

論文96-33A-7-21

응력완화 1.3 μm GaInAsP/InP Uncooled-LD의 다중양자우물층과 SCH층 구조에 따른 동작 특성

(The Operating Characteristics of Strain-Compensated 1.3 μm GaInAsP/InP Uncooled-LD with the Structure of Multiple Quantum Well and Separate Confinement Heterostructure Layers)

曹 豪 成 *, 朴 景 鉉 *, 李 重 基 *, 張 東 薰 *, 金 定 洙 *,
朴 基 聖 *, 朴 喆 淳 *, 金 弘 晚 *, 片 廣 毅 *

(Ho Sung Cho, Kyung Hyun Park, Jung Kee Lee, Dong Hoon Jang,
Jeong Soo Kim, Chul-Soon Park, Ki-Sung Park, Hong Man Kim,
and Kwang-Eui Pyun)

요 약

저압 유기금속 기상화합증착법(MOVPE) 성장에 의해 1.4% 압축응력 우물($E_g=0.905\text{eV}$)과 0.7% 인장응력 장벽($E_g=1.107\text{eV}$)으로 응력완화시킨 다중양자우물구조 PBH-LD에 있어서 양자우물층 개수와 SCH층 구조에 따른 동작특성에 관해 연구하였다. 본 연구에서는 단면 코팅을 하지 않은 MQW-PBH-LD의 발진임계전류, 미분양자효율, 투명전류밀도 J_0 , 이득상수 β 값을 조사하였다. 측정결과 양자우물 개수를 증가시키면, 내부양자효율과 투명전류밀도는 감소하지만 이득상수는 증가함을 알 수 있었다. 그리고 SCH층의 폭을 줄여주면 내부양자효율이 증가하고, 밴드갭에너지가 큰 SCH층을 삽입하면 내부손실은 감소하며, 이득상수가 증가함을 확인하였다.

Abstract

We have adopted the strain compensated PBH(Planar Buried Heterostructure)-LD in which the MQW active layer consisted of 1.4% compressively strained GaInAsP($E_g=0.905\text{eV}$) wells and 0.7% tensile strained GaInAsP($E_g=1.107\text{eV}$) barriers grown by metal organic vapor phase epitaxy(MOVPE). We have investigated effects of number of wells and the structure of the separate confinement heterostructure(SCH) layer in the strain-compensated MQW-PBH-LD. The threshold current, the external quantum efficiency, the transparency current density J_0 , and the gain constant β have been evaluated for uncoated MQW-PBH-LD. As the number of wells increases, the internal quantum efficiency and the transparency current density decreases, whereas the gain constant increases. The small width of the SCH layer shows the large internal quantum efficiency. The small internal loss and the large gain constant have been obtained by inserting the large bandgap SCH layer.

I. 머리말

* 正會員, 韓國電子通信研究所 化合物半導體 研究部
(Compound Semiconductor Research Dept., ETRI)
接受日: 1995年10月23日, 수정완료일: 1996年6月21日

광통신 시스템에 사용하는 광원인 반도체레이저
(laser diode, 이하 LD라 칭함)를 기존의 국간 초고속

장거리 전송망에 적용하기 위한 연구^{[1][2]}가 이루어지고 있는 한편, 최근에는 광가입자망에 적용하기 위한 연구가 활발히 전개되고 있다.^{[3][4]} 특히 가입자망에 사용되는 LD는 Gbps급 초고속 광전송의 경우와는 달리, 전송속도가 수 백 Mbps정도에 불과하며 ~10km 이하의 단거리 전송을 하게 되므로, 분산천이 되지 않은 광섬유에 적용이 쉬운 1.3 μ m 발진파장의 FP(Fabry Perot)형 uncooled-LD가 사용된다. 여기서 uncooled-LD라 함은, 광송신기의 가격을 낮추기 위해 광송신 모듈내에 TEC(thermo-electric cooler)를 장착하지 않기 때문에 붙여진 이름으로서, -40 $^{\circ}$ C ~ 85 $^{\circ}$ C의 온도영역에서 안정된 동작특성을 가져야 하며, 특히 LD에서 문제가 되는 고온에서의 동작특성이 양호하여야 한다. 따라서 가입자망에 사용되는 uncooled-LD는 고온에서의 안정된 레이저 동작을 위해 높은 특성온도를 가져야 할 뿐만 아니라, 낮은 발진임계전류와 높은 미분양자효율을 가지도록 하여 누설전류와 내부손실 및 자체 발열을 줄임으로써 처음부터 외부 온도의 영향을 작게 받도록 하는 것이 가장 중요한 고려 사항이다.

