

## Buried-Ridge Waveguide Laser Diode 제작 및 특성평가

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

한국전자통신연구원, 광통신소자 연구부

Ⓣ 305-350, 대전시 유성구 가정동 161번지

(2003년 8월 12일 받음, 2003년 10월 20일 수정본 받음)

본 연구에서는 기존의 ridge waveguide laser diode(RWG LD)보다 ridge폭에 따른 측방향 단일모드 특성이 우수하고 planar 화에 유리하며 측방향의 유효 굴절률차를 ridge 구조에 추가로 성장된 InGaAsP층의 두께로 조절이 가능한 Buried RWG LD를 제작하였다. 본 연구에서는 Buried RWG LD를 CBE장치로 InGaAs/InGaAsP multiple quantum well(MQW) 에피 웨이퍼를 성장하고, LPE로 재성장하여 B-RWG LD를 제작하였다. 또한 ridge 폭을 5 μm와 7 μm로 하여 B-RWG LD를 제작하고 특성을 비교하여 보았다. 제작된 7 μm B-RWG LD에서 광출력이 20mW에 이를 때까지 고차모드 발진에 의한 kink현상이 일어나지 않았으며, 포화 광출력이 80 mW 이상임을 확인하였다. 제작된 B-RWG LD가 측방향 단일모드로 동작함을 확인하기 위해 FFP를 측정 한 결과, ridge 폭이 5 μm일 때는 2.7I<sub>th</sub>, ridge 폭이 7 μm일 때는 2.4I<sub>th</sub>까지 단일모드로 동작함을 확인할 수 있다.

주제어 : InP, semiconductor laser, buried ridge waveguide laser diode.

### I. 서 론

ridge waveguide(RWG) 구조는 LD 제작시 buried heterostructure (BH)구조에 비해 재성장 공정없이 식각 및 에칭공정만으로도 구현 가능하므로 공정이 간단하고 이로 인해 저가격의 소자를 제작할 수 있는 장점이 있다. 또한 넓은 광분포로 인해 높은 광출력시 COD 레벨이 높기 때문에 펄핑용 광원으로 사용되며, 작은 기생성분으로 인해 High speed용 소자로 사용될 수 있다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 RWG 구조는 측방향 반송자 누설(lateral carrier leakage)로 인한 높은 발진개시 전류와 엄격한 측방향 단일모드 조건으로 인해 소자의 활용성이 제약받고 있다. 측방향 단일모드 동작 및 낮은 발진개시 전류를 위해서는 ridge 폭을 2~3 μm로 하는 것이 좋은 것으로 알려져 있지만<sup>[1,2]</sup> 사진식각(photolithography)공정으로 window open후 전극 증착이 어렵기 때문에 3 μm 이하의 RWG-LD 제작이 어려우며, 제작을 하더라도 제작된 LD의 수율(yield)이 낮은 한편, ridge 외부 영역을 굴절율이 공기에 비해 다소 큰 polyimide를 채워서 LD를 제작하게 되면 측방향 단일모드 조건이 완화되어 3~4 μm에서도 단일모드 동작 가능하며 동시에 metal contact 시 ridge 의 큰 단차로 인한 step coverage 문제를 해결할 수 있다.<sup>[3,4]</sup> 그러나 이러한 방법은 추가적인 polyimide 공정이 필요하며, 후속공정에서 세심한 공정조건이 필요하게 된다. 본 논문에서는 ridge 구조의 단점을 보완 할 수 있는 buried ridge waveguide(B-RWG) LD를 제작하였다. 본 구조에 대한 제안 및 세부 설계 내용은 참고 문헌 [5]에 나타내었으며, ridge 내 추가로 성장된 InGaAsP 층의 두께를 적절히 조절해서 6~9 μm의 Ridge 폭에서도 단일모드로 동작 하는 LD 제작이 가능함을 보여 주고 있다. 본 제작에서는 이

러한 설계된 값을 이용하여 CBE장치로<sup>[6,7]</sup> InGaAs/InGaAsP MQW 웨이퍼를 성장하고, 사진식각공정과 습식식각공정을 통하여 ridge를 형성한 후 LPE로 ridge 외부 영역에 InP층을 재성장하여 B-RWG LD를 제작하였다. 또한 제작된 B-RWG LD의 측방향 단일 모드로 동작 가능한 ridge 폭을 확인하기 위해 각각 5 μm와 7 μm로 하였다. 본 논문의 구성은 2장에서는 B-RWG LD 제작에 관하여 기술하였으며, 3장에서는 전기 광학적 특성에 관해서 약술하였으며, 4장에서는 연구결과를 기술하였다.

