

액상결정성장에 의한 InGaAsP/InP MQW-LD 제작에 관한 연구*

조호성 · 홍창희

한국해양대학교 전자통신공학과

오 중 환

한국해기연수원 기관학과

예 병 덕

한국해양대학교 해사수송공학과

이 중 기

한국전자통신연구소 화합물반도체부 광전자실

(1992년 9월 21일 받음)

본 연구에서는 수직형 LPE장치를 이용하여 InGaAsP/InP MQW-DH 웨이퍼를 성장하고 10 μm stripe MQW-LD를 제작하였다. 공진기 길이 470 μm LD의 경우 이득스펙트럼 중심파장은 1.32 μm 였다. 발진 파장은 1.302 μm 로써 양자우물두께 300 \AA 의 이득층에 해당한다는 사실을 알 수 있었다.

I. 머리말

반도체에서의 양자사이즈 효과는 1950년대 J. Bardeen과 J. R. Schrieffer^[1]에 의해 밝혀졌으나, 캐리어의 가둠효과를 실험적으로 관찰한 것은 수 \AA 정도로 제어할 수 있는 성장기법이 개발된 1970년대에 들어서야 가능하게 되었다.^[2]

MQW(Multi Quantum Well)구조는 밴드갭이 다른 성장층에 있어 밴드갭이 작은 층을 de Broglie 파장($\lambda = h/p$) 정도의 두께로 줄이게 되면, 캐리어의 에너지가 성장층의 수직 방향으로 양자화되는 결정 구조를 가져 양자사이즈 효과가 발생한다. 이러한 양자효과는 반도체 소자의 고속화의 한계성인 입자성을 뛰어넘어 파동성을 보임으로써 초고속 소자의 제작이 가능하며, QW LD에서는 낮은 임계전류, 높은 특성온도 $T_0(l = \exp(T/T_0))$, 큰 공진주파수, chirping의 감소, 발진파장에서 도파로의 저손실, 밴드갭 수축의 감소 등 고효율의 광소자를 제작하는데 사용되어질 수 있다.^[3,4,5]

그러나 성장층의 두께를 수 \AA 에서 수백 \AA 정도로 제어할 수 있는 MOCVD 및 MBE와 같은 결정성장장치는 워낙 고가인 관계로 국내에서 설치 가능중인 것은 몇대에 불과하며, MQW 구조의 광소자에 대한 국내연구활동도 아직은 부족한 형편이다. 특히 LPE에 의한 MQW 결정성장방법은 MOCVD나 MBE에 비해 성장층의 두께 제어가 어려운 관계로 이에 대한 연구는 국내 외적으로 거의 이루어지지 않고 있다. 그러나 LPE 장치는 저가로 손쉽게 제작할 수 있는 장치이기 때문에 LPE에 의한 MQW 성장 방법이 확립될 수만 있다면 대학의 소규모 실험실에서 MQW 광소자를 연구하는데 상당히 유익할 것으로 생각되어 진다.

따라서 본 연구에서는 자체 설계제작한 수직형 LPE 장치를 사용하여 반도체 레이저용 MQW-DH 웨이퍼를 성장하였으며, 폭 10 μm 의 stripe형 MQW-LD를 제작하였다. 제작된 MQW-LD의 측정 결과 양자효과에 의하여 발진한다는 사실을 확인하였다. MQW-LD의 전체 이득스펙트럼의 중심파장은 1.32 μm 이었다. 길이 470 μm

* 본 연구는 91년도 교육부 학술조성연구비의 지원으로 수행 되었음.

LD인 경우 상온 펄스동작상태에서 I_{th} 는 200 mA이었으며, 발진파장은 $1.302 \mu\text{m}$ 로써 이는 양자우물의 폭 300 Å의 이득중심에 해당함을 알았다.

본 논문의 2장에서는 LPE 장치를 이용한 MQW-DH 성장과 stripe형 MQW-LD 제작에 대하여 설명하였고, 3장에서는 제작된 MQW-LD의 특성에 관해 기술하였다.

