

論文95-32A-6-9

저압 유기금속 기상화학증착법에 의한 $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP/InP uncooled-LD의 제작

(Fabrication of $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP/InP Uncooled-LD Using Low Pressure MOVPE)

曹 豪 成 * , 金 定 洙 * , 李 重 基 * , 張 東 薰 * , 朴 景 鉉 * ,
李 承 遠 * , 朴 基 聖 * , 金 弘 晚 * , 朴 亨 茂 *

(Ho Sung Cho, Jeong Soo Kim, Jung Kee Lee, Dong Hoon Jang,
Kyung Hyun Park, Seung Won Lee, Ki-Sung Park, Hong Man Kim,
and Hyung-Moo Park)

요 약

$1.3\mu\text{m}$ 발진과장을 가지는 InGaAsP/InP계 uncooled-LD는 광가입자망이나, 광집속, 장거리 대용량 광통신 등에 사용됨으로 해서 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 저압 유기금속 기상화학증착법(MOVPE)에 의해 활성층으로 1.4% 압축 응력 우물($\lambda=1.3\mu\text{m}$)과 0.7% 인장 응력 장벽($\lambda=1.12\mu\text{m}$)을 사용하여 strain compensation시킨 PBH-MQW-LD를 제작하여 본 결과 낮은 발진임계전류와 안정된 온도특성을 얻을 수 있었다. 제작된 uncooled-LD의 평균 발진임계전류는 5.6mA를 얻었고 평균 slope efficiency는 0.27mW/mA를 얻을 수 있었다.

Abstract

InGaAsP/InP uncooled-LDs emitting at $1.3\mu\text{m}$ wavelength are of interest for several application of fiber-to-the-home, optical interconnection, long-haul high-bit-rate optical transmission systems, etc. The strain compensated PBH-MQW-LD employing 1.4% compressive strained well($\lambda=1.3\mu\text{m}$) and 0.7% tensile strained barrier($\lambda=1.12\mu\text{m}$) layers grown by low pressure metallicorganic vapor phase epitaxy was found to be low threshold current and stable temperature characteristics. The average threshold current of 5.6mA and average slope efficiency of 0.27mW/mA at room temperature were obtained for uncoated uncooled-LD.

I. 서 론

대량정보의 교환 및 기록·재생이 필수 불가결한 현

* 正會員, 韓國電子通信研究所 化合物半導體 研究部
(Dept. of Compound Semiconductors, ETRI)
接受日: 1994년12월21일, 수정완료일: 1995년5월21일

대정보화 사회에 있어서 광통신과 광 정보처리의 광원으로 사용되는 LD(laser diode)의 역할은 더욱 중요시되고 있으며, 고성능화 및 저가격화를 향한 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 현재 LD는 광정보 처리용으로 GaAs계를 기본으로 하는 가시광 LD와 광통신용으로 사용되는 장파장영역의 InP계 LD로 크게 대별되는데, 광정보 처리용은 고밀도 기록재생을 위한 단파장화에 대한 연구개발¹⁾¹²⁾이 계속 진행되고 있으며, 광

