[7]</sup> 따라서 본 논문에서는 저전류 및 고효율 동작이 가능한 PBH(planar buried heterostructure) 구조의 SGDBR-LD를 제작하고자 한다. 또한 활성층과 도파로층이 일직선으로 놓여 결합 효율이 높은 butt-coupled(BT) 방법<sup>[8]</sup>을 적용하여 고효율로 동작하는 광대역 파장가변 레이저를 제작하여 그 특성을 조사하고자 한다.

## II. 4전극 SGDBR-LD의 설계 및 제작

그림 1은 본 논문에서 제작하고자 하는 광대역 파장 가변 SGDBR-LD의 구조도를 나타내고 있다. 앞 SGDBR 영역(Front SGDBR section, I<sub>4</sub>), 활성층(Gain section, I<sub>3</sub>), 위상제어 영역(Phase control section, I<sub>2</sub>), 뒤 SGDBR 영역(Rear SGDBR section, I<sub>1</sub>)으로 구성되어 있으며, 각 영역의 길이는 500 μm, 300 μm, 150 μm, 500 μm로 이루어진 4전극 구조이다. 그리고, 활성층과 도파로층이 직접 집적되어 있는 BT 구조

<sup>†</sup> E-mail: osh@etri.re.kr

이다.

SGDBR-LD 구조를 제작하기에 앞서 간단한 설계를 해보았다. BT-SGDBR-LD의 최적화 설계를 위한 계략도를 그림 2에 나타내었다. 그리고 SG의 반사 피크간 주기는 다음 식으로 주어진다<sup>[9]</sup>.

$$p = \frac{\lambda^2}{2\mu_g Z_2} \quad (1)$$

여기서,  $\mu_g$ 는 군 굴절율이다. 앞 SG( $Z_2$ ) 주기와 뒤 SG( $Z_3$ ) 주기를 각각  $68 \mu\text{m}$ 와  $75 \mu\text{m}$ 로 설계하였다. 식 (1)에  $\mu_g=3.6$  와  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 를 대입하면  $Z_2$ 와  $Z_3$ 의 반사 피크 주기가 각각  $4.91 \text{ nm}$ 와  $4.45 \text{ nm}$ 가 된다.

스펙트럼 대역폭의 3-dB 폭에 포함되는 피크의 수는 다음 식에서 얻어진다.<sup>[9]</sup>

$$N_{3dB} \approx \text{int}\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right) \quad (2)$$

여기서  $\text{int}(x)$ 는 가장 큰 정수이다. SG burst( $Z_1$ )의 길이를  $7 \mu\text{m}$ 로 하면,  $Z_2$ 와  $Z_3$ 의  $N_{3dB}$ 는 각각 9개와 10개의 반사 피크를 얻을 수 있으며, 이것을 반사 피크 주기와 곱하면  $44 \text{ nm}$  정도의 파장 가변 영역을 얻을 수 있다.

BT-SGDBR-LD는 5번의 MOCVD 성장으로 제작하였다. 첫번째 성장은 n-InP 버퍼층과  $1.55 \mu\text{m}$  SCH MQW층을 성장하였다. 활성층은 0.7% 압축응력을 가진 우물층과 0.35% 인장응력을 가진 가둠층이 7쌍인 응력완화 MQW 활성층을 사

용하였다. 두번째 성장은 SGDBR영역을 위한 도파로층을 butt coupling 방법으로 성장하는 것으로, 먼저 사진 식각공정을 이용하여 활성층으로 사용할 부분에만 SiNx 마스크를 형성한 후 건식식각 공정으로 나머지 부분을 에칭하고 난 후 선택 습식식각 공정으로 마무리 하였다. 이렇게 에칭한 후 도파로층인  $1.3 \mu\text{m}$  InGaAsP층을  $3000 \text{ \AA}$  성장하였다. 그림 3에 성장된 BT 부분의 SEM 단면 사진을 나타내었다. 그림 3에서 알 수 있듯이 성장된 계면에서 어떠한 결함 등을 관찰할 수 없는 아주 이상적으로 성장 되었음을 확인하였다. 이러한 BT 계면의 결합효율을 측정할 결과 96%이상의 아주 우수한 결과를 얻었다<sup>[10]</sup>.