II. Stripe 형 MQW-LD 제작

1. MQW DH 성장

본 연구에서는 자체 제작한 수직형 LPE 장치를 이용하여 MQW-LD 제작을 위한 DH(Double Heterojunction) 웨이퍼 성장을 행하였다. 그림 1에는 본 연구에서 제작한 stripe형 MQW-LD의 구조가 나타나 있다. DH 성장에 사용된 기판은 S-doped InP($=3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, Sumitomo제)이고, 그위에 n^+ -InP buffer층($=1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, Sn-doped)을 성장시켰다. MQW 성장은 InP와 $1.3 \mu\text{m}$ 파장대역인 InGaAsP를 각각 5층씩 성장하고, 다시 p-InP($=6 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, Zn-doped)층과 음접촉을 좋게 하기 위한 p^+ -InGaAsP($=1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, Zn-doped) 성장을 하였다.

LPE로 DH 성장을 하기 위한 온도 프로그램이 그림 2에 나타나 있다. 먼저 성장에 사용될 각 성장용액을 670°C 에 두고 10시간 정도 baking하여 성장용액의 잔류 불순물을 제거한 후, 650°C 에서 60분 동안 soak함으로써 성장용액이 충분히 용해되도록 하여 DH 성장을 행하였다. Soaking이 끝난 후 $0.6^\circ\text{C}/\text{min}$ 로 냉각하여 640°C 에서 열손상된 InP기판을 15초간 meltback하고, melt-

back 표면의 보상을 위하여 40~50분간 n^+ -InP 층을 성장시켰다. 특히 이때 n-InP buffer 층의 평탄도가 잘 유지되지 않으면 QW 같은 수백 Å 이하의 성장층의 전체 평탄도가 보장되지 않는다. 그 다음 $1.3 \mu\text{m}$ 파장대역의 InGaAsP와 InP를 같은 성장용액으로 1초간 왕복성장을 5회 성장시킨 후 p-InP 크래드 층을 20분간, 음접촉을 좋게 하기 위한 p^+ -InGaAsP를 15초 동안 성장시킨다. 이렇게 성장된 웨이퍼의 단면을 SEM으로 촬영한 사진이 그림 3에 나타나 있다.

그림 3에서 보여주듯이 성장초기의 InGaAsP 활성층의 두께는 다소 두꺼운데, 이러한 현상은 LPE에 있어 같은

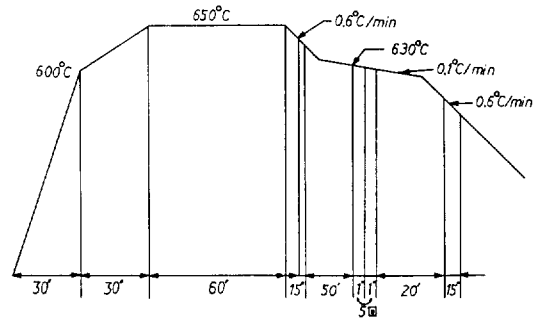


그림 2. MQW-DH성장을 위한 온도 프로그램.

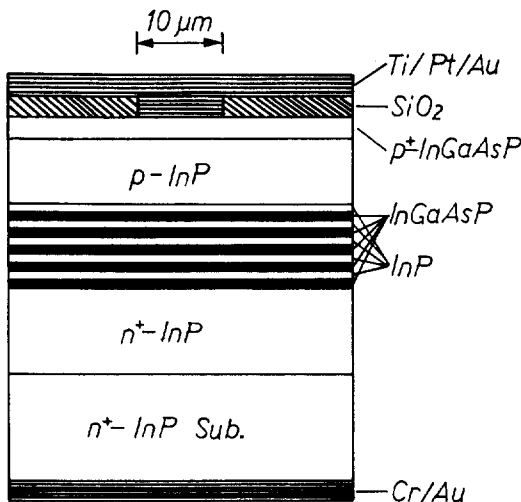


그림 1. Stripe형 MQW-LD의 구조.

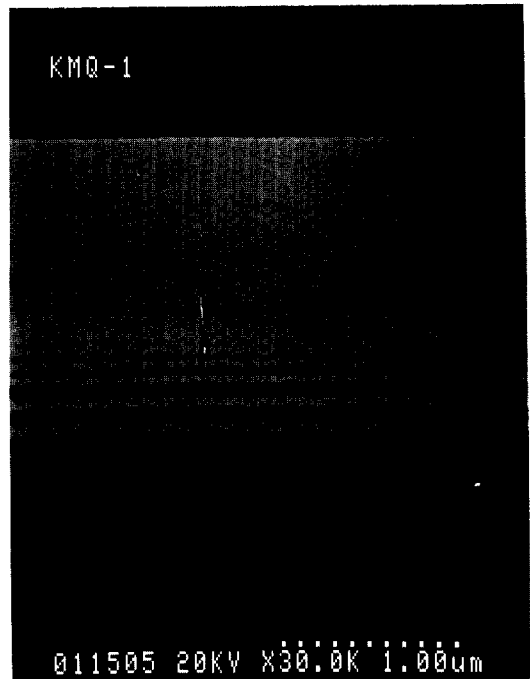


그림 3. 성장된 MQW-DH웨이퍼의 단면사진($\times 30000$).