발진임계전류의 저감화 및 미분양자효율의 증가를 위한 연구 방향을 살펴보면, 벌크보다는 다중양자우물 구조의 활성층을 사용하고, strongly index-guide구조인 BH(buried heterostructure)구조의 LD가 주로 연구되고 있다. 그리고 고온에서의 동작 특성을 증가시키기 위해 p-InP 기판을 이용하는 것이 제안되어 BH(buried heterostructure),^[5] PBC(p-substrate buried crescent),^[6] 그리고 VIPS(V-grooved inner stripe on p-substrate)^[7] 구조의 LD에 대한 연구와 더불어, 전송 모듈의 고속화에 사용되는 NPN 트랜지스터와의 정합을 위해 p형 기판을 이용한 LD와 LD 어레이^{[8][9][10]}에 대한 연구 역시 활발히 진행되고 있다. 또한, GaInAsP/InP 재료에서 고온동작시 문제가 되는 heterobarrier leakage는 전도대의 bandgap offset ΔE_c 가 헤테로 접합의 밴드갭에너지 차 ΔE_g 의 0.35~0.4배에 불과하기 때문에 생겨나는데, Al_xGa_yIn_{1-x-y}As/InP^[11] 및 InAs_yP_{1-y}/InP^{[12][13]} 계 재료를 사용하여 bandgap offset을 증가시키는 연구도 활발히 진행되고 있다. 그런데 이러한 재료의 경우 GaInAsP에 비견할 만한 양질의 에피층을 얻기가 어렵고, 현재로는 특성온도(characteristic temperature) T₀의 개선 외에는 오히려 특성이 뒤떨어지고 있다. 한편, 온도특성의

측면에서 볼 때 장파장 영역의 LD에서 특히 문제가 되는 것은 Auger 재결합이나, 가전자대간 흡수(intervalence band absorption) 등이 온도가 상승함에 따라 현저히 증가하여 고온에서의 동작 특성이 열화 되는 것으로 알려져 있으며^{[14][15]}, 이러한 비발광 재결합 현상을 줄이기 위해 활성층에 응력을 가함으로써 가전자대의 light hole과 heavy hole의 밴드를 변형시키는 압축(혹은 인장)응력 다중 양자우물 구조의 활성층이 많이 사용되고 있다.^{[16][17]} 압축응력 다중 양자우물 LD의 경우 안정된 고온동작특성 뿐만 아니라, 발진 임계전류의 감소와 변조대역폭의 증대 등의 장점을 가지는 것으로 알려져 있으며, 특히 MOVPE 성장 기술의 눈부신 발전에 힘입어 이에 대한 연구는 더욱 가속화되고 있다. 즉, 압축응력을 활성층에 가하는 경우 응력이 증가할수록 미분이득(differential gain)이 증가되고, 이는 선폭확대계수(linewidth enhancement factor)의 감소를 가져오므로 초고속 광전송에 상당한 이점을 가지게 된다.^{[18][19]} 그러나 활성층에 응력이 인가되면 양자우물층의 개수가 증가할수록 결정결함(misfit dislocation)을 유발할 수 있는 임계두께(critical thickness)에 근접하게 되어, 에피의 질이 저하되고 이는 LD의 동작특성의 저하와 신뢰성에 심각한 영향을 초래한다. 이를 보완하기 위하여 장벽층에 적절한 반대의 응력을 가하여 활성층 전체에 내재된 응력을 보상시키는 응력완화의 개념이 도입되었는데^[20] 세계적으로 1990년대에 들어 이에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다.^{[21][22]}

현재 높은 특성온도와 낮은 발진임계전류 및 높은 미분이득을 얻기 위해, GaInAsP /InP LD는 구조 최적화의 측면에서 다중양자우물구조의 활성층에 대해 장벽층과 SCH층의 밴드갭 에너지 및 두께에 따른 조사가 부분적으로 이루어져 있으나,^{[23][24]} 최근들어 활발히 연구가 되고 있는 응력완화 다중 양자우물 구조의 활성층에 있어서는 이러한 영향에 대한 연구가 이루어지지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 1.3 μ m 발진파장을 가지는 GaInAsP 압축응력 우물층과 GaInAsP 인장응력 장벽층을 가지는 응력완화 다중양자우물구조의 PBH-LD를 제작하여, 양자우물층 개수와 SCH구조에 따른 소자의 동작 특성을 연구하여 보았다. 다중양자우물구조 에피는 저압 MOVPE 방법으로 성장하였으며, 소자의 재현성을 위하여 2차와 3차 재성장도 저압 MOVPE로