통신용은 변조 대역폭을 넓히기 위한 노력^{13) 14)}이 경 주되고 있는 실정이다. 특히, 광통신용 LD의 경우 초 고속 대용량 정보전송을 위한 1.55 μm DFB-LD에 대 한 연구가 진행되어 변조대역폭이 10Gbps이상의 LD 가 보고되고 있으며¹⁵⁾, 이와 병행하여 광대역 서비스 (B-ISDN)의 최종목표라 할 수 있는 가입자망에 사용 될 1.3 μm FP(Fabry Perot)형 uncooled-LD에 대한 연구는 bias-free, APC(automatic power control)-free인 LD의 개발을 목표로 활발한 연구가 계속되고 있다.^{16) 17)} 광대역 서비스에서 광통신용 광 원의 개발은 정보화사회로 이르기 위해 필수 불가결한 것으로서 초고속 광통신용 2.5Gbps DFB-LD (distributed feedback laser diode)의 개발은 성공 하였으나¹⁸⁾ 가입자망에 사용될 1.3 μm FP형 uncooled-LD에 대한 연구는 많이 이루어져 있지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 1.3 μm FP형 uncooled-LD를 제작하고, 동작특성을 조사하여 보았다. Uncooled-LD의 경우 저가격, 고성능을 동시에 만족시켜야 하는 데, 특히 광송신기의 가격을 낮추기 위하여 모듈 내에 TEC(themo-electric cooler)가 장착되지 않기 때문 에 제작된 uncooled-LD는 -60℃~65℃의 주변 온도 영역에서 안정된 동작을 하여야 하며, 시스템에 장착될 경우 모듈내의 온도가 20℃정도 높다고 가정할 경우 -40℃~85℃영역에서 안정된 온도특성을 가져야 한다. 이와 같은 요건을 만족하기 위하여 저압 유기금속 화 학기상증착(metalorganic vapor phase epitaxy: MOVPE)법으로 성장한 PBH(planar buried heterostructure)-MQW(mutiple quantum well)-LD를 제작하였다. 양질의 에피층을 얻기 위하여 활성 층은 압축 응력 우물과 인장 응력 장벽으로 응력 완화 (strain compensation)시켰으며,¹⁹⁾ 특히 저압 MOVPE법에 의해 2차와 3차 재성장을 행하여 재현성 있는 소자특성을 얻었다.

제작된 uncooled-LD의 평균 임계전류는 5.6mA, 평균 slope efficiency는 0.27mW/mA였고, 80℃에 서도 10mW이상의 광출력이 유지됨을 확인하였다.

II. Uncooled-LD의 제작 및 동작특성

1. Uncooled-LD의 제작

가입자망에 사용되는 uncooled-LD는 낮은 임계전 류, 높은 미분양자효율과 안정된 온도특성을 가져야 한 다. 따라서 본 연구에서는 활성층으로 압축 응력 (compressive strain)을 사용하여 Auger 재결합이

나 가전자대 간 흡수(intervalance band absorption)과 같은 비발광 재결합을 줄여 줌으로서 안정된 온도특성을 가질 수 있도록 하였고, 가전자대에 서의 정공의 실효질량(effective mass)를 줄여 주어 발진입계전류를 감소시키도록 하였다. 그리고 MOVPE 성장시 에피층에 가해지는 응력에 의한 최대 성장두께 가 제한되므로 이러한 문제를 해결함과 동시에 에피층 의 신뢰도를 높이기 위해 인장 응력(tensile strain) 장벽을 사용하여 응력 완화(strain compensation)시 켜었다. 에피성장에 사용된 MOVPE 장비는 고속 회전 형 수직 디스크 형태의 반응기 구조를 가지고 있다. MOVPE에서의 성장압력은 60Torr, 성장온도는 630 ℃로 하였고, In 및 Ga의 precursor로는 TMin(trimethyl indium)과 TEGa(triethyl gallium)을 사용하였으며, 5족 원소인 As 및 P의 원 료로는 AsH₃, PH₃ 을 사용하였다. n 형 및 p 형 dopant로는 SiH₄ 과 DEZn (diethylzinc)를 각각 사 용하였다.

DH웨이퍼는 그림 1 과 같은 구조를 MOVPE를 이 용하여 에피성장을 하였다. 성장에 앞서 10분간 PH₃ 분위기에서 열세척(thermal cleaning)을 행한 후, 버 퍼층으로 n-InP를 600Å 성장하고, 격자정합된 n-In GaAsP (λ=1.12 μm, Si-doped)를 1000Å 성장하고 100Å의 InGaAsP (λ=1.12 μm, 0.7% 인장 응력) 장벽층과 50Å의 InGaAsP (λ=1.37 μm, 1.4% 압축 응력) 우물층을 각각 6주기 성장을 하였고, 1000Å의 p-InGaAsP (λ=1.12 μm, Zn-doped)와 p-InP(Zn doped)를 각각 성장시켰다.

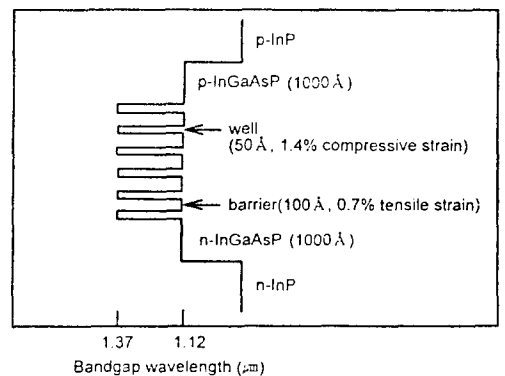


그림 1. DH웨이퍼의 밴드 구조
Fig. 1. Band diagram of DH wafer.