성장용액으로 여러번 성장을 행할 때 초기의 성장물은 나중에 성장된 층에 비해 항상 두껍게 나타나는 근본적인 문제라 생각되어진다.¹⁶⁾ 그러나 이 문제는 초기성장시간을 짧게 하고 나중 성장시간을 길게 조정한다면 성장층의 두께를 일정하게 할 수 있을 것으로 생각된다. 그리고 p⁻InGaAsP가 보이지 않는 것은 stain etching시 단면뿐만 아니라 표면도 같이 식각되어 나타나지 않았기 때문이다.

2. Stripe형 MQW-LD 제작

성장 웨이퍼를 사용하여 stripe형 LD를 제작하기 위하여 먼저 SiO₂ 절연막을 PECVD를 이용하여 300°C에서 RF 전력 50 W로 약 1000~1500 Å 정도 형성시켰다. Photolithography 공정을 통해 10 μm stripe을 만들었는데, 사용된 PR은 AZ-5214E이고, aligner는 Karl-Sus 제품을 사용하였다. BOE로 30초간 SiO₂를 제거하고 PR을 없앤 후 잔류 PR의 제거를 위하여 plasma ashing을 하였다.

p측 전극은 E-beam 증착기를 이용하여 Ti(300 Å)/Pt(500 Å)/Au(2500 Å) 순서로 증착시켜 425°C에서 RTA로 10초간 열처리하였다. Cleaving이 용이하도록 SiC #1200과 Al₂O₃로 약 100~150 μm 두께로 lapping 한 후 1% Br-Methanol 용액으로 polishing 하였다. n형 전극 역시 E-beam 증착기로 Cr(500 Å)/Au(2500 Å) 순으로 증착하여 400°C에서 30초간 RTA로 열처리 하였다.

3. Stripe형 MQW-LD의 전기 광학적 특성

제작된 MQW-LD의 전기적 특성을 대표하는 I-V 특성을 조사한 결과 순방향 cut-in voltage는 0.75 V였고, 역방향 항복전압은 5 V 정도였다. 이는 일반적인 1.3 Å InGaAsP/InP DH-LD의 특성과 거의 차이가 없다는 것을 나타낸다.¹⁷⁾ 직렬저항은 15 Ω 정도로 다소 큰 값을 보였으나 이는 제조공정에서 공정을 단순화하기 위하여 Zn 확산을 하지 않았기 때문인 것으로 생각되며, Zn 확산 공정만을 첨가시키면 통상 LD의 직렬저항 1~5 Ω 정도를 충분히 얻어낼 수 있을 것으로 기대된다.

한편 LD의 발진파장특성의 조사에는 자체 제작한 전류펄스 구동장치와 초점거리 27 cm인 Jarrel-Ash 모노크로미터를 사용하였다. 그림 4는 상온에서 duty 0.1%의 펄스로 동작시켰을 때의 I-L curve(전류 대 광출력 특성곡선)와 I-L curve 상에서 (1)~(6)까지의 스펙트럼을 측정된 결과이다. 스펙트럼에서 (1)~(4)까지는 분광기의 분해능을 200 Å 정도로 조정하여 측정된 결과이고, (4)~(6)은 분해능을 2 Å으로 높여서 측정하였을 때의 그림

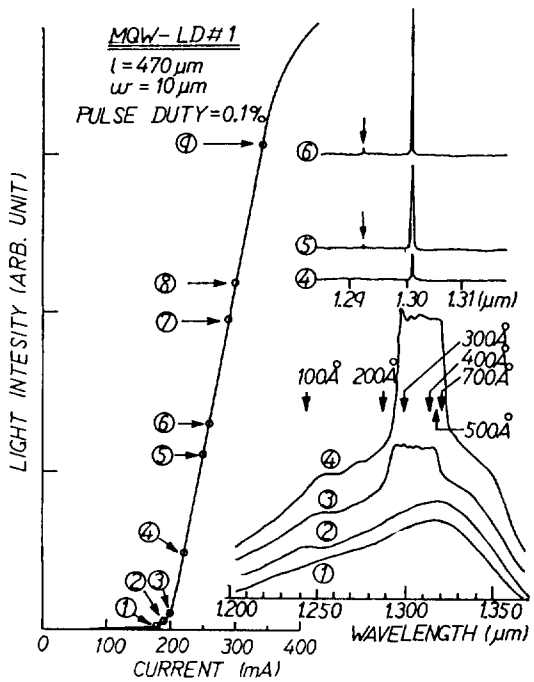


그림 4. MQW-LD의 I-L특성 및 스펙트럼.