행하였다. 그리고 제작된 MQW-PBH-LD의 발진임계전류, 미분양자효율, 투명전류밀도 J_0 , 이득상수 β 값을 조사하여 본 결과 양자우물 개수를 증가시키면, 내부양자효율과 투명전류밀도는 감소하지만 이득상수는 증가함을 알 수 있었다. 그리고 SCH층의 폭을 줄여주면 내부양자효율이 증가하고, 밴드갭에너지가 큰 SCH층을 삽입하면 내부손실은 감소하며, 이득상수가 증가함을 확인하였다.

II. 응력완화 1.3 μ m GaInAsP/InP uncooled-LD의 제작

가입자망에 사용하는 uncooled-LD는 낮은 발진임계전류, 높은 미분양자효율을 가지면서 안정된 온도특성으로 고온 동작이 가능하여야 한다. 일반적으로 발진임계전류를 낮추기 위해서는 소자의 구조적인 측면과 활성층 구조를 동시에 고려해야 하는데, 소자의 단면 구조는 주입 캐리어와 광을 효율적으로 구속할 수 있는 strongly index-guide 구조인 BH(buried heterostructure) LD를 주로 택하고 있다. 그러나 BH-LD의 경우와 같이 한 번의 재성장으로 p-n-p형 전류차단층을 형성하는 경우, 활성층과 p-InP 전류차단층의 재성장면 위치에 따라 소자의 특성이 결정되는데, 효율적인 전류 주입을 위한 전류차단층의 정확한 성장 조건을 확보하기 어렵고 특히, MOVPE로 전류차단층을 재성장하기는 불가능하기 때문에, 전류차단층 및 상부의 크래드층을 두 번의 재성장으로 제작하는 PBH-LD가 가장 널리 사용되고 있다. 한편 일반적인 BH-LD의 경우에서도 전류차단층의 정확한 성장조건을 필요로 하지 않는 Fe-doped InP 전류차단층을 이용하는 경우가 있으나, 정전용량이 감소하여 넓은 변조대역폭을 가진다는 장점이 있지만 누설전류가 p-n-p형 전류차단층에 비해 크기 때문에 발진임계전류 측면에서 문제를 가지고 있다.^{[25][26]} 다음으로 활성층의 구조적인 측면에서 볼 때 활성층 재료를 벌크를 사용하지 않고 양자우물을 사용하게 되면, 양자크기(quantum size) 효과에 의해 상태밀도가 낮아져서 발진임계전류를 낮출 수 있다. 따라서 현재 가장 많이 사용되는 uncooled-LD 구조 중의 하나는 다중양자우물 활성층을 갖는 PBH-LD이다. 본 연구에서는 앞서 기술한 바와 같이 장파장대 반도체레이저에서 특히 문제

가 되는 Auger 재결합이나 가전자대 간 흡수와 같은 비발광 재결합을 줄여 줌으로서 안정된 온도특성을 가지고, 발진임계전류를 감소시킬 수 있도록 압축응력(compressive strain) 다중양자우물구조 활성층을 사용하였다. 그리고 MOVPE 성장시 활성층에서 발생한 응력에 의해 에피층에서의 최대 성장 두께가 제한되므로 이러한 문제를 해결함과 동시에 에피층의 신뢰도를 높이기 위해, 활성층의 총 응력이 영이 될 수 있도록 인장응력(tensile strain) 장벽을 사용하여 응력을 완화(strain compensation)시켰다. MOVPE에서의 성장 압력은 60Torr, 성장온도는 630 $^{\circ}$ C로 하였고, III족의 In 및 Ga의 precursor로는 TMI(trimethyl indium)과 TEG(triethyl gallium)을 사용하였으며, V족의 As 및 P의 원료로는 AsH₃, PH₃ 을 사용하였다. n형 및 p형 dopant로는 SiH₄ 과 DEZn(diethyl zinc)를 각각 사용하였다.

