

# Buried Ridge Waveguide Laser

## Diode 제작에 관한 연구

모 수 중\* · 홍 창 희\*\*

### A Study on the Fabrication of Buried Ridge Waveguide Laser Diode

Soo-Jong Mo\* · Tchang-Hee Hong\*\*

#### Abstract

We proposed a Buried Ridge Waveguide (B-RWG) Laser Diode(LD) of which the ridge width was controlled more easily and planarization is more advantageous than RWG LD. InGaAs/InGaAsP MQW DH wafer was grown with the optimally designed values by Chemical Beam Epitaxy(CBE). The fabricated MQW B RWG LD was regrown by LPE, on the ridge stripes formed by chemical wet etching. The fabricated LD was formed by 2nd growth(B RWG LD I) and 3rd growth(B RWG LD II). It could be seen that it was operated as single mode till  $2.4\mu\text{m}$  in ridge width of  $7\mu\text{m}$ .

#### I. 서론

LD를 광의 도파 메커니즘에 따라 3가지로 분류해 보면 strongly index guide LD, weakly index guide LD, gain guide LD로 나눌수 있다. 도파 메커니즘에 따라 장단점이 있지만, 제작 측면에서 본다면, strongly index guide LD의 경우, 에칭된 mesa에 세성장을 해야 하는 정교한 제작 기술과 복잡한 공정 때문에 제작이 여의치 않지만,

\* 한국해양대학교 전자통신공학과 석사과정 전파통신 전공

\*\* 한국해양대학교 전자통신공학과 교수

RWG 구조와 같은 weakly index-guide LD의 경우에는 재성장할 필요 없이 한번의 성장에 의해 LD를 제작할 수 있다는 잇점이 있다. 반면에, 측방향 단일모드 동작 및 고효율 동작을 위해서 ridge폭을 2~3 $\mu\text{m}$ 로 하는 것이 좋은 것으로 알려져 있는 것에 비해<sup>1)</sup> 사진식각(photolithography) 공정으로 window open 후 전극 장착이 어렵기 때문에 3 $\mu\text{m}$ 이하의 RWG-LD 제작이 쉽지 않고, 제작을 하더라도 수율(yield)이 낮기 때문에 통상 4~5 $\mu\text{m}$ 정도의 ridge폭을 가지는 RWG-LD를 제작하고 있는 실정이다. 이러한 단점을 보완하기 위해 ridge 외부영역을 polyimide를 채워서 LD를 제작하고 있지만<sup>2)</sup>, 또한 ridge폭이 5 $\mu\text{m}$ 이상이면 측방향 단일모드로 동작하지 않는다는 문제점이 있다.

이러한 단점을 보완하고자 Buried Ridge Waveguide LD(B-RWG LD)를 본 연구실에서 제안하였다. B-RWG LD는 측방향 유효굴절률차를 성장층의 두께로 조절이 가능하기 때문에 RWG LD보다 단일모드로 동작할 수 있는 ridge폭을 크게 할 수 있고, 따라서 고효율 및 고출력으로 동작하는 LD를 제작할 수 있으며 Planar화에 유리하다.

이에 본 논문은 B-RWG LD를 모델링하여 측방향 유효굴절률차에 따른 동작 특성을 알아보며, 모델링한 B-RWG LD를 ridge폭이 5 $\mu\text{m}$ 와 7 $\mu\text{m}$ 가 되도록 2nd growth와 3rd growth로 제작하여 제작된 LD로 전기적 특성, I-L특성에 따른 광학적 특성, 발진 파장 특성 등을 측정 후 2nd growth와 3rd growth의 ridge폭 5 $\mu\text{m}$ , 7 $\mu\text{m}$ 를 비교 분석하였다. 마지막으로 본 연구의 결과들을 정리하여 보았다.