이와 같이 형성된 도파로 위에 holographic lithography 공정으로 grating을 형성한 후 InP 층을 성장하였으며 그림 4에 sampled grating(SG) 영역의 SEM 단면 사진을 나타내었다. Grating 주기는  $240 \text{ nm}$ , 깊이는  $500 \text{ \AA}$ 이다.

p-n-p 전류 차단층을 가지는 PBH-LD 구조를 만들기 위해  $3 \mu\text{m}$  마스크를 형성한 후 두번의 습식 식각공정을 통해 메사 형태를 만들고<sup>[11]</sup>, p-InP( $N_d=7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) 층과 n-InP( $N_a=1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) 층 그리고 p-InP( $N_d=7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) 층을 성장하였다. 마지막으로 SiNx 마스크를 제거한 후 p-InP 클래드 층과 p-InGaAs( $N_d=5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) 오믹 층을 성장하였다. 이렇게 제작된 LD의 활성층과 SGDBR영역의 SEM사진을 그림 5에 각각 나타내었으며, 활성층과 도파로층의 폭은 기본 모드 동작 조건에 맞게  $1 \mu\text{m}$  이내로 되었음을 알 수 있다.

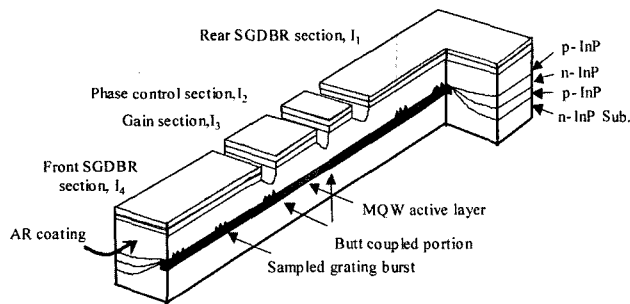


그림 1. SGDBR-LD의 구조도

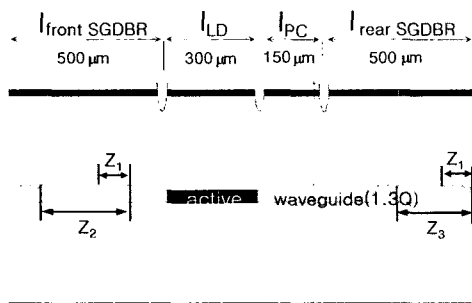


그림 2. BT-SGDBR-LD의 최적화 설계를 위한 계략도.

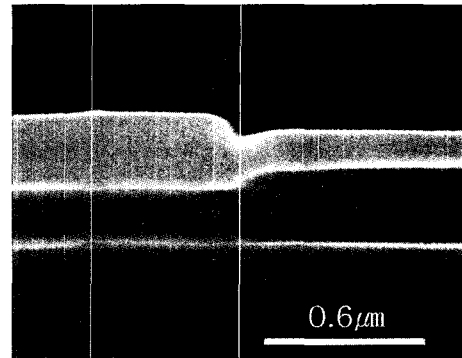


그림 3. BT 영역의 SEM단면 사진.

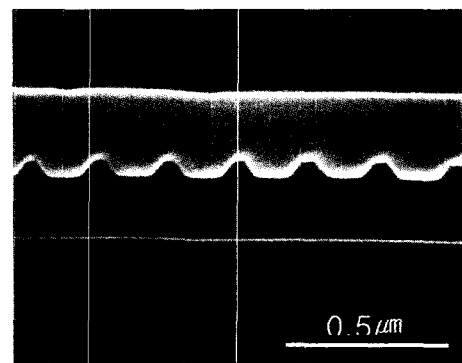


그림 4. SG 영역의 SEM단면 사진.