MOVPE를 이용하여 에피성장된 DH 웨이퍼의 밴드구조가 그림 1에 나타나 있다. 결정 성장에 앞서 10분간 PH₃ 분위기에서 열세척(thermal cleaning)을 행한 후, 버퍼층으로 n-InP를 600Å 성장하고, 격자정합된 n-InGaAsP(Si-doped)를 성장하고 100Å의 InGaAsP($E_g=1.107$ eV, 0.7% 인장응력) 장벽층과 50Å의 InGaAsP($E_g=0.905$ eV, 1.4% 압축응력) 우물층을 성장시켰고, p-InGaAsP(Zn-doped)와 p-InP(Zn-doped)를 각각 성장시켰다.

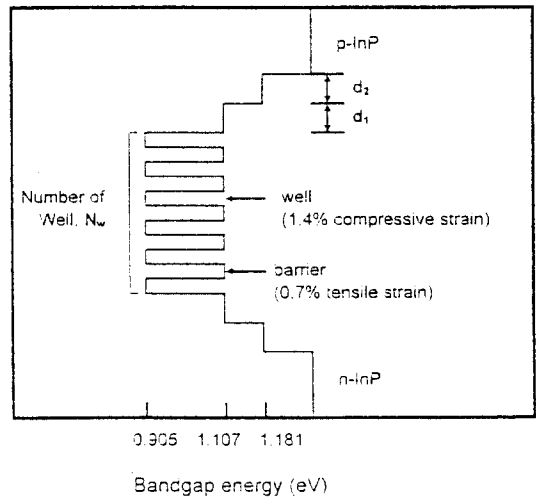


그림 1. DH웨이퍼의 밴드 구조
Fig. 1. Band diagram of DH wafer.

본 연구에서는 그림 1에서 같이 SCH층의 밴드갭에 너지를 1.107eV 또는 1.181eV로 하고, 두께를 각각 d_1 과 d_2 로 변화시켰으며, 양자우물층의 개수 N_w 를 변화시켰다. 성장된 DH웨이퍼를 3 μ m 폭의 스트라이프 SiN_x를 마스크로 하여, 고출력에서도 횡모드가 단일 모드로 유지될 수 있도록 활성층의 폭을 0.8~1.2 μ m정도가 되도록 메사에칭을 행하였다. 여기서 메사에칭 후 p-n-p 전류차단층 재성장시 활성층 바깥으로 흐르는 누설전류를 줄이는 것이 LD의 I-L특성의 향상 뿐만 아니라, 고온 동작에 있어서 상당히 중요하다. 메사에칭 후 MOVPE 재성장시에는 메사의 형상에 따라 재성장 형태가 달라지게 되는데, 특히 p-InP 전류차단층의 활성층 주변의 두께에 의해 전류차단층을 통한 누설전류의 값이 결정된다. 즉 p-InP 크래드층, n-InP 전류차단층, p-InP 전류차단층과 n-InP 기판이 p-n-p-n thyristor가 형성되어 p-InP 크래드층과 p-InP 전류차단층과의 유효접촉면적에 의해 thyristor를 통한 누설전류가 결정되고, 특히 높은 주입전류나 높은 온도에서는 thyristor가 ON상태가 되어서 누설전류를 급격히 증가시키게 된다. 이러한 thyristor 누설전류를 줄이기 위하여 본 연구에서는 메사에칭시 2단계 식각을 행하였는데, 먼저 비선택식각을 행한 후 InP 선택식각을 함으로써 활성층 주변의 p-InP 성장 두께가 기판 위에서의 성장두께에 비해 얇게 성장될 수 있도록 하였다. 2단계 식각방식의 경우 활성층 주변의 성장두께는 비선택 식각으로 형성된 메사에서의 재성장 두께에 비해 1/2~1/3정도로 줄어들어 재성장층을 통한 thyristor 누설전류를 훨씬 감소시킬 수 있음을 확인하였다.^[27] 전류차단층의 재성장층 두께와 도핑을 최적화 하여, 전류차단층으로 p-InP($7 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, $d=1\mu\text{m}$)과 n-InP($1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, $d=1\mu\text{m}$)을 사용하였고, MOVPE 2차 성장이 끝난 웨이퍼는 SiN_x를 제거한 후 p-InP($7 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, $d=1.2\mu\text{m}$) 크래드층과 p-InGaAs($>2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, $d=0.3\mu\text{m}$) 오음접촉층을 MOVPE로 3차 성장하였다. p측 전극은 Ti(300Å)/Pt(500Å)/Au(3500Å)을 사용하였으며, n측 전극은 Cr(500Å)/Au(3500Å)를 사용하였다.