## II. B-RWG LD의 최적화 설계

B-RWG LD는 유효굴절률의 측방향차를 성장된 에피층의 두께로 조절이 가능하기 때문에 RWG LD 보다 단일모드로 동작 할 수 있는 ridge 폭을 제어하기 쉽고 고출력으로 동작하는 LD제작이 가능하다.<sup>3)</sup> 그림 1은 B-RWG LD의 구조를 나타내고 있다. 그림 2는 전류차단층의 두께와 선택식각층의 두께 변화에 따른 유효굴절률의 측방향차<sup>4)</sup>를 구하기 위해 활성층과 도파로층의 두께를 표 1에 나타낸 바와 같이 각각 0.1 $\mu\text{m}$ 로 고정하여 계산하였다. 활성층이 InGaAs/InGaAsP(1.25 $\mu\text{m}$ )인 경우이다. 계산된 결과를 보면 클래드층의 두께가 작을수록, 선택식각층의 두께가 두꺼울수록 굴절률차가 크게 남을 알 수 있다. 이와 같이 MQW B-RWG LD의 경우 유효굴절률의 측방향차를  $d_2$ ,  $d_3$ 층의 두께로 적절히 조절할 수 있음을 알 수 있다. 그러므로 MQW RWG LD보다 측방향에서 단일모드로 동작하고 고출력으로 동작하는 LD를 제작할 수 있는 이점이 있음을 확인하였다.

그림 3에 단일모드로 동작하기 위한 유효굴절률의 측방향차에 따른 ridge 폭의 최대값을 나타내었다. 이 그림으로부터 유효굴절률의 측방향차가 크면 클수록 단일모드로 발진하기 위한 ridge 폭이 감소함을 알 수 있다.

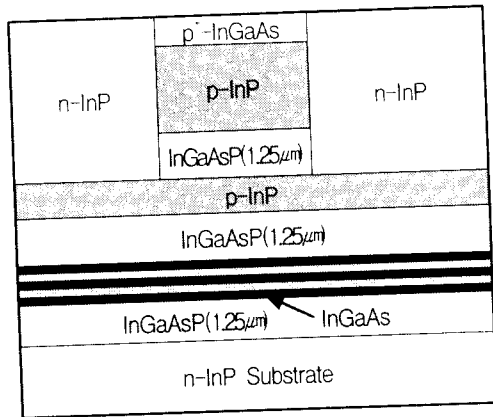


그림 1 B-RWG LD의 구조

표 1 설계 파라메타 값

층	두께 (μm)	굴절률	층구조	
$ x  \leq w/2$	$d_1$	1.5	3.17	p-InP
	$d_2$	변수	3.37	InGaAsP(1.25μm)
$ x  > w/2$	$d_1$	1.5	3.17	n-InP
	$d_3$	변수	3.17	p-InP
$d_1 - d_2$	0.1	3.37	InGaAsP(1.25μm)	
$d_5$	0.1	3.56	well	InGaAs(1.55μm)
		3.37	barrier	InGaAsP(1.25μm)
$d_7$	$\gg 10$	3.17	n-InP	

그리고 선폭퍼짐계수  $\alpha$  값은 유효굴절률의 측방향차가 작을 경우에는 큰 영향을 미치나 유효굴절률의 측방향차가 큰 영역에서는 그 영향이 감소함을 알 수 있다.<sup>5)</sup> 그림 3의 결과로부터 유효굴절률의 측방향차를 적절히 조절한다면 6~9μm의 ridge 폭을 가지며 단일모드로 동작하는 LD제작이 가능함을 알 수 있다.