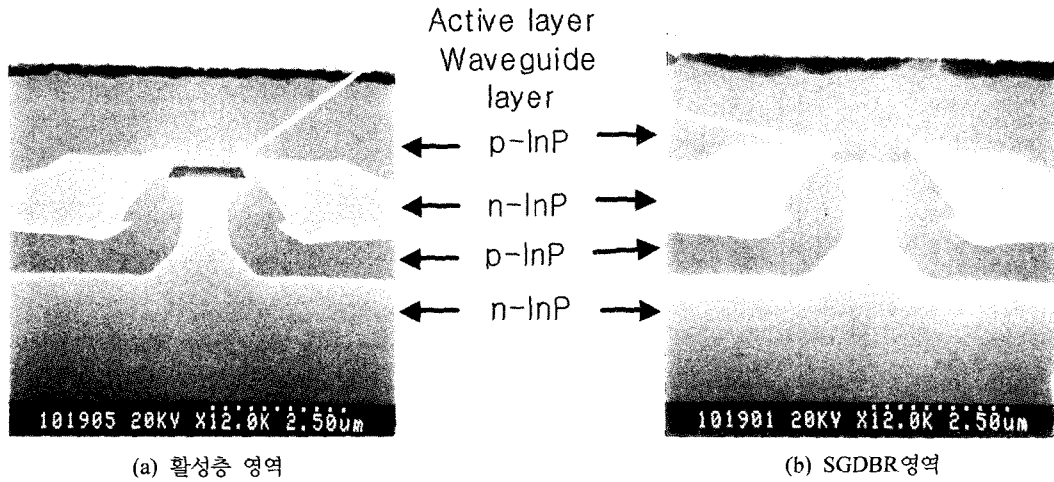


그림 5. 활성층과 SGDBR 영역의 단면사진.

### III. 파장 가변 동작 특성

제작된 BT-SGDBR-LD의 I-L-V 특성을 그림 6에 나타내었으며, 출사 계면에만 무반사 코팅을 하였다. 활성층에만 연속 전류를 인가하여 I-L-V 특성을 측정하였다. 평균 발진 임계전류와 임계전압은 각각 약 12 mA와 0.8V이고, 그리고 200 mA에서 광 출력이 약 20 mW 정도로 나타났다. 임계전류의 경우 RWG와 BRS 구조로 제작된 결과인 17.8 mA<sup>[12]</sup>와 20 mA<sup>[13]</sup>의 두배 정도 낮게 나타났으며, 광출력은 각각 9mW, 13mW 더 우수하게 나타났다. 그리고 제작된 LD는 전체 주입전류 영역에서 안정된 단일 모드로 동작함을 확인하였다.

SGDBR-LD의 경우, 앞 SGDBR 영역과 뒤 SGDBR 영역의 grating 주기가 다르기 때문에 각 SGDBR 영역을 통과하는 빛은 grating 주기에 따라 모드 간격이 달라진다. 이러한 모드 간격을 확인하기 위해 임계 발진 전류 이하에서 자연방출

광의 스펙트럼을 측정하여야 한다. 그림 7에 SGDBR-LD의 발진 임계전류 이하에서 자연방출광의 스펙트럼을 나타내었다. 이러한 모드 특성을 측정하기 위해 활성층에 주입전류를 발진 임계 전류 이하인 8.5 mA로 하여 스펙트럼을 측정하였다. 측정된 자연 방출광 스펙트럼은 앞의 SGDBR 영역을 통과하여 출사 계면을 투과하여 나오는 것과, 뒤 부분의 SGDBR 영역을 통과하여 뒤 벽 계면에서 반사되어 나오는 빛으로 구분되며 그림 7에서 4.9 nm의 피크 간격을 가지는 것과 4.5 nm의 피크 간격을 가지는 것으로 각각 구분된다. 이러한 결과는 앞의 장에서 설계한 결과인 4.91 nm, 4.45 nm와 거의 일치하였다. 그리고 측정된 스펙트럼에서 앞 SGDBR 모드와 뒤 SGDBR 모드가 일치하는 모드는 나타나지 않았으며, 각각의 모드가 명확하게 나타났다.

SGDBR-LD의 스펙트럼 대역폭의 3-dB 폭에 포함되는 피크의 수를 확인하기 위해서 활성층에 80 mA의 전류를 인가해 놓고, 각 SGDBR 영역에만 전류를 60 mA 식 가변 시켜

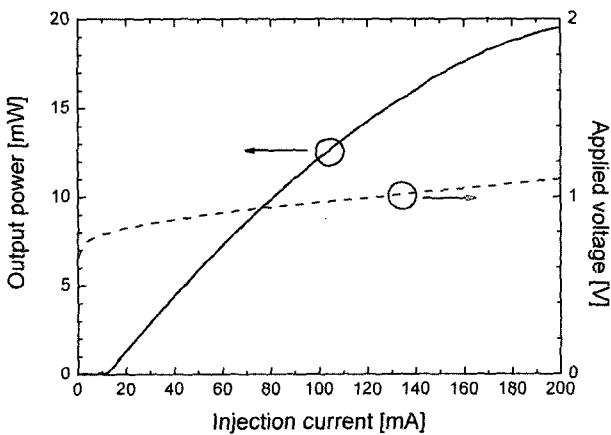


그림 6. BT-SGDBR-LD의 I-L-V 특성.