이다. 그림의 I-L특성곡선으로부터 전류가 200 mA 이상에서는 양호한 발진을 하고 있음을 알 수 있다.

특히 스펙트럼상에 (1)과 (2)는 인가전류 180 mA와 190 mA에 해당하는 발진 전의 자연방출광 스펙트럼을 각각 나타내고 있으며, 이들의 중심파장은 약 1.32 μm이다. 통상 LD의 자연방출광 스펙트럼은 Lorentzian 또는 Gaussian분포를 나타내기 때문에 스펙트럼은 피크파장을 중심으로하여 대칭분포를 하는 것이 일반적이다.¹⁸⁾ 그러나 (1), (2)의 스펙트럼을 보면 단파장쪽으로 스펙트럼이 퍼져서 비대칭분포를 하고 있음을 알 수 있다. 이는 다음에 설명하는 바와 같이 양자우물효과에 의하여 스펙트럼이 재료의 밴드갭 중심파장보다 단파장쪽으로 편이되어 있기 때문에 관찰되는 현상이라 생각된다.

그림에서 (3)은 발진임계전류값에서의 스펙트럼특성이다. (1)에서 (2) 그리고 (2)→(3)→(4)로 갈때 전류의 증가량은 같지만 스펙트럼상에는 1.3 μm 부근의 광만이 급격하게 증가함을 볼 수가 있다. 이는 유도방출에 의하여 1.3 μm 부근의 광만이 레이저 발진을 하고 있다는 증거이다. 그림에 삽입되어 있는 100~700 Å의 화살표시는 양자우물의 폭이 100~700 Å에 해당하는 스펙트럼의 중심파장의 위치를 나타내고 있다. 이 위치는 양자우물의 폭과 중심파장과의 관계를 나타내는 다음식을 이용하여

계산한 결과이다.^[9]

$$\lambda_n = \frac{1.24}{[E_g + E_{cn} + E_{bn}]} (\mu\text{m}) \quad (1)$$

이 식에서 λ_n 은 양자우물의 두께에 따른 중심파장, E_g 는 밴드갭에너지, E_{bn} 와 E_{cn} 은 각각 가전자대 단과 저도대의 단으로부터 켈 호율과 전자의 에너지로서 E_{bn} 는 상온 스펙트럼측정상에는 구분하여 볼 수 없을 정도로 작은값이므로 수치계산에는 이 양은 무시하였고, E_{cn} 은 무한퍼텐셜 양자우물의 가정하에서 계산한 다음 (2)식을 이용하여 구하였다.^[10]

$$E_{cn} = \frac{n^2 \pi^2 \hbar^2}{2m_e^* W^2} \quad (2)$$

여기서, n 은 양자수로서 계산에서는 $n=1$ 만 이용하였으며, W 는 양자우물폭을 뜻한다. m_e^* 는 전자의 유효질량으로서 계산에는 $1.3 \mu\text{m}$ InGaAsP의 값인 $0.05 m_0$ 를 이용하였다.^[11]

그림 3의 단면사진으로부터 알 수 있듯이 양자우물의 두께는 약 700 \AA 에서 100 \AA 까지 다섯층으로 이루어져 있다. 따라서, 그림 4의 (1~4)까지의 스펙트럼상에는 이층들의 스펙트럼 특성이 중첩되어 나타나 있는 것으로 판단된다. 이 사실의 타당성은 다음 그림 5에서 상세하게 설명하기로 한다.