성장된 DH웨이퍼를 3 μm 스트라이프 SiNx를 마스 크로 하여, 고출력에서도 횡방향 단일모드가 유지될 수 있도록 활성층의 폭을 0.8~1.2 μm 정도 하여 메사 에칭을 행하였다. 메사에칭 후 p-n-p blocking 층의

재성장시 활성층 바깥으로 흐르는 누설전류를 줄여 주는 것이 최종 소자의 특성을 결정하는데 상당히 중요하다. 따라서 성장두께와 도핑을 최적화 하여, 전류 차단층으로 p-InP($7 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$), n-InP($1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$)과 p-InP($7 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$)을 사용하였고, MOVPE 2차 성장이 끝난 후 SiNx를 제거한 후 p-InP($7 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$) 크래드 층과 p-InGaAs($2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$) 오옴접촉층을 MOVPE로 3차 성장하였다. 이렇게 성장된 PBH 웨이퍼의 표면 누설전류를 줄여 주기 위하여 InGaAs 오옴접촉층의 일부만 남기고 에칭한 후 p측 전극은 Ti(300Å)/Pt(500Å)/Au(3500Å)을 사용하였는데 Ti는 웨이퍼와의 접착력을 높이기 위한 것이며, Pt은 Ti의 바깥으로의 확산을 방지하고 Au나 solder와 반응하여 용융되는 것을 막아 주는 장벽금속으로 알려져 있다.¹¹²⁾ 전극 형성 후 열처리하는 H₂/N₂ 분위기에서 425°C로 30초간 행하였다. 거울면 형성이 용이하도록 100 μm 정도로 갈아낸 후 n측 전극은 Cr(500Å)/Au(3500Å)를 증착한 후 400°C에서 30초간 열처리하였다.

2. Uncooled-LD의 동작특성

제작된 LD의 특성을 조사하기 위하여 먼저 I-L(전류-광출력) 특성을 조사하여 보았다. 발진임계전류(I_{th})는 이득계수의 온도의존성이나 활성층에서의 캐리어 가둠 불안정으로 인해 생겨나는 누설전류의 온도 의존성때문에 온도에 따라 크게 변화한다. 또한 I_{th}의 온도 의존성은 캐리어의 비발광 재결합, 헤테로접합 계면에서의 캐리어 재결합이나 활성층에서 Auger 재결합 및 가전자대간 흡수 현상 등 여러 가지 원인으로 분석되고 있다.¹¹³⁾ 따라서 가전자대간 흡수나 Auger 재결합 등의 비발광 재결합을 줄여 주고, heavy hole의 실효질량을 감소시킴으로써 임계전류밀도를 줄임과 동시에 미분이득(differential gain)을 크게 할 수 있는 압축 응력한 활성층을 사용하였다.

그림 2에는 제작된 LD를 직류 구동하여 측정된 I-L특성을 온도의 변화에 따라 나타내었다. 그림으로부터 10°C~40°C까지는 광출력이 직선적으로 증가하고, 50°C 이상에 광출력의 포화현상이 나타나며 온도가 높아질수록 광출력 효율이 감소하고 있음을 알 수 있다. 이것은 온도의 증가에 따라 Auger 재결합 등의 비발광 재결합이 증가하고 헤테로 장벽(hetero barrier)에서 주입전자의 누설에 의해 일어나는 현상으로 알려져 있다.¹¹³⁾ 80°C에서의 임계전류는 20mA정도이고, 10mW이상의 광출력이 유지되어 광섬유와의 결합계수가 5%일 경우 -3dBm의 광출력을 얻을 수 있을 것으로 예상된다. 한편, 공진기 길이가

200 μm 이하의 LD에서는 주입전류에 따른 이득포화가 발생하여 15mW 이상에서는 광출력 포화현상이 관찰되어, 이와 같은 측면에서 거울(mirror 혹은 cleaving)면에 코팅을 하지 않고 사용될 경우에는 짧은 공진기는 사용하지 않는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