### II. B-RWG LD 제작

그림 1은 본 논문에서 제작하고자 하는 B-RWG LD의 구조를 나타낸다. 일반적인 RWG LD는 ridge 영역 밖이 공기 또는 polyimide로 채워져 있는 구조이지만, 본 구조는 InP로 채워놓고 측방향 굴절률은 ridge 영역의 InGaAsP 제어층의 두께로 조절하는 구조이다.

B-RWG LD를 제작하기 위하여 MQW 에피층을 성장시켜야 하는데, 본 연구에서는 MQW 에피층 성장을 CBE로 행하였다. 성장온도를 500°C, 성장웨이퍼의 회전속도를 17 rpm으로 하였다. Triethyl Gallium[Ga(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>3</sub>] 또는 Trimethyl Indium [In(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>]과 같은 금속유기물과 AsH<sub>3</sub>, PH<sub>3</sub> 가스와의 화학반응을 이용하여 InP, InGaAsP, InGaAs 화합물을 성장시켰다. 또한 dopant로는 n형은 solid Si를 사용하였고, p형은 solid Be를 사용하였다.

B-RWG-LD의 에피층 구조는 참고문헌 [5]의 최적화 설계 결과인 그림 4의 결과에서 얻었다. 그림 4의 결과에서 p-InP 잔류 클래드층(d<sub>3</sub>)을 0.15 μm로 할 경우, 측방향 단일모드 동작을 위해 유효굴절률차를 0.01 이상을 유지하기 위하여서는 InGaAsP(d<sub>2</sub>)층을 900Å 이상으로 하여야 하므로 1000Å 성장

<sup>†</sup>E-mail: osh@kriss.re.kr

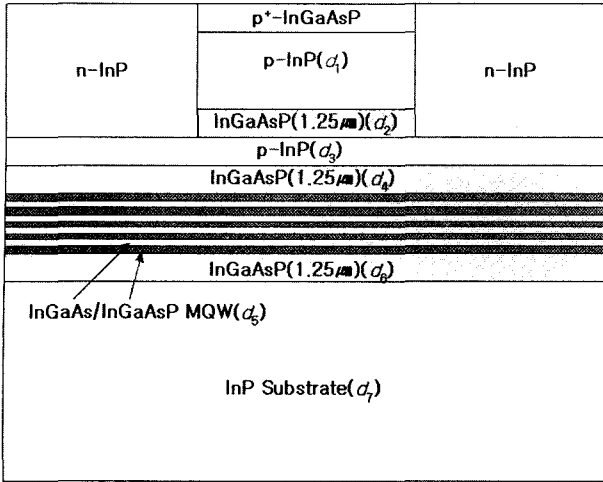


그림 1. Buried Ridge Waveguide LD의 구조.

표 1. 설계 파라메타 값

층	두께 (μm)	굴절률	층구조	
x  ≤ w/2	d <sub>1</sub>	1.5	3.17	p-InP
	d <sub>2</sub>	0.1	3.37	InGaAsP (1.25 μm)
x  > w/2	d <sub>1</sub>	1.5	3.17	n-InP
	d <sub>3</sub>	0.15	3.17	p-InP
d <sub>4</sub> (=d <sub>6</sub> )	0.1	3.37	InGaAsP (λ <sub>g</sub> = 1.25 μm)	
d <sub>5</sub>	0.1	3.56	well	InGaAs(1.55 μm)
		3.37	barrier	InGaAsP(1.25 μm)
d <sub>7</sub>	>>10	3.17	n-InP	