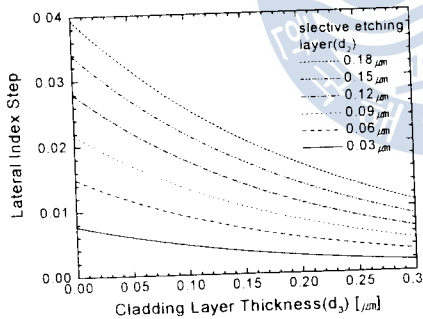


그림 2 클래드층 두께에 따른 유효굴절률의 측방향차

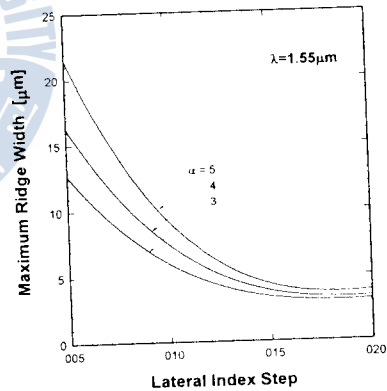
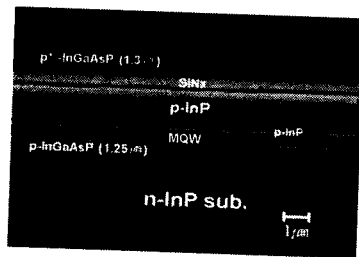


그림 3 측방향에서 단일모드로 발진하기 위한 ridge층의 최대 폭

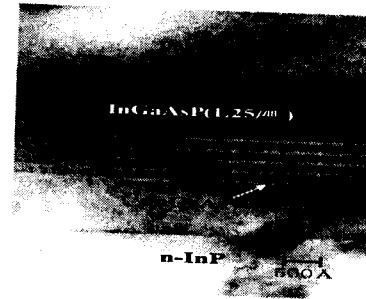
### III. B-RWG LD 제작

MQW-DH 웨이퍼의 구조는 그림 1과 같은 구조로 하였으며, 계산된 결과로부터 p InP 잔류 클래드층( $d_3$ )을 0.15μm로 할 경우, 측방향 단일모드 동작을 위해 유효굴절률차를 0.01 이상을 유지하기 위하여서는 InGaAsP( $d_2$ )층을 900Å 이상으로 하여야 하므로 1000Å 성장시켰다. 활성층은 격자정합된 InGaAs well 층과 InGaAsP( $\lambda=1.25\mu\text{m}$ )

barrier층을 각각 70Å, 100Å으로 각각 5층씩 성장시켰다. 그리고  $d_1$ 층인 p-InP층을 1.2 $\mu\text{m}$ 로 하였으며, LPE장치로 재성장할 경우 melt back 현상을 방지하기 위하여 오음 접촉층인 p-InGaAsP( $\lambda=1.3\mu\text{m}$ )층을 0.2 $\mu\text{m}$ 로 하였다. 성장된 MQW-DH 웨이퍼의 SEM 단면사진과 활성층 영역을 확대한 TEM 사진이 그림 4에 나타나 있다. 그림으로부터 InGaAs층이 70Å, InGaAsP이 100Å 성장되었음을 확인할 수 있다.



(a) SEM 사진



(b) TEM 사진

그림 4 CBE장치에 의해 성장된 DH-MQW 웨이퍼 단면사진

그림 4과 같이 CBE장치<sup>6)</sup>로 성장된 DH-MQW 웨이퍼를 사진식각공정을 통해 stripe 폭이 5 $\mu\text{m}$ 와 7 $\mu\text{m}$ 를 가지는 SiN<sub>x</sub>마스크를 형성하였다. 이렇게 준비된 웨이퍼를 선택적 wet etching에 의해 그림 5처럼 ridge형태로 만들고 나서 본 연구실의 수직형 LPE장치에 의해 2nd growth를 행한 후 전극을 증착하여 B-RWG LD I을 제작하였다. 제작된 B-RWG LD I의 SEM 단면 사진이 그림 6 보이고 있다.

2nd growth된 B-RWG LD I에서 p-InGaAsP층을 제거하고 p-InP 클래드층과 p-InGaAs 오음접촉층을 3rd growth하여 B-RWG LD II를 제작하였다. 3rd growth된 웨이퍼를 이용하여 제작된 B-RWG LD II의 SEM 단면사진이 그림 7에 나타나 있다.