한편, 그림 4의 스펙트럼 상반부 (4), (5), (6)은 분광기의 분해능을 2 \AA 으로 하여 측정한 결과로서 전류를 증가시켜도 거의 단일모드로 강력한 레이징 동작을 하고 있음을 보여주고 있다. 이 그림에서 파장축의 척도는 하반부의 척도보다 3배나 확대되어 있다. 2 \AA 은 사용한 분광기의 최대 분해능이므로 측정은 이 분해능의 한계 안에서 측정이 되었다. 따라서, 실제 발진파장의 선폭은 이보다는 더 작을 것으로 추정된다. 스펙트럼의 (5)와 (6)에는 화살표시로 되어 있는 곳에 다른 하나의 발진선이 나타나 있다. 이는 다음 그림 5에서 설명하는 바와 같이 양자우물효과에 의해 우물폭이 다른 활성층에서 나오는 레이징현상이다.

그림 5는 그림 4에서 (6)~(9)의 동작점에 대한 스펙트럼 측정결과이다. 스펙트럼은 분해능을 50 \AA 정도로 약화시킨 반면 감도는 수십배 향상시켜서 측정하였다. 스펙트럼 (6)상의 $1.3 \mu\text{m}$ 의 주피크는 $1.29 \mu\text{m}$ 의 부피이크의 거동을 살펴보기 위하여 편이상 일부만 나타내었다. 그들의 상대적인 크기는 그림 4의 (6)에서 살펴보면 알 수 있다.

그림에서 보면 전류를 증가시켜 감에 따라 부피이크

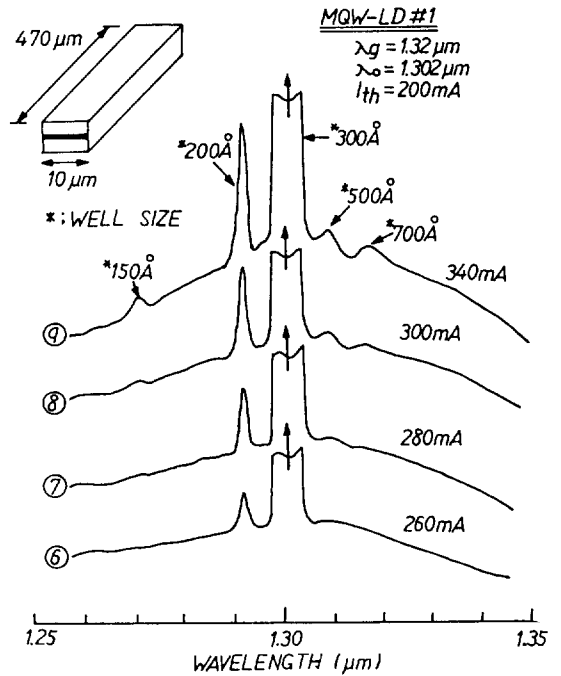


그림 5. 양자효과에 의한 MQW-LD의 발진 스펙트럼.

들이 점차 다수 출현하고 있음을 관찰할 수가 있다. 특성으로는 단파장으로 갈수록 피크들 사이의 간격이 늘어나고 있다는 것과 어느 피크도 간격이 100 \AA 이상이 됨을 알 수 있다.

$1.3 \mu\text{m}$ 대의 InGaAsP 반도체레이저에 있어서 발진파장의 종모드 간격은 레이저 공진기의 길이가 $470 \mu\text{m}$ 일 때 4.5 \AA 이다.^[12] 따라서, 이 실험에서 나타난 부 피크들은 반도체레이저의 종모드들은 아니다. 한편, (2)식에서 양자우물폭 W 값을 각각 $150 \sim 700 \text{ \AA}$ 까지 대입시키면서 계산한 파장의 위치가 그림에서 화살표시로 지시되어 있다. 이 사실은 본 연구에서 제작한 반도체레이저가 양자우물효과에 의하여 발진하다는 것을 입증하고 있으며, 이러한 결과는 LPE장치에 의해서도 양자우물레이저를 제작할 수 있다는 것을 암시하고 있다.

한편, 발진임계전류는 200 mA 로써 전류밀도로는 $J_{th} = 4.5 \text{ kA/cm}^2$ 에 해당한다. 이는 $1.3 \mu\text{m}$ 대의 InGaAsP/InP 레이저의 대표적인 J_{th} 값인 $1 \sim 2 \text{ kA/cm}^2$ 보다 상당히 높은 것으로 보인다. 그러나, 그림 5에서 보여주듯이 광이득이 다섯개의 양자우물에 나누어 분포하고 있으므로 높게 나타나는 것으로써 이를 감안한다면 각 우물당 J_{th} 는 평균 0.85 kA/cm^2 으로써 양자우물 구조만이 가질 수 있는 낮은 임계전류밀도의 동작을 하고 있음을 가리키고 있다. 따

라서, LPE 기술을 향상시켜 우물폭을 일정하게만 한다면 기존의 MOCVD 등에 의하여 제작된 MQW 레이저의 성능에도 필적할 만한 레이저를 제작해 낼 수 있을 것이다. 그리고, 만일 LPE로 MQW를 제작할 수만 있다면, 타 장비에 비하여 장비 설치비가 가장 저렴할 뿐만 아니라 MQW 결정성장에 요하는 시간도 가장 짧기 때문에 결과적으로 레이저의 생산단가를 낮추는데에 크게 기여할 수 있을 것으로도 기대된다.