시켰다. 성장된 에피층 구조를 표 1에 나타내었으며, 활성층은 격자정합된 InGaAs well 층과 InGaAsP(λ = 1.25 μm)층을 각각 70Å, 100Å으로 5쌍 성장시켰다. 그리고 d<sub>1</sub>층인 p-InP층을 1.2 μm로 하였으며, LPE로 재성장할 경우 melt back 현상을 방지하기 위하여 오음접촉층인 p-InGaAsP(λ = 1.3 μm)층은 0.2 μm로 하였다. d<sub>1</sub>층, d<sub>2</sub>층, 그리고 d<sub>3</sub>층의 도핑농도는 7 × 10<sup>17</sup>/cm<sup>3</sup>로 하였으며, 오음접촉층의 도핑농도는 5 × 10<sup>18</sup>/cm<sup>3</sup>로 하였다. 도파로층 및 활성층은 도핑을 하지 않았다.

성장된 에피 웨이퍼의 활성층 영역을 확대한 TEM 사진이 그림 2에 나타나 있다. 그림으로부터 InGaAs층이 70Å, InGaAsP이 100Å 성장되었음을 확인할 수 있다. 그리고 성장된 에피 웨이퍼의 격자 부정합도 및 상온 광여기 특성을 측정 한 결과 에피 웨이퍼의 격자 부정합도는 0.02% 이내이며, 중심파장은 15605.8Å이다.

그림 2와 같이 성장된 웨이퍼에 사진 식각공정을 통해 5 μm 와 7 μm의 stripe 폭을 가지는 SiN<sub>x</sub> 마스크를 형성한 후 p-InGaAsP층은 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>O를 3:1:1의 용액으로 30초간 에칭하였으며, p-InP층은 HCl:H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>를 1:4의 용액으로 3분간 에칭하였다. 그리고 1.25 μm InGaAsP층은 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>O를 3:1:1의 용액으로 30초간 에칭하였다. 이렇게 에칭된 웨이퍼를 이용하여, LPE로 2차 재성장하여 B-RWG LD를 제작하였다. LPE로 2차 재성장을 할 경우 에칭된 ridge 계면의 열

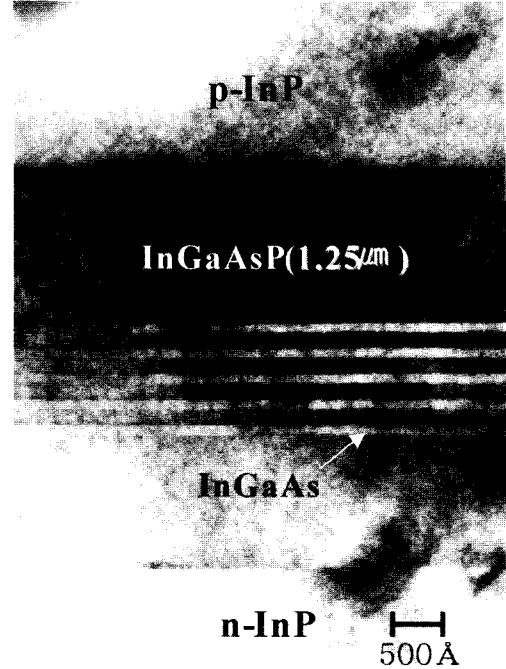


그림 2. CBE법에 의해 성장된 에피 웨이퍼의 TEM 사진.

손상을 줄여주기 위하여 600°C에서 성장을 시작하였으며, 0.2 μm/min의 성장률로 7분간 전류차단층을 1.4 μm 성장하였다. 또한 n-InP 전류차단층을 성장시킨 후 냉각시킬 경우 성장층의 열 손상이 발생할 수 있으므로, InGaAs층을 성장한 후 냉각시켰다. 그리고 n-InP층의 도핑은 Te/In alloy를 사용하였으며, 도핑농도는 2 × 10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup>로 하였다. 이렇게 성장된 웨이퍼에서 ridge 영역에 있는 SiN<sub>x</sub> 마스크를 제거한 후 LD로 제작하기 위하여 웨이퍼 표면의 In-drop을 mercury chloride : dimethylformamide = 100g:472.5 ml 용액으로 제거한 후,<sup>18)</sup> 웨이퍼의 p측 전극으로 Ti(300Å)/Pt(200Å)/Au(4000Å)을 E-beam 증착기로 증착시켰다. 이렇게 형성된 p측 전극은 RTA(Rapid Thermal