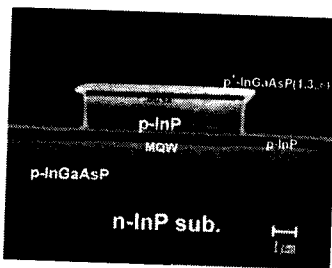


그림 5 화학 에칭에 의한 ridge 형성

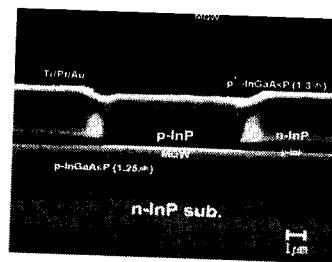


그림 6 B-RWG LD I SEM 단면사진

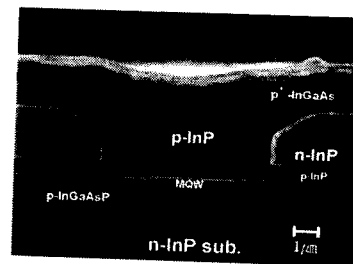


그림 7 B-RWG LD II SEM 단면사진

#### IV B-RWG LD 전기적 광학적 특성

제작된 B-RWG LD II의 특성을 알아보기 위해 공진기 길이에 따른 I-L 특성 변화를 측정한 것이 그림 8에 나타나 있다. 그림에서 공진기 길이가  $300\mu\text{m}$ 인 경우 발진 임계전류값이  $48\text{mA}$ 임을 알 수 있다.

그림 9에 제작된 B-RWG LD의 ridge 폭에 따른 내부양자효율<sup>7)</sup>과 내부손실을 나타내고 있다. 가로축은 공진기 길이이며, 세로축은 외부미분양자효율의 역수를 나타내고 있다. 먼저 B-RWG LD I의 특성을 보면, ridge 폭이  $5\mu\text{m}$ ,  $7\mu\text{m}$ 인 경우 내부양자효율이 각각 63%와 71%이고, 내부손실은 각각  $23\text{cm}^{-1}$ 과  $21\text{cm}^{-1}$ 로 나타났다. 그리고 3차 재성장애 의해 제작된 LD의 경우 ridge 폭이  $5\mu\text{m}$ ,  $7\mu\text{m}$ 인 경우 내부양자효율이 각각 73%와 83%이고, 내부손실은 각각  $19\text{cm}^{-1}$ 과  $20\text{cm}^{-1}$ 로 나타났다. 이와 같이 B-RWG LD II의 경우가 B-RWG LD I보다 내부양자효율이 우수한 것은 누설전류에 의한 주입캐리어의 손실뿐만 아니라 오윤접촉층에서의 접촉저항에 의한 캐리어의 손실이 작아서 활성층으로의 캐리어 주입효율이 우수하기 때문으로 생각된다.

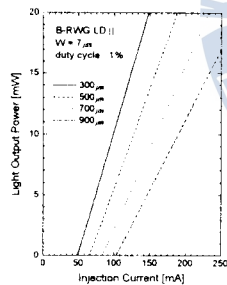


그림 8 공진기 길이에 따른 I-L 특성

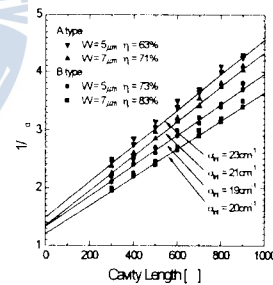


그림 9 내부손실 및 내부양자효율

제작된 B-RWG LD의 최대 광출력을 측정하여 보았는데, 그 결과가 그림 10에 나타나 있다. 공진기 길이는  $900\mu\text{m}$ , ridge 폭이  $7\mu\text{m}$ 인 LD를 사용하였으며, 출사면에 코팅을 하지 않았다.