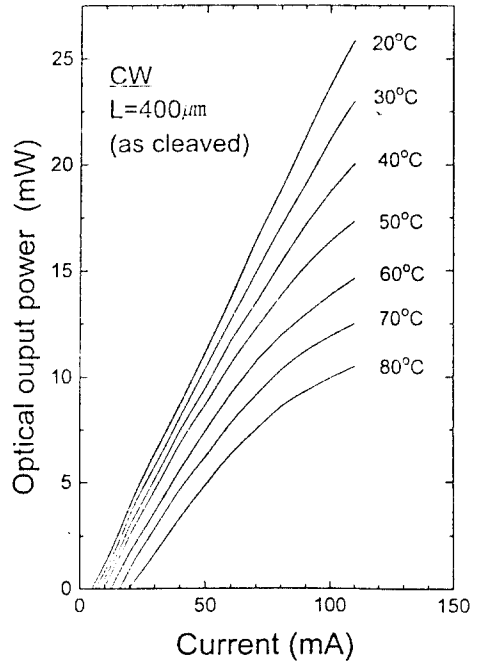


그림 2. 온도에 따른 전류 대 광출력(I-L) 특성
Fig. 2. Temperature dependence of optical output power versus current injection.

그림 3에는 상온에서 직류 구동시 LD길이에 따른 발진 임계전류 변화를 표시한 것으로서 공진기 길이 200~450 μm 의 평균 발진 임계전류는 5.6mA 이다. 그림으로부터 공진기 길이가 길어짐에 따라 발진 임계전류가 증가하고, 300 μm 이하에서는 거의 감소하지 않는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 짧은 공진기에서는 공진기의 내부 손실 보다 거울면에 의한 손실이 증가하게 되어 발진 임계전류가 거의 줄어들지 않는 것으로 생각된다.

그림 4에는 LD길이에 따른 slope efficiency를 한 쪽 거울면에서 측정된 것이 나타나 있다. 그림에 나타난 slope efficiency는 4~5mW 광출력 점에서의 기울기를 측정된 것으로서 공진기 길이가 200~450 μm 에서의 평균 slope efficiency는 0.27mW/mA이며, 최대 값은 공진기 길이 320 μm 에서 0.32mW/mA로 측정되었다. 또한 공진기 길이가 짧아지거나 길어지게 되면

오히려 효율이 떨어지는 것을 알 수 있다.

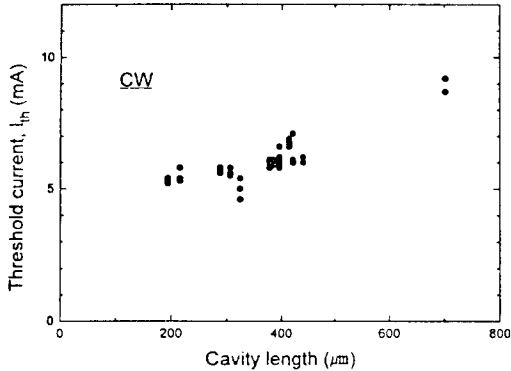


그림 3. 공진기 길이에 따른 발진 임계 전류의 변화
Fig. 3. Threshold current dependence of cavity length.

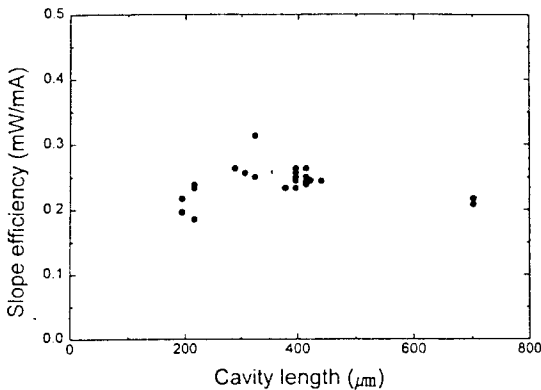


그림 4. 공진기 길이에 따른 slope efficiency
Fig. 4. Slope efficiency versus cavity length.