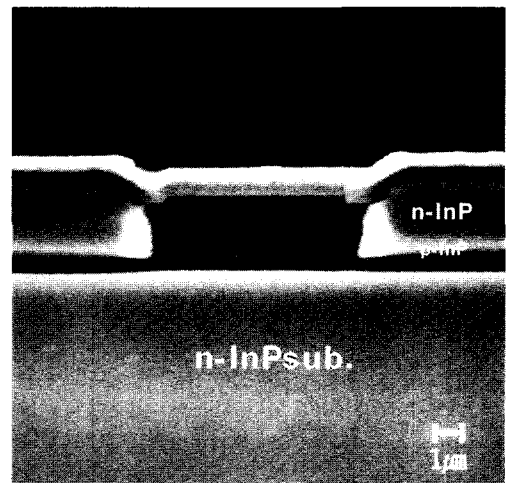


그림 3. 제작된 B-RWG LD의 SEM단면사진.

Annealing)장치에서 425°C로 30초간 열처리하였으며, 이 때 사용된 분위기 가스는 10% H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>이다.

n층 전극은 Cr(500Å)/Au(5000Å)을 E-beam 증착기를 사용하여 증착시켰으며, 400°C에서 30초간 열처리하여 모든 공정을 완료하였다.

이와 같은 방법으로 B-RWG LD를 제작하였으며, 제작된 LD의 단면 사진을 그림 3에 나타내었다.

### III. B-RWG LD의 전기 · 광학적 특성

제작된 B-RWG LD의 전기적 특성을 대표하는 I-V특성을 그림 4에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 순방향 임계전압이 1.1V였고, 역방향 항복전압은 -5.2V로 나타났으며, 직렬 저항이 6Ω으로 나타났다. 본 논문에서 제작된 B-RWG LD의 직렬저항이 일반적인 RWG LD의 직렬저항[3~4Ω]보다 다소 높은 이유는 오음접촉층으로 사용된 p<sup>+</sup>-InGaAsP층의 경우가 p<sup>+</sup>-InGaAs층에 비해 도핑 농도가 낮고 밴드갭 에너지가 커서 접촉저항이 증가한 것으로 추측된다.

LD의 I-L 측정을 위한 실험에서는 Joule열에 의한 광출력의 저하를 방지하기 위하여 펄스 주기 1 ms, 펄스 폭 10 μs인 1%의 duty cycle을 사용하여 발진실험을 수행하였다. 제작된 B-RWG LD의 최대 광출력을 측정하여 보았는데, 그 결과가 그

림 5에 나타나 있다. 측정된 LD의 공진기 길이는 900 μm, ridge 폭이 7 μm였으며, 출사면에 코팅은 하지 않았다. 그림에서 보는바와 같이 광출력이 20 mW에 이를 때까지 고차모드 발진에 의한 kink현상이<sup>[9]</sup> 일어나지 않았으며, 약 80 mW까지는 높은 광출력을 얻을 수 있었다. 그러나, 높은 주입전류에서 광출력의 포화가 발생하고 있으며, 이는 주입전류 증가에 따른 활성층내 측방향 반송자 확산(lateral carrier diffusion)의 증가가 주 원인이며,<sup>[10]</sup> 본 소자의 높은 직렬저항은 반송자 확산을 증가시킨다.<sup>[4]</sup>

제작된 B-RWG LD가 측방향으로 단일모드로 동작 유무를 확인하기 위해 FFP를 측정하여 보았다. 그림 6에 제작된 B-RWG LD의 수평방향 FFP를 나타내고 있다. 그림 (a)와 (b)는 각각 ridge 폭이 5 μm, 7 μm의 B-RWG LD의 FFP 측정 결과이다. ridge 폭이 5 μm일 때 전류를 2.7I<sub>th</sub>, 7 μm일 때는 2.4I<sub>th</sub>까지 주입하면서 측정한 결과 측방향 단일 모드로 동작함을 알 수 있다. 측정된 FFP의 FWHM이 ridge 폭이 5 μm에서는 10.2°, 7 μm에서는 9.2°로 ridge 폭이 큰 7 μm에서 1° 작게 나타났다. 그리고 ridge 폭이 증가하는 경우에는 빔 크기가 증가하여 FFP의 FWHM이 감소하게 되는데, 이것은 그림 6의 결과와도 일치하는 현상이다.