IV. 맺음말

본 연구에서는 자체 설계제작한 수직형 LPE 장치를 이용하여 반도체 레이저용 MQW-DH 웨이퍼를 성장한 결과 수백 Å 이하의 성장두께조절이 가능함을 알 수 있었다. 또한, stripe 폭 10 μm의 stripe형 MQW-LD를 제작하여 전기광학적 특성을 조사하여 본 결과 양자효과에 의한 발진특성을 확인할 수 있었다. 이때 전체 이득스펙트럼의 중심파장은 1.32 μm였으며, 공진기 길이 470 μm LD의 경우 상온펄스 동작시에 문턱전류가 약 200 mA임을 확인하였다. 그리고 발진후 파장은 1.302 μm로써 양자우물의 두께 300 Å의 이득중심에 해당한다는 사실도 알 수 있었다. 이러한 결과로부터 LPE 장치를 이용하여서도 MQW-LD의 제작이 가능하다는 사실이 확인되었다.

향후, BH 구조와 같은 index guided LD를 제작한다면 좀 더 나은 MQW-LD의 특성을 얻을 수 있을 것으로 생각되며, LPE 방법에 의해 성장된 MQW 웨이퍼를 사용하여 광스위치와 같은 MQW 광소자에 대한 연구도 가능하리라 생각되어진다.

감사의 글

본 연구를 위해 많은 도움을 주신 한국전자통신연구소 광전자실 여러분 및 서울대학 반도체공동연구소 이종덕 교수님과 민홍식 교수님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] J. R. Schrieffer, Phys. Rev. **97**, 641 (1955).
- [2] R. Dingle *et al.*, Phys. Rev. Lett. **33**, 827 (1974).
- [3] W. T. Tsang *et al.*, Appl. Phys. Lett. **46**, 673 (1979).
- [4] N. K. Dutta *et al.*, Appl. Phys. Lett. **46**, 19 (1985).
- [5] H. Iwamura *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **22**, 1951 (1983).
- [6] Ho-Sung Cho *et al.*, 한국물리학회 제 61 회 정기총회, **8**(2), 1990.
- [7] 신동혁 외, 대한전자공학회지, **22**, 4, 375~378, (1985).
- [8] J. K. Butler, *Semiconductor Laser and Heterojunction LEDs*. (Academic Press. 1977), pp. 71.
- [9] M. Asada *et al.*, IEEE J. Quantum Electron, QE-**20**, **7**, 745 (1984).
- [10] N. K. Dutta *et al.*, *Long-wavelength Semiconductor Laser*, (Van Nostrand Reinhold company, 1986), pp. 373.
- [11] N.K. Dutta, J. Appl. Phys. **54**, 1236(1983).
- [12] G. P. Agrawal *et al.*, *Long Wavelength Semiconductor Lasers*, (Van Nostrand Reinhold company, 1986), pp. 32.

**A Study on the InGaAsP/InP MQW-LD Fabrication
by the Liquid Phase Epitaxy**

Ho-Sung Cho, Tchang-Hee Hong

Department of Electronics and Communication, Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea.

Jong-Hwan Oh

*Department of Marine Engineering, Korea Marine Training and Research Institute,
Pusan 608-080, Korea*

Byeong-Deok Yea

Department of Maritime Transportation Science, Korea Maritime University

Jung-Gee Lee

Optoelectronic Section, Electronics and Telecommunications Research Institute, Taejon 305-350, Korea.

(Received: September 21, 1992)

In this study, InGaAsP/InP MQW-LD wafer was grown by a vertical type LPE system and 10 μm stripe MQW-LD was fabricated with the wafer. The threshold current was about 200 mA and when the cavity length of the LD was 470 μm the central wavelenth of gain spectra was 1.32 μm the lasing wavelength was 1.302 μm which corresponded to the gain center of the quantum well thickness of 300 \AA .