한편, 활성층을 MQW으로 하는 경우 벌크에 비해 내부손실이 훨씬 작은 것으로 알려져 있는데, 내부손실을 구하기 위해서는 다음 식으로부터 구해낼 수 있다.

$$\frac{1}{\eta_d} = \frac{1}{\eta_i} \left(1 + \frac{\alpha_i}{\alpha_m} \right) \quad (1)$$

$$\alpha_m = \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{r_1 r_2} \right) \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서 η_d 는 미분 양자효율(differential quantum efficiency), η_i 는 내부 양자효율(internal quantum efficiency)를 나타내며, α_i 와 α_m 는 내부손실과 거울면 손실을 각각 나타낸다. 그리고 L은 공진기의 길이, r_1 과 r_2 는 각 거울면에서의 반사율을 의미한다. 식 (1)과 (2)로부터 내부 양자효율

과 내부손실은 그림 5와 같이 공진기 길이에 따른 미분 양자효율의 역수를 나타내면 각각을 구해 낼 수 있다. 그림으로부터 추정된 내부 양자효율은 72%이고 내부손실은 8.3cm^{-1} 로 추정되며, 일반적인 bulk 활성층에서의 $20\sim 40\text{cm}^{-1}$ 에 비해 상당히 작은 값을 가지는 것을 알 수 있다. 또한 제작된 LD의 내부 손실이 작기 때문에 앞서 그림 2에서 보여준 바와 같이 공진기 길이를 줄여 주더라도 거울면에 의한 손실이 우세하여 발진 임계전류가 크게 감소하지 않는다는 사실과 일치하고 있다.

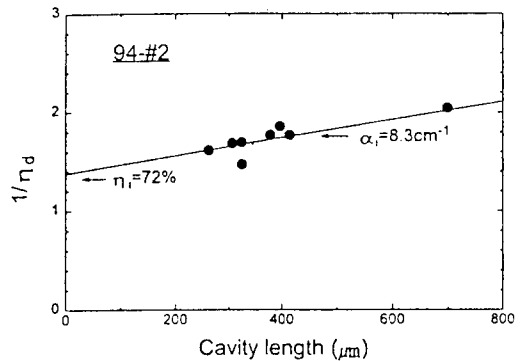


그림 5. 공진기 길이에 따른 $1/\eta_d$
Fig. 5. Inverse of external quantum efficiency as a function of cavity length.

광통신 시스템에 적용시킬 경우 LD의 최대 동작온도 및 온도안정성을 정의하는 척도로 사용되는 것이 특성온도(characteristics temperature) T_0 로서 다음 식과 같이 정의된다.^[14]

$$I_0 = I_m \exp \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad (3)$$

특히 uncooled-LD의 경우 패키지 TEC를 사용하지 않기 때문에 온도에 따라 안정된 발진 임계전류를 가지는 것이 중요하며, 식 (3)에서 의미하듯이 높은 T_0 값을 갖는 것일수록 안정된 온도특성을 가짐을 의미한다. T_0 값을 구하기 위하여 온도에 따른 발진 임계전류의 변화를 표시한 것이 그림 6에 나타나 있으며, 구해진 특성온도 값은 50K로서 활성층을 벌크로 하였을 경우와 거의 비슷한 값을 가짐을 알 수 있다. 이러한 사실은 활성층을 압축응력 MQW으로 하는 경우 전자대의 heavy hole band와 light hole band간의 차이가 나기 때문에 가전자대간 흡수가 줄어들고, 이것이 고온에서의 온도 특성을 좋게 할 수 있는 것으로 예견되었지만, 활성층 재료가 InGaAsP나 InGaAs의

경우 장벽층과의 conduction band offset이 작기 때문에 활성층내의 전자의 구속이 고온에서 효율적으로 이루어지지 않아서^[14] 특성온도의 현저한 향상은 되지 않는다는 보고와^[15] 일치하고 있다. 그런데 가입자 망에 사용되는 LD의 경우 발진 임계전류의 온도 안정성도 중요하지만 slope efficiency의 현저한 악화가 일어나면 일정한 변조전류에서 원하는 광출력을 얻을 수가 없기 때문에 소광비(extinction ratio)가 현저하게 저하되는 문제가 있으므로, 현재에는 발진 임계전류의 특성온도에 대한 것만으로는 온도특성을 가늠할 수 없다는 사실이 지적되고 있다.^[16]