수직방향의 FFP를 측정한 결과는 그림 7에 나타나 있다. 그림으로부터 FWHM은 ridge 폭이 5 μm에서 22.4°, 7 μm에서는 19.2°로 ridge 폭이 클수록 작게 나타났다.

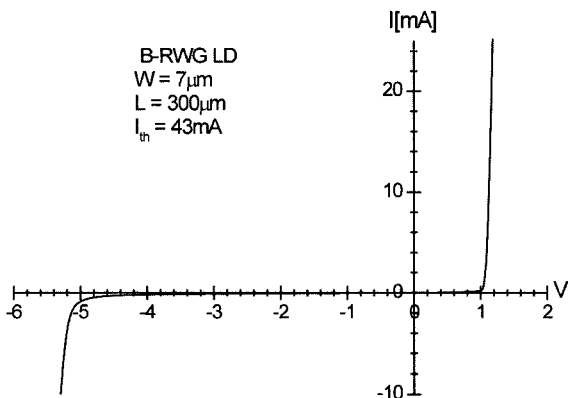


그림 4. 제작된 B-RWG LD의 I-V특성.

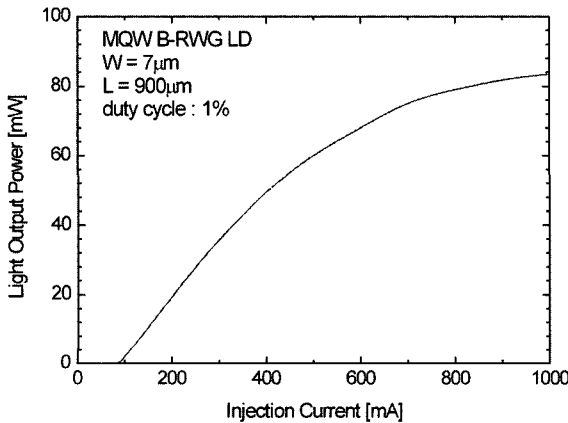


그림 5. 제작된 B-RWG LD의 광 출력 특성.

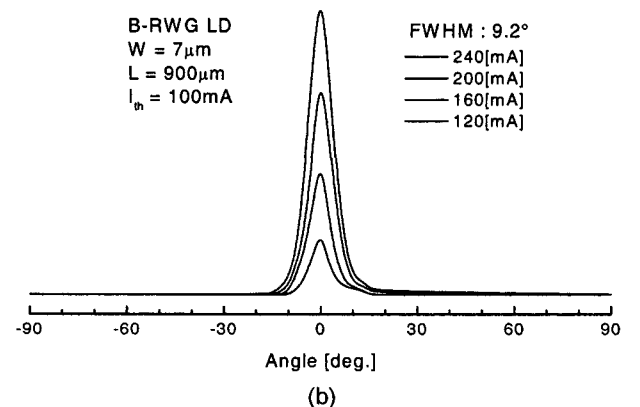
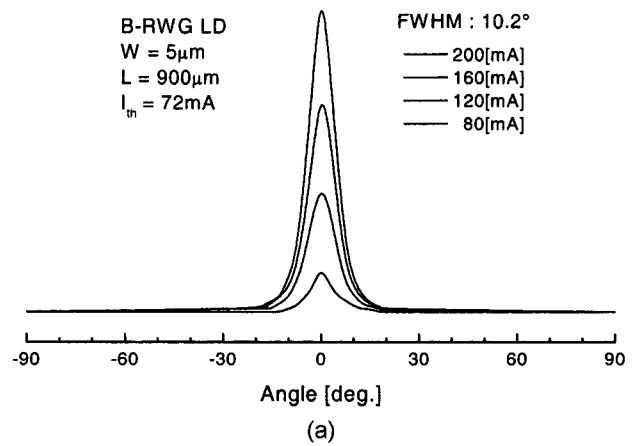


그림 6. B-RWG LD의 수평방향 far field pattern.