제작 완료된 PBH-LD의 단면사진이 그림 2에 나타나 있다.

일반적으로 양자우물 LD의 경우 활성층의 두께가 얇아서 활성층내의 광구속 및 캐리어 구속이 효율적으로 이루어지지 않으므로, 활성층의 위와 아래에 SCH

층을 형성하게 되는데, 이 때 LD의 특성은 양자우물의 개수뿐만 아니라 SCH구조에 의해 크게 좌우된다. 본 연구에서는 그림 1에 나타나 있는 것과 같은 구조에서 양자우물층의 개수와 SCH층의 구조를 변화시키면서 그 영향을 연구하였다. 표 1에 그림 1의 변수를 변화시켜 실험한 LD에 대해 나타내었다.

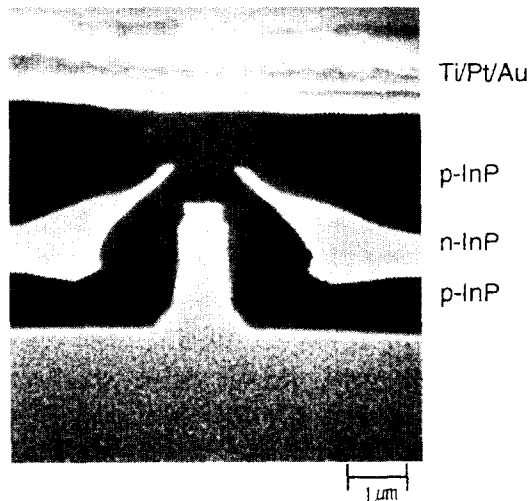


그림 2. 제작된 PBH-LD의 SEM 단면사진
Fig. 2. SEM cross section of the fabricated PBH-LD.

표 1. 제작된 다중 양자우물 PBH-LD의 활성층과 SCH층의 구조

Table 1. The structure of SCH layer and the well for the fabricated MQW-PBH-LD.

Type	Number of wells, N_w	$d_1(E_g=1.107\text{eV})$, Å	$d_2(E_g=1.181\text{eV})$, Å
A	6	1000	0
B	8	1000	0
C	10	1000	0
D	6	500	0
E	8	300	700

III. 제작된 다중 양자우물 PBH-LD의 동작 특성

1. 활성층에 따른 다중 양자우물 PBH-LD의 동작 특성

다중 양자우물 LD의 성능을 향상시키기 위해서는 활성층에 사용되는 양자우물의 개수에 대한 특성 조사와 함께 최적화가 필요하게 된다. 가입자 망에 사용되

는 uncooled-LD의 경우 수백 Mbps 정도의 변조 대역폭을 가지면서 85°C 정도의 높은 온도에서도 규정된 광출력을 유지해야하는 조건을 만족하여야 하는데, PBH-LD의 구조적 특성상 공진 주파수가 수 GHz에 달하므로 변조 속도에 대한 고려는 필요 없게 되는 반면, 고온 동작 특성에 많은 고려를 해야 한다. 따라서 본 절에서는 그림 1에서 SCH층의 d_1 의 두께를 1000 Å으로 고정하고 d_2 는 영으로 하여, 양자우물층의 개수를 6, 8, 10으로 변화시키면서 제작한 LD의 발진임계전류 및 미분양자효율 특성에 대하여 연구하였다. 특히, 발진임계전류(I_{th})는 발진하기 전의 초기 누설전류 및 내부손실 뿐만 아니라, 이득상수의 온도 의존성이나 활성층에서의 캐리어 가둠 불안정으로 인해 생겨나는 누설전류의 온도 의존성 때문에 온도에 따라 크게 변화하므로 제작한 LD의 특성을 평가할 수 있는 좋은 변수이다. 즉, I_{th} 의 온도 의존성은 활성층에서 캐리어의 비발광 재결합, Auger 재결합, 가전자대 간 흡수 및 헤테로접합 계면에서의 캐리어 재결합 현상 등 여러 가지 원인으로 분석되고 있으며, 이러한 현상은 활성층의 구조 및 소자의 구조와 서로 연관되어 있는데 이에 대한 자세한 측정 결과와 논의는 뒤에 기술하였다.