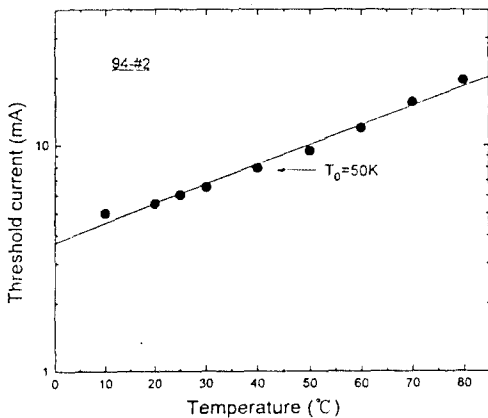


그림 6. 온도에 따른 발진 임계전류의 변화
Fig. 6. Temperature dependence of threshold current.

가입자망에 사용되는 LD에서 중요한 것 중의 하나는 발진파장으로서 1290 μm ~1330 μm 영역을 만족하여야 한다. 그림 7에는 LD 공진기 길이에 따른 중심파장의 변화를 측정하여 본 것으로서 공진기 길이가 짧아질수록 발진파장이 단파장으로 이동하고, 400 μm 이상에서는 거의 포화되고 있음을 보여준다. 긴 공진기에 비해 짧은 공진기를 가진 LD가 단파장인 것은 공진기 길이가 짧아질수록 거울면 손실이 증가하며, 발진 임계전류밀도가 증가하여 band filling 효과에 의해 발진파장이 단파장으로 이동되는 것으로 생각된다. 또한, 발진스펙트럼에서 공진모드의 간격으로부터 LD의 설계시 중요한 요소인 활성층의 유효굴절률을 얻을 수 있는데, 공진기 길이 400 μm 에서의 모드간격이 5.6 \AA 으로서 유효굴절률은 약 3.78 정도로 추정되었다.

그림 8에는 온도에 따른 파장 변화를 보여주며, 그림으로부터 온도변화율은 3.9 $\text{\AA}/^\circ\text{C}$ 정도로서 일반적인 bulk LD와 거의 비슷한 수준을 보이고 있다. 파장의 온도변화율은 굴절률의 온도변화율에 따른 것으로 설

명을 할 수 있지만, 그 변화량이 1 $\text{\AA}/^\circ\text{C}$ 정도로 불과하여 DFB-LD와 같은 경우와 같이 모드간의 손실차가 나는 경우에 해당될 수 있으나 FP-LD와 같이 각 모드간의 손실 차가 나지 않는 경우에는 굴절률의 온도 변화만으로 설명할 수 없다. FP-LD의 경우 각 모드간의 손실은 일정하여 발진파장의 선택성이 없기 때문에 이득이 최대인 모드가 발진하게 된다. 이득이 최대로 되는 파장의 온도변화는 다음 식과 같은 밴드갭 에너지의 온도 변화로 나타낼 수 있다.^[17]

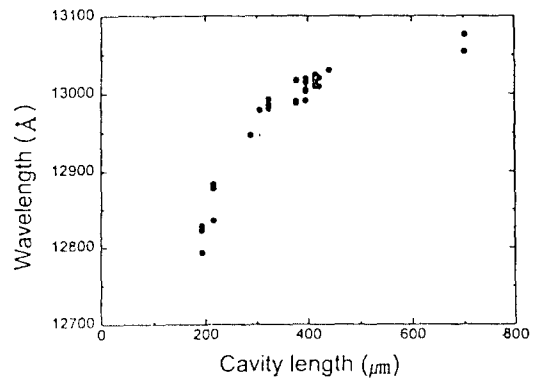


그림 7. 공진기길이에 따른 파장변화
Fig. 7. Lasing wavelength versus cavity length.