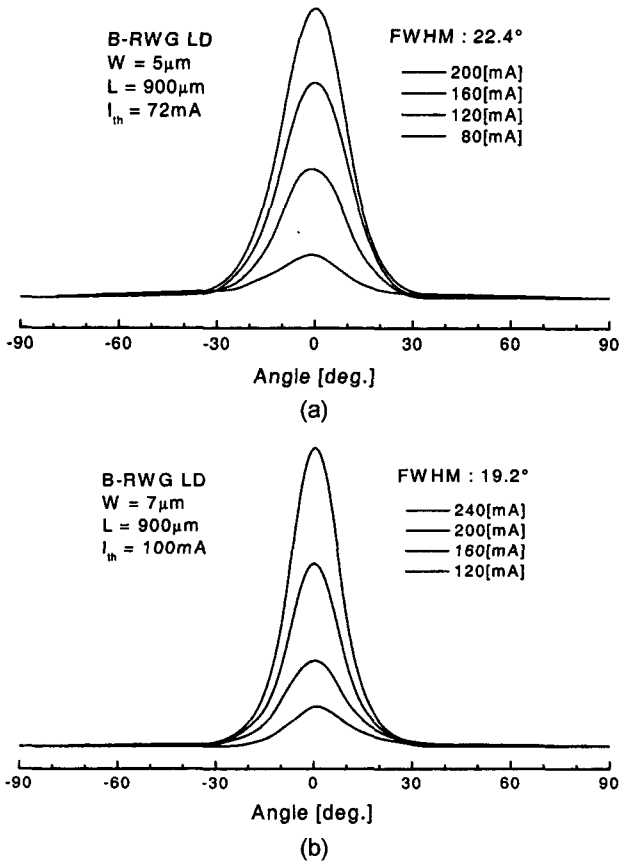


그림 7. MQW B-RWG LD의 수직방향 far field pattern.

이상의 결과로부터 본 연구에서 최적 설계하고 제작한 B-RWG LD가 설계결과와 같이 측방향에서 단일모드로 동작함을 확인하였다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 최적화 설계된 값을 이용하여 CBE장치로 InGaAs/InGaAsP MQW 에피층을 성장하고, 성장된 에피층을 사진식각 공정을 통해 화학 에칭으로 ridge 모양을 형성하였다. LPE로 2차 성장만으로 B-RWG LD를 제작하여 그 특성을 비교 분석하였다. 또한 ridge 폭을 5 μm와 7 μm로 하여 제작된 B-RWG LD를 제작하고 특성을 비교하여 보았다.

제작된 LD의 I-V특성을 측정한 결과, 순방향 임계전압이 1.1V였고 역방향 항복전압은 -5.2V로 나타났다. 제작된 7 μm B-RWG LD에서 광출력이 20 mW에 이를 때까지 고차모드 발진에 의한 kink현상이 일어나지 않았으며, 포화 광출력이 80 mW 이상임을 확인하였다.

제작된 B-RWG LD가 측방향 단일모드로 동작함을 확인하기 위해 FFP을 측정한 결과, ridge 폭이 5 μm일 때는 2.7I<sub>th</sub>,

ridge 폭이 7 μm일 때는 2.4I<sub>th</sub>까지 단일모드로 동작함을 확인하였다. 따라서, B-RWG 구조는 측방향 단일모드를 얻기 위한 ridge 폭이 넓으므로, 소자의 제작 수율을 향상시키고, 향후 펌핑용 소자, 고속 및 집적화 소자에 많이 활용 되리가 생각된다.

#### 감사의 글

본 연구에 대해 조언과 격려를 아끼지 않으셨던 한국해양대학교 전자 정보 공학부 홍창희 교수님께 감사를 드리며 고인의 명복을 빕니다.