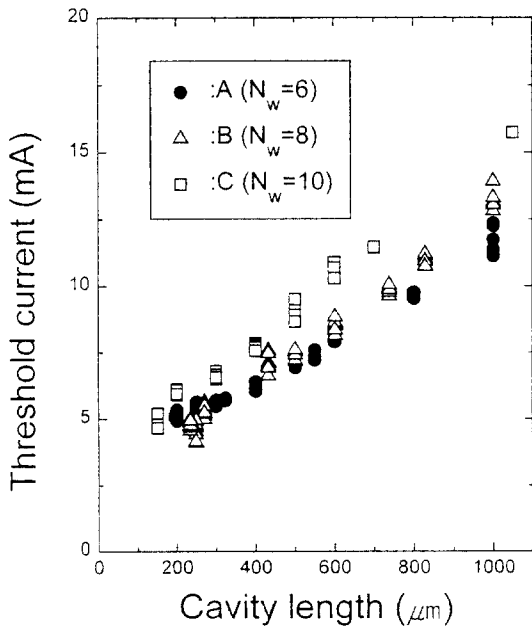


그림 3. 양자우물층 개수에 따른 발진임계전류의 공진기길이 의존성
 Fig. 3. Dependence of the threshold current on cavity length with the number of wells.

그림 3에는 제작된 PBH-LD를 직류구동하였을 경우 다중양자우물층 개수 변화에 의한 공진기 길이에 따른 발진임계전류를 나타내었다. 그림으로부터 양자우물층의 개수가 증가할수록 발진 임계전류는 다소 증가하고 있는 것을 알 수 있다.

낮은 발진임계전류와 높은 미분양자효율의 LD를 제작하기 위해서는 높은 내부양자효율과 낮은 내부손실을 가져야 하는데, 내부양자효율과 내부손실은 다중 양자우물 LD의 SCH구조와 양자우물 개수에 따라 변화하므로 이에 대한 연구도 함께 필요하다. 내부양자효율과 내부손실은 공진기 길이에 따른 미분양자효율(differential quantum efficiency) η_d 의 관계로부터 구할 수가 있다. 그림 4에 양자우물층의 개수를 6, 8, 10으로 하였을 때 공진기 길이에 따른 $1/\eta_d$ 의 측정치를 나타내었다.

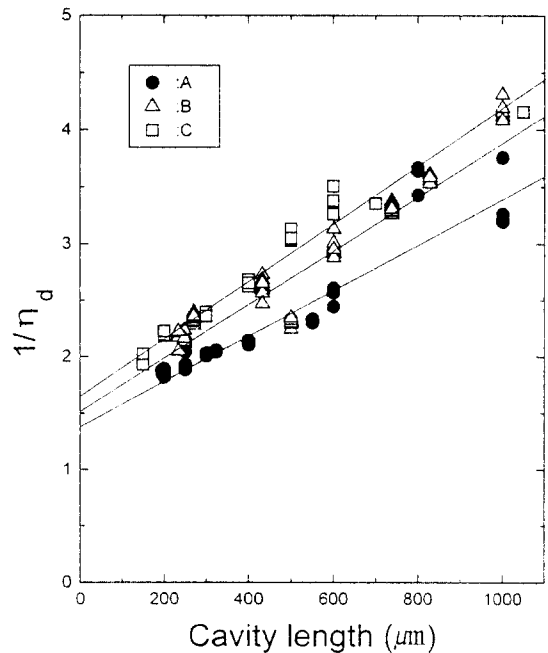


그림 4. 양자우물층의 개수에 대한 공진기 길이에 따른 미분양자효율의 역수의 변화
 Fig. 4. Dependence of the reciprocal of differential quantum efficiency on cavity length with the number of wells.

그림 4로부터 양자우물층의 개수가 증가할수록 캐리어의 주입효율이 나빠져서 내부양자효율은 감소하고 내부손실은 거의 비슷하거나 다소 감소 하지만 그 차가 미소하므로 6~10개의 양자우물을 사용하는 경우

양자우물 개수에 따른 영향을 거의 받지 않는 것으로 생각된다.