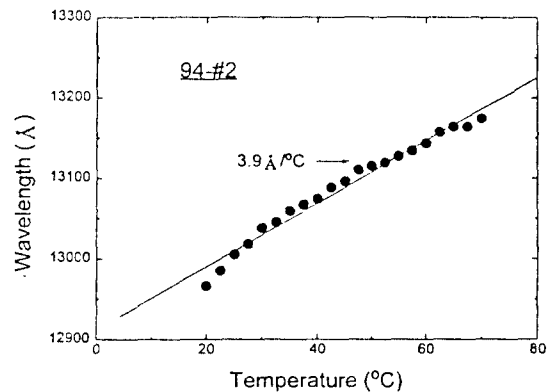


그림 8. 온도에 따른 발진파장 변화
Fig. 8. Temperature dependence of lasing wavelength.

$$\frac{d\lambda_g}{dT} = -\frac{hc}{E_g} \left(\frac{dE_g}{dT} \right) \quad (4)$$

식 (4)에서 h는 Plank 상수이며 c는 광속, E_g 는

밴드갭에너지를 나타낸다. 따라서 식 (4)의 좌측항을 측정된 파장의 온도 변화율로서, 굴절률의 온도변화율을 $1\text{A}/^\circ\text{C}$ 로 가정하면, 밴드갭 에너지만의 온도변화율은 약 $-0.21\text{meV}/^\circ\text{C}$ 정도로 추정할 수 있다.

이러한 결과를 종합해 보면, 본 연구에서 제작된 FP형 uncooled-LD는 가입자망에서 요구되는 요건을 충분히 만족시킬 수 있을 것으로 생각된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 광가입자용 $1.3\mu\text{m}$ FP형 uncooled-LD를 제작하고 특성을 조사하여 보았다. 저 가격, 고효율 및 재현성을 갖는 uncooled-LD를 얻기 위하여 저압 MOVPE로 3회의 결정성장을 행하여 PBH-MQW-LD를 제작하였다. 특히, 발진임계전류의 감소와 온도특성의 안정화 및 에피층의 신뢰도를 높이기 위하여, 활성층으로 압축 응력 우물과 인장 응력 장벽을 사용하였다. 제작된 LD의 평균 발진임계전류가 5.6mA 이며, 평균 slope efficiency가 $0.27\text{mW}/\text{mA}$ 이었고, 80°C 에서도 10mW 이상의 광출력을 얻을 수 있었다. 온도변화에 따른 발진임계전류의 변화로부터 특성온도 T_0 가 약 50K 임을 확인하였다. 또한 발진파장의 공진기 길이에 따른 파장변화율을 조사하여 보았으며, 온도에 따른 발진파장의 변화율은 약 $3.9\text{A}/^\circ\text{C}$ 로 측정되었고, 발진스펙트럼의 모드간격으로부터 활성층의 유효굴절률은 3.78 정도로 추정되었다.

이상의 측정결과를 종합해 보면 광가입자망에 사용되는 uncooled-LD가 갖추어야 할 요건은 충분히 만족시킬 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 "B-ISDN 공동 연구개발 사업"의 출연금에 의해 수행한 연구 결과입니다.

참 고 문 헌

[1] M. Ishikawa, H. Shizawa, Y. Tsubrai, and Y. Uematsu, "Short-wavelength (638nm) room-temperature cw operation of InGaAlP laser diodes with quaternary active layer," *Electron. Lett.*, vol.26, pp.211-213, 1990.

[2] M. C. Tamary, M J. S. P. Brasil, R. E. Nahory, R. J. Martin, H. H. Farrell, T.

J. Gmitter, D. E. A Spne, A. L. Weaver, Y. Zang, and B. J. Skromme, "ZeSe/ZnCdSe quantum well light emitting diodes," *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol.10, pp.692-696, 1992.

[3] K. Uomi, H. Nakane, and N. Chinone, "Ultrahigh-speed $1.55\mu\text{m}$ $\lambda/4$ -shifted DFB lasers with bandwidth of 17GHz," *Electron. Lett.*, vol.25, pp.668-669, 1989.

[4] Y. Hirayama, M. Morinaga, N. Suzuki, and M. Nakamura, "Extremely reduced nonlinear k-factor in high-speed strained layer multiquantum well DFB lasers," *Electron. Lett.*, vol.25, pp.875-876, 1991.

[5] K. Uomi, H. Nakano, and N. Chinone, "Ultrahigh-speed $1.55\mu\text{m}$ $\lambda/4$ -shifted DFB lasers and proposal on reducing damping phenomenon for higher speed modulation," *7th IOOC '89*, Kobe, Japan, 19C2-4, 1989.