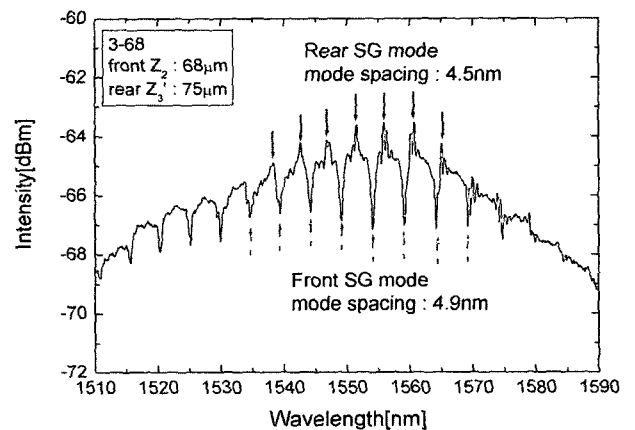


그림 7. BT-SGDBR-LD의 임계 전류 이하에서 자연 방출 스펙트럼

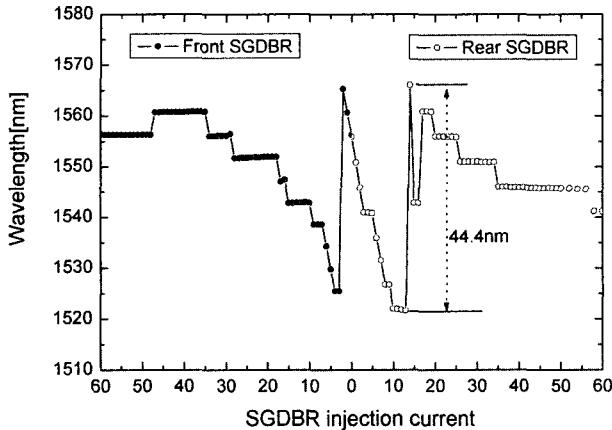


그림 8. 각 SGDBR 영역의 주입전류에 의한 파장 가변 특성.

그 결과를 그림 8에 나타내었다. 앞과 뒤 SGDBR 영역에 전류를 주입한 결과 각각 10개의 피크 수를 얻었으며, 설계된 결과인 9개 10개와 거의 같게 나타났다. 그리고 파장 가변 폭이 44.4 nm로 설계 결과인 45 nm와 일치하였다. 이러한 결과로 볼 때, 설계결과와 제작결과가 거의 일치함을 확인할 수 있었다.

또한 활성층의 인가전류는 80 mA로 고정해 놓고, 각 SGDBR 영역 및 위상제어 영역에 전류를 인가하면서 파장 가변 특성을 조사한 결과를 그림 9 (a)에 나타내었다. 파장 가변 폭이 45.6 nm로 나타났으며, SMSR비가 40 dB 이상으로 우수하게 나타났다. 각각 파장이 0dBm 이상의 출력을 나타냈으며, 출력 변화 폭이 5dB 이내로 나타났다. 이러한 결과는 RWG 구조로 제작된 결과인 9dB<sup>[12]</sup>보다 4 dB 우수하게 나타났으며, PBH 구조로 제작된 SGDBR-LD의 출력변화 폭이 다른 구조로 제작된 것보다 우수하다는 것이 증명되었다. 그림 9 (b)에 (a)와 같은 방법을 이용하여 주파수 간격이 50 GHz인 25개의 WDM 채널을 나타내었으며, 35 dB 이상의 SMSR 특성을 나타내었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 PBH 구조를 이용하여 기존의 RWG 및 BRS 구조로 제작된 SGDBR-LD보다 저전류 동작 및 고효율 동작 특성을 가지는 SGDBR-LD를 제작하였다. 제작된 파장 가변레이저의 I-L-V 특성을 측정한 결과 평균 발진 임계전류와 임계전압은 각각 약 12 mA와 0.8V이고, 그리고 200 mA에서 광 출력이 약 20 mW 정도로 나타났다. 이러한 결과는 임계전류는 RWG나 BRS 구조보다 약 2배 정도 낮게 나타났으며, 또한 광 출력이 9~13 mW 더 높게 나타났다. 그리고 발진 임계전류 이하에서 자연방출광의 스펙트럼을 측정한 결과, SG의 피크 간격이 각각 4.91 nm, 4.45 nm로 설계값과 거의 일치함을 확인하였다. 또한 제작된 BT-SGDBR-LD의 최대 파장 가변 폭이 45.6 nm, SMSR비가 35 dB 이상으로 우수하게 나타났으며, 모든 파장이 0 dBm 이상의 출력을 나