그림에서 B-RWG LD II의 경우가 B-RWG LD I에 비해 기울기 효율이 좋으며, 포화 광출력은 두 종류 모두 약  $80\text{mW}$  부근임을 알 수 있다. 두 종류의 LD에서 포화 광출력의 차이가 없는 것으로 볼 때, 포화 출력은 클래드 층의 두께에 따른 광흡수의 차이에 의존하는 것이 아니라, 활성층 자체의 이득 포화에 의한 것으로 생각된다.<sup>8)</sup> 광출력 측정결과는 코팅을 하지 않은 상태에서 이루어진 것이므로, 향후 출사단면에 고반사막 코팅과 무반사막 코팅을 한다면 더 좋은 광출력 특성을 얻을 수 있을 것으로

예상된다.

그림 11는 B-RWG LD II의 대표적인 온도에 따른 I-L특성의 변화를 측정된 것이다. 그림 11로부터 온도에 따른  $I_{th}$ 의 변화를 나타낸 것이 그림 12이며, 제작된 LD의 제작공정과 ridge폭에 따른 특성온도  $T_0$  값을 나타내었다. 그림에서 각 점들은 실험결과이고 실선은  $T_0$ 를 계산한 이론 곡선이다.<sup>9)</sup> B-RWG LD I의 경우를 보면, ridge 폭이  $5\mu\text{m}$ ,  $7\mu\text{m}$ 인 경우  $T_0$ 가 각각 40K와 53K로 나타났다. 그리고 B-RWG LD II의 경우  $T_0$ 이 각각 43K와 48K로 나타났다. 제작된 LD의 온도 특성은 제작공정에 관계없이 비슷한 값을 가짐을 알 수 있으며,  $50^\circ\text{C}$  이상에서는 급격한 온도변화가 나타남을 알 수 있다.

그림 14는 그림 13에서 측정된 스펙트럼을 온도에 따라 발진 중심파장을 표시해 놓은 것으로 온도에 따른 파장 변화율은 각각  $5.8\text{\AA}/^\circ\text{C}$ 와  $7.2\text{\AA}/^\circ\text{C}$ 가 얻어졌다. 또한 발광 스펙트럼을 굴절률 변화에 따른 발광모드의 온도 의존성은 통상의  $1\text{\AA}/^\circ\text{C}$ 와 비슷한  $1.1\text{\AA}/^\circ\text{C}$ 로 나타났다. 따라서 순수 밴드갭 에너지의 변화는 통상의 온도변화에 굴절률에 따른 온도변화를 뺀 값이 되므로 순수한 밴드갭 에너지 변화는 각각  $4.7\text{\AA}/^\circ\text{C}$  및  $6.1\text{\AA}/^\circ\text{C}$  정도가 된다.