[6] D. Colblentz, T. Tabun-Ek, R. A. Logan, A. M. Surgent, S. N. G. Chu, and P. S. Davisson, "Strained multiple quantum well lasers emitting at $1.3\mu\text{m}$ grown by low-pressure metalorganic vapor phase epitaxy," *Appl. Phys. Lett.*, vol.59, pp. 405-407, 1991.

[7] P. J. A. Thijs, Teus van Dongen, Luuk F. Tiemeijer, and J. J. M. Binsma, "High-performance $\lambda=1.3\mu\text{m}$ InGaAsP-InP strained-layer quantum well lasers," *J. Lightwave Technol.*, vol.12, pp.28-37, 1994.

[8] 이종기, 장동훈, 조호성, 이승원, 박경현, 김정수, 김홍만, 박형무, 홍창희, "2.5Gbps 광통신용 $1.55\mu\text{m}$ InGaAsP/InP PBH-DFB-LD 제작 및 특성," 전자공학회논문지, 제31권A편, pp.1233-1239, 1994

[9] H. Yamada, T. Terakodo, Y. Sasaki, S. Takano, K. Uehara, T. Torikai, and T. Uji, "Extremely low operating current $\lambda=1.3\mu\text{m}$ multiple-quantum-well laser diodes," *NEC Res. & Develop.*, Vol.33, pp.354-364, 1992.

[10] B. I. Miller, U. Koren, M. G. Yang, and M. D. Chien, "Strain-compensated

- strained-layer superlattice for 1.5 μ m wavelength lasers." *Appl. Phys. Lett.*, vol.58, pp.1952-1954, 1991.
- [11] N. K. Dutta, D. P. Wilt, R. J. Nelson, "Analysis of leakage currents in 1.3 μ m InGaAsP real-index-guided lasers." *J. Lightwave Technol.*, vol.LT-2, pp.201-208, 1984.
- [12] Sinha, A. K. and J. M. Poate, *Metal-compound semiconductor reactions. Thin Films-Inter-Diffusion and Reaction*. John Wiley & Sons, New York, 1978.
- [13] H. C. Casey, Jr., "Temperature dependence of the threshold current density in InP-Ga_{0.28}In_{0.72}As_{0.6}P_{0.4} ($\lambda = 1.3\mu$ m) double heterostructure lasers." *J. Appl. Phys.*, vol.56, pp.1959-1964, 1984.
- [14] J. I. Pankove, "Temperature dependence of emission efficiency and lasing threshold in laser diodes." *J. Quantum Electron.*, vol.QE-4, pp.119-122, 1968.
- [15] G. P. Agrawal and N. K. Dutta, *Long-Wavelength Semiconductor Lasers*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1986.
- [16] H. Temkin, D. Colentz and R. A. Logan, "High Temperature performance of strained quaternary quantum well lasers." *IPRM '94*, Santa Barbara, MA, 1994.
- [17] 末松安晴, 半導體 レーザと 光集積回路, オーム社, 東京, pp.292-294, 1984.

저자 소개

曹 豪 成(正會員) 第 32 卷 A編 第 2 號 參照
현재 한국전자통신연구소 화합물 소자 연구실

金 定 洙(正會員) 第 32 卷 A編 第 2 號 參照
현재 한국전자통신연구소 광전자 연구실 선임연구원

李 重 基(正會員) 第 32 卷 A編 第 2 號 參照
현재 한국전자통신연구소 화합물 소자 연구실 선임연구원

張 東 薰(正會員) 第 32 卷 A編 第 2 號 參照
현재 한국전자통신연구소 화합물 소자 연구실 선임연구원

朴 景 鉉(正會員) 第 32 卷 A編 第 2 號 參照
현재 한국전자통신연구소 화합물 소자 연구실 선임연구원

李 承 遠(正會員) 第 32 卷 A編 第 2 號 參照
현재 한국전자통신연구소 광전자 연구실 선임연구원

朴 基 聖(正會員) 현재 한국전자통신연구소 광전자 연구실 선임연구원

金 弘 晚(正會員) 第 32 卷 A編 第 2 號 參照
현재 한국전자통신연구소 광전자 연구실 실장

朴 亨 茂(正會員) 第 32 卷 A編 第 2 號 參照
현재 한국전자통신연구소 반도체연구단 단장