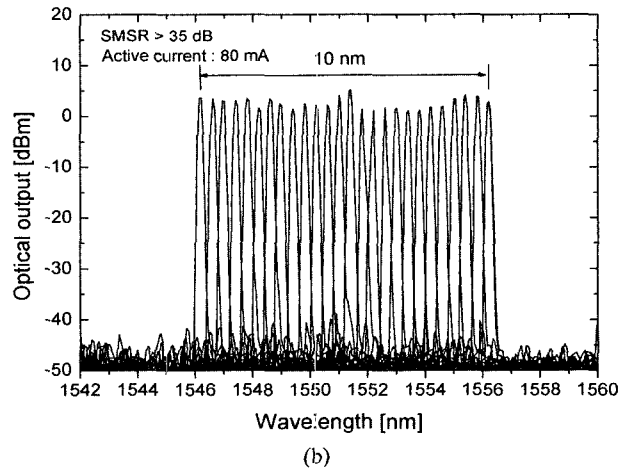
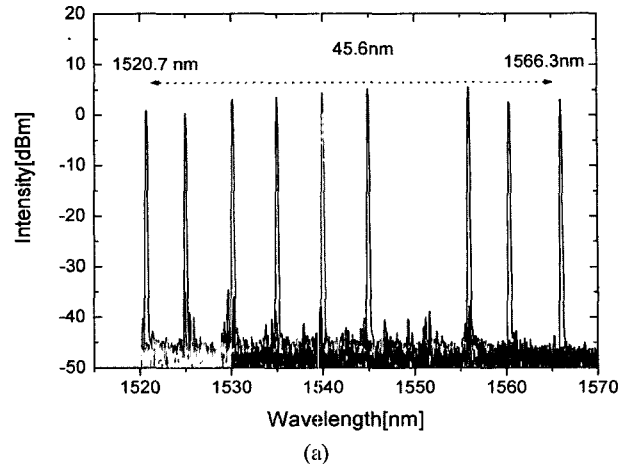


그림 9. (a) SGDBR-LD의 주입전류에 따른 파장 가변 특성, (b) 주파수 간격이 50 GHz인 25개 WDM 채널의 스펙트럼 특성 및 SMSR 특성.

타냈으며, 출력 변화 폭이 5 dB 이내로서 다른 구조보다 출력 변화 폭이 적은 우수한 특성을 나타냈다.

참고문헌

[1] B. Mason, S.-L. Lee, M.E. Heimbuch, and L. A. Coldren, "Directly modulated sampled grating DBR lasers for long-haul WDM communications systems," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, no.3, pp. 377-379, 1997

[2] P.J.Williams, D. J. Robbins, F. O. Robson, N. D. Whitbread, "High power and wide quasi-continuous tuning, surface ridge SG-DBR lasers," *Proceedings of ECOC'2000, Munich, Germany*, Sept. 2000.

[3] B. Mason, G. A. Fish, S. Denbaars, and L. A. Coldren, "Widely tunable sampled grating DBR laser with integrated electro-absorption modulator," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 6, pp. 638-640, 1999.