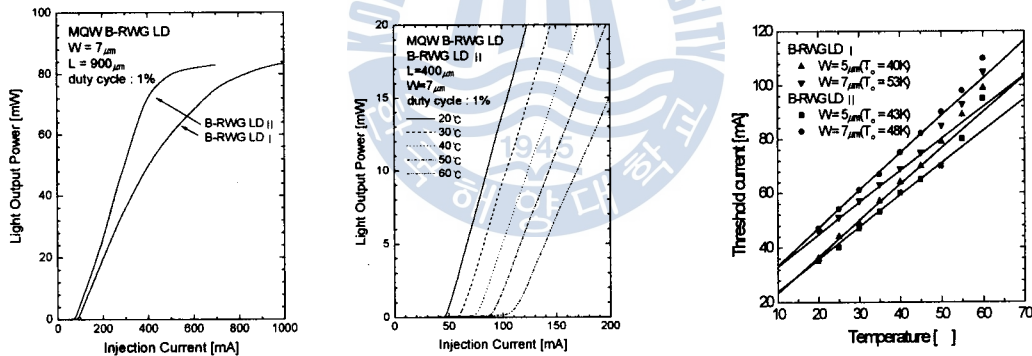


그림 10 광 출력 특성    그림 11 온도에 따른 I-L 특성    그림 12 온도에 따른  $I_{th}$  변화

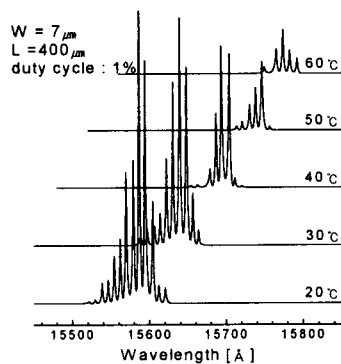


그림 13 온도에 따른 스펙트럼 특성

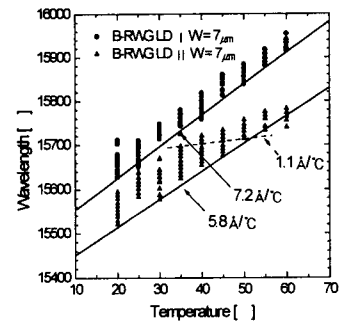


그림 14 온도에 따른 파장특성

제작된 B RWG LD가 측방향으로 단일모드로 동작 유무를 확인하기 위해 FFP을 측정하여 보았다.<sup>10)</sup>

그림 15에 제작된 B-RWG LD의 수평방향 FFP을 나타내었다. 그림 (a)와 (b)는 B RWG LD I의 FFP이고, (c)와 (d)는 B RWG LD II의 FFP 측정 결과이다. ridge 폭이  $5\mu\text{m}$  일 때  $2.7I_{th}$ , ridge 폭이  $7\mu\text{m}$  일 때는 주입전류를  $2.4I_{th}$  까지 인가하면서 측정한 결과 측방향 단일 모드로 동작함을 알 수 있다. 그리고 B-RWG LD I의 경우가 B-RWG LD II에 비해 FWHM이 큰 것은 클래드층의 두께가 얇아서 빔 크기가 증가하지 못하였기 때문이다.

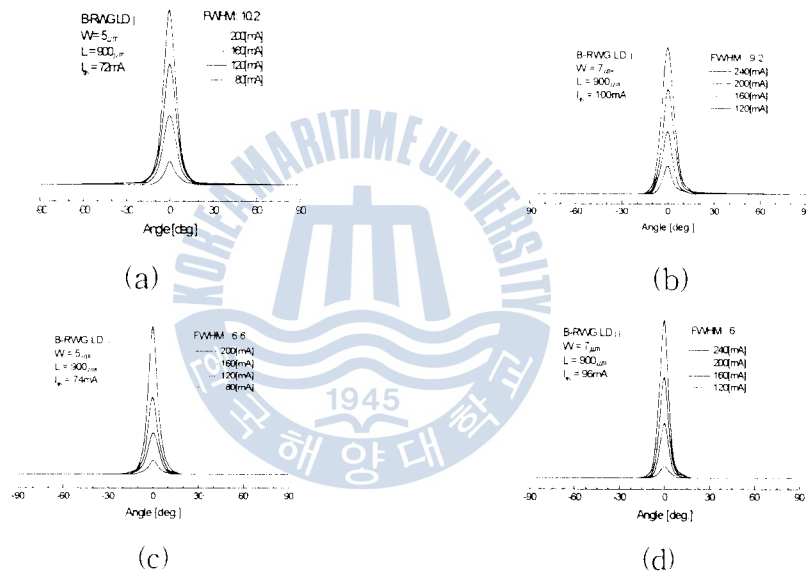


그림 15 수평방향 far field pattern

## V. 결 론

MQW B-RWG LD는 측방향 유효굴절률차를  $d_2$ ,  $d_3$ 층의 두께로 적절히 조절한다면  $6\sim 9\mu\text{m}$ 의 ridge 폭을 가지며 단일모드로 동작하는 LD를 제작할 수 있고 RWG MQW-LD보다 저전류 및 고출력으로 동작하는 잇점이 있다.