#### 참고문헌

- [1] N. Matsumoto, T. Fukushima, H. Nakayama, Y. Ikegami, T. Namegaya, A. Kasukawa and M. Shibata, *Tech. Dig. ECOC '93*, Montreux, Switzerland, ThP 11.5, 1993.
- [2] K. Prosyk, J. G. Simmons, "Well Number, Length, and Temperature Dependence of Efficiency and Loss in InGaAsP-InP Compressively Strained MQW Ridge Waveguide Lasers at 1.3 μm," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 33, no. 8, pp. 1360-1368, 1997.
- [3] M. Aoki, M. Komori, T. Tsuchiya, H. Sato, K. Uomi and T. Ohtoshi, "High performance InGaAsP/InP strained layer MQW lasers with reversed-mesa ridge waveguide structures," *Electron. Lett.*, vol. 31, no. 12, pp. 973-975, 1995.
- [4] M. Aoki, T. Tsuchiya, K. Nakahara, M. Komori and K. Uomi, "High-Power and Wide Temperature-Range Operation of InGaAsP-InP Strained MQW Lasers with Reverse-Mesa Ridge-Waveguide Structure," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, no. 1, pp. 13-15, 1995.
- [5] 황상구, 오수환, 김정호, 김운섭, 김동욱, 하홍춘, 홍창희 "MQW Buried RWG LD 최적화 설계" 한국광학회지, 제 12권 4호, pp. 312-319, 2001.
- [6] W. T. Tsang, "Progress in Chemical Beam Epitaxy," *J. Crystal Growth.*, vol. 105, pp. 1-29, 1990.
- [7] W. T. Tsang, R. Kapre and P. F. Sciortino, Jr., "In-situ dry etching of InP using phosphorus trichloride and regrowth inside a chemical beam epitaxial growth chamber," *J. Crystal Growth.*, vol. 136, pp. 42-49, 1994.
- [8] W. Y. Lum and A. R. Clawson, "Thermal degradation of InP and its control in LPE growth," *J. Appl. Phys.*, vol. 50, pp. 5296-5301, 1979.
- [9] H. Kressel and J. K. Butler, *Semiconductor Lasers and Heterojunction LEDs*, Academic Press, 1977.
- [10] G. J. Letal, J.G.Simmons, J.D.Evans, and G.P.Li "Determination of active-region leakage current in ridge-waveguide strained-layer quantum well lasers by varying the ridge width" *IEEE. J. Quantum Electron.*, vol. 34. no. 3, pp. 512-518, 1998.

**Fabrication and characterization of InGaAsP/InP multi-quantum well buried-ridge waveguide laser diodes**

Su Hwan Oh, Ji-Myon Lee, Ki Soo Kim, Chul-Wook Lee, Hyunsung Ko, and Sahnggi Park

*ETRI-Basic Research Laboratory, Optical Communication Devices Department,  
161 Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, KOREA*

(Received August 12, 2003, Revised manuscript October 20, 2003)

We fabricated a buried-ridge waveguide laser diode (B-RWG LD) which has more advantages for obtaining lateral single mode operation on the same ridge width and for the planarization of the device surface, compared to the conventional RWG LD. In this LD, the difference of the lateral effective refractive index can be controlled by the thickness of the InGaAsP layer which is grown on the active and the p-InP layers. The InGaAsP multiple quantum well was grown on a n-InP substrate by the CBE. The buried ridge structure was formed by selective wet etchings, followed by liquid phase epitaxy methods. The fabricated LD with the ridge width of 7  $\mu\text{m}$  showed a linear increase of the optical power up to 20 mW without any kinks and a saturated output power of more than 80 mW. By measuring the far field pattern, we demonstrate that LDs with the ridge widths of 5  $\mu\text{m}$  and 7  $\mu\text{m}$  were operated in a lateral single mode up to  $2.7I_{th}$  and  $2.4I_{th}$ , respectively.

OCIS Codes : 230.0230, 230.3120, 230.0250, 230.5590, 230.6080.