[4] Coldren, L. A., Jan, Y. H., Mason, T. B., Heimbuch, M.E., DenBaars, S. P., "Properties of widely-tunable integrated

- WDM sources and receivers," *LEOS'97*, pp. 331-332, vol. 1, vol. 2.
- [5] Delorme, F., Terol, G., de Bailliencourt, H., Grosmarie, S., Devoldere, P., "Long-term wavelength stability of 1.55- $\mu\text{m}$  tunable distributed bragg reflector lasers," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 5, (no. 3), pp. 480-486, 1999.
- [6] I. P. Kaminow, R. E. Nahory, L. W. Stulz, and J. C. Dewinter, "Performance of an improved InGaAsP ridge waveguide laser at 1.3  $\mu\text{m}$ ," *Electron. Lett.*, vol. 17, pp. 318-320, 1981.
- [7] J. K. Butler, "Theory of transverse cavity mode selection in homojunction and hetrojunction semiconductor laser," *J. Appl. Phys.*, vol. 42, pp. 4447-4457, 1971.
- [8] B. Stoltz, M. Dasler, and O. Sahlen, "Low threshold-current wide tuning-range, butt-joint DBR laser with four MOVPE steps." *Electron. Lett.*, vol. 29, pp. 700-702, 1993.
- [9] Vijaysekhar Jayaraman, Zuon-Min Chuang, and Larry A. Coldren, "They, design and performance of extended tuning range semiconductor lasers with sampled gratings." *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 6, pp. 1824-1834, 1993.
- [10] Su Hwan Oh, Chul-Wook Lee, Ji-Myon Lee, Ki Soo Kim, Hyunsung Ko, and Moon Ho Park, "Fabrication and lasing characteristics of tunable integrated-twin-guide distributed bragg reflector laser diode and butt coupled distributed bragg reflector laser diode," *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 42, pp. S591-S596, 2003.
- [11] Ho Sung Cho, Dong Hoon Jang, Jung Kee Lee, Kyung Hyun Park, Jeong Soo Kim, Seung Won Lee, Hong Man Kim and Hyung-Moo 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, pp. 1751-1757, 1996.
- [12] Beck Mason, Greg A. Fish, Steven P. DenBaars, and Larry A. Coldren, "Ridge waveguide sampled grating DBR lasers with 22-nm quasi-continuous tuning range." *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 9, pp. 1211-1213, 1998.
- [13] Beck Mason, Jonathon Bartan, Greg A. Fish, Larry A. Coldren, and Steven P. DenBaars, "Design of sampled grating DBR lasers with integrated semiconductor optical amplifiers." *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, no.7, pp. 762-764, 2000.

## Design and Fabrication of butt-coupled(BT) sampled grating(SG) distributed bragg reflector(DBR) laser diode(LD) using planar buried heterosture(PBH)

Su Hwan Oh<sup>†</sup>, Chul-Wook Lee, Ki Soo Kim, Hyunsung Ko, Sahnggi Park, and Moon-Ho Park

*Electronics and Telecommunications Research Institute, 161 Kajung-dong, Yusong-gu, Taejon 305-350, Korea*

<sup>†</sup>E-mail: osh@etri.re.kr

Ji-Myon Lee

*Dept. of Materials Sci. and Metallurgical Eng, Sunchon National University, 315 Maegok-dong,  
Sunchon-si, Chonnam 540-742, Korea*

(Received May 6, 2004, Revised manuscript August 2, 2004)

We have fabricated and designed wavelength-tunable sampled grating distributed Bragg reflector laser diodes(SGDBR-LD) by using, for the first time, planar buried heterostructures(PBH). The diodes have low threshold current values and high-performance of laser operation. Growth condition using metal organic chemical vapor deposition(MOCVD) was optimized for the formation of a good butt-coupling at the interface. A maximum output power of the fabricated device was 20 mW under 200 mA continuous wave(CW) operation at 25°C. Average threshold current and voltage were 12 mA and 0.8 V, approximately. This output power is higher than those of ridge waveguide(RWG) and buried ridge stripe(BRS) structures by amounts of 9 mW and 13 mW, respectively. We obtained a tuning range of 44.4nm which is well matched with the target value of our design. The side mode suppression ratio of more than 35 dB was obtained for the whole tuning range. Optical output power variation was less than 5 dB, which is 4 dB smaller than that of RWG structures.

OCIS Codes : 250.0250, 250.3140, 250.5300, 140.3600, 140.5960.