측방향 단일 모드로 동작하는 ridge폭을 설계하여 CBE장치로 에피 성장을 한 후 LPE장치로 2nd growth와 3rd growth를 행하여 B RWG LD I와 B RWG LD II를 제작하였다. 제작된 B-RWG LD로 전기적 광학적 특성을 측정한 결과, 광출력이



20mW에 이를 때까지 고차모드 발진에 의한 kink현상이 일어나지 않았으며, 포화 광출력이 80mW 이상임을 확인하였다. B-RWG LD의 내부 양자효율과 내부손실은 B-RWG LD I은 ridge 폭이  $5\mu\text{m}$ ,  $7\mu\text{m}$ 일 때 내부 양자효율이 각각 63%와 71%이고, 내부손실은 각각  $23\text{cm}^{-1}$ 과  $21\text{cm}^{-1}$ 로 나타났다. 그리고 B-RWG LD II는 ridge 폭이  $5\mu\text{m}$ ,  $7\mu\text{m}$ 인 경우 내부양자효율이 각각 73%와 83%이고, 내부손실은 각각  $19\text{cm}^{-1}$ 과  $20\text{cm}^{-1}$ 로 나타났다. 특성온도  $T_0$  값을 측정한 결과를 보면, B-RWG LD I의 경우, ridge 폭이  $5\mu\text{m}$ ,  $7\mu\text{m}$ 인 경우  $T_0$ 이 각각 40K와 53K로 나타났다. 그리고 B-RWG LD II의 경우  $T_0$ 이 각각 43K와 48K로 나타났다. 온도에 따라 발진 중심파장을 측정한 결과 온도에 따른 파장 변화율은 각각  $5.8\text{\AA}/^\circ\text{C}$ 와  $7.2\text{\AA}/^\circ\text{C}$ 로 얻어 졌다. B-RWG LD가 측방향 단일모드로 동작함을 확인하기 위해 FFP을 측정한 결과, ridge 폭이  $5\mu\text{m}$  일 때는  $2.7I_{th}$ , ridge 폭이  $7\mu\text{m}$  일 때는  $2.4I_{th}$  까지 단일모드로 동작함을 확인 할 수 있다.

## VI. 참고 논문

- 1) Tatsuya TAKESHITA, Masanobu OKAYASU, Osamu KOGURE, "Low-Threshold Strained -Layer InGaAs Ridge Waveguide Lasers," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 29, no. 7, pp. L 1138~L 1140, 1990.
- 2) K. Y. Liou, W. T. Tsang, F. S. Choa, E. C. Burrows, G. Raybon and C. A. Burrus, "Low-threshold and high-temperature operation of  $1.55\mu\text{m}$  self-aligned ridge-waveguide multiple-quantum-well lasers grown by chemical-beam epitaxy," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 59, no. 26, pp. 3381~3383, 1991.
- 3) G. H. B. Thompson, *Physics of Semiconductor Laser Devices*, New York : Wiley, ch. 6, 1980.
- 4) K. Utaka, Y. Suematsu, K. Kobayashi and H. Kawanishi "GaInAsP/ InP integrated twin-guide lasers with first-order distributed Bragg reflectors at  $1.3\mu\text{m}$  wavelength," *J. Appl. Phys.*, vol. 19, no. 2, pp. 137~140, 1980.
- 5) G. P. Agrawal and N. K. Dutta, *Long-wavelength Semiconductor lasers*, New York: Van Nostrand Reinhold Company, ch. 2, 1986.
- 6) 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.
- 7) Y. Sasai, N. Hase, M. Ogura and T. Kajiwarw, "Fabrication and lasing characteristics of  $1.3\mu\text{m}$  InGaAsP multiple quantum-well lasers," *J. Appl. Phys.*,



vol. 59(1), pp. 28~31, 1986.

- 8) 편집부, *반도체 레이저 응용기술*, 도서출판 세운, pp. 26~27, 1996.
- 9) Y. Horikoshi and Y. Furukawa, "Temperature sensitive threshold current of InGaAsP-InP double hetrostructure lasers," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 18, pp. 809~815, 1979.
- 10) H. Kawanishi and Y. Suematsu, "Temperature characteristics of a GaAs-AlGaAs intergrated twin-guide laser with distributed bragg reflector," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 17, pp. 1599~1603, 1978.