2. SCH층 구조에 따른 다중 양자우물 PBH-LD의 동작특성

다중 양자우물 LD에 있어서 활성영역으로 사용되는 양자우물층은 수백 Å에 불과하므로 주입캐리어를 효과적으로 가두기가 어려워서 활성층 주변에 SCH층을 사용하여 캐리어 및 광의 효율적인 가둠을 행하게 된다. 따라서 고성능의 다중양자우물 LD를 제작하기 위해서는 활성층 구조 뿐만 아니라 SCH층에 대한 이해와 자료가 절대적으로 필요하다. 본 절에서는 1절에서 기술한 6개와 8개의 양자우물층에서 SCH층의 구조를 달리하여 동작특성을 비교한 결과에 대해 기술한다. 먼저 6개의 양자우물층에서 SCH층을 1000 Å에서 500 Å으로 하였을 경우 즉, 표 1에서 나타난 A형과 D형의 차이에 대해 조사하였다. 공진기 길이에 따른 발진 임계전류의 변화를 그림 5에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 SCH층을 감소시켜 주면 발진임계전류는 증가하게 된다.

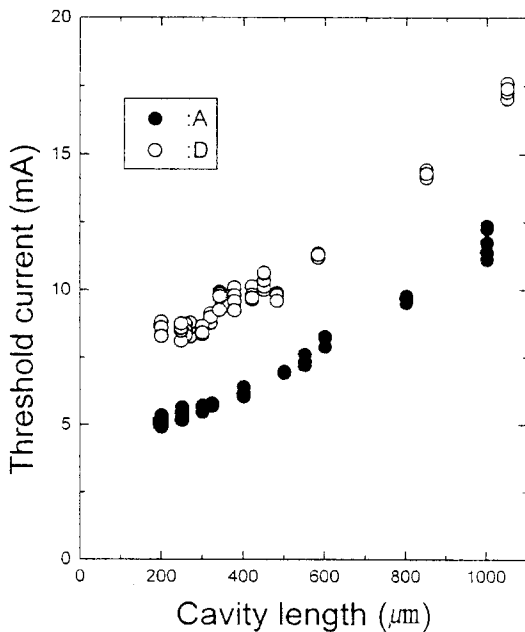


그림 5. SCH층을 감소시켰을 경우의 발진임계전류의 변화

Fig. 5. Dependence of threshold current with decreasing the thickness of SCH layer.

그림 6은 공진기길이에 따른 미분양자효율의 역수를 A형과 D형에 대해 비교하여 본 것이다.

그림 6으로부터 내부양자효율은 SCH층을 감소시키게 되면 오히려 증가하는 것을 알 수 있다.

8개 다중양자우물층에서 SCH층을 밴드갭에너지 1.107eV와 1.181eV를 각각 300 Å과 700 Å으로 형성한 E형의 LD에 대하여 SCH층의 영향을 조사하여 보았다. 그림 7에 공진기길이에 따른 발진임계전류의 변화를 B형과 E형에 대해 나타내었다.

그림 7에서 E형의 경우가 B형의 경우에 비해 발진 임계전류는 다소 증가함을 알 수 있다.

내부양자효율과 내부손실을 구하기 위하여 공진기 길이에 따른 미분양자효율의 역수를 그림 8에 나타내었다.

그림 8로부터 E형의 경우가 B형에 비해 낮은 내부 손실 및 높은 내부양자효율을 가진다는 사실을 알 수 있다.

3. 실험결과 및 논의

본 절에서는 2절에서 얻어진 측정결과에 대한 분석 및 논의를 하기로 한다. 먼저 발진임계전류에 대해 살펴보면, 그림 3의 결과로부터 양자우물 개수가 증가할수록 발진임계전류가 증가함을 알 수가 있는데, 실효 활성층의 두께가 양자우물층의 개수가 증가할수록 커지게 되므로, 발진에 필요한 주입캐리어의 수가 증가하기 때문이다. 그리고 양자우물층이 6개인 경우 공진기 길이가 짧아질수록 발진 임계전류는 서서히 포화되어 가지만 8, 10개의 양자우물층에서는 계속적으로 감소한다는 것을 알 수 있다. 이는 공진기 길이가 짧아지게 되면 거울면에 의한 손실이 증가하여 발진을 위해서는 더욱 더 높은 이득을 필요로 하게 되므로, 양자우물당 이득이 일정하다고 가정하면 많은 수의 양자우물 개수를 가진 편이 더 높은 이득을 가지기 때문으로 생각된다. 이러한 사실은 일정한 공진기 길이에서 최소 임계전류를 얻기 위해서는 양자우물 개수의 최적화가 필요함을 보여준다.

그림 5의 결과에서 SCH층이 얇은 경우 활성층과 SCH층으로 구성되는 광도파로 영역의 등가 굴절률의 감소에 의해 낮은 광가둠계수를 가지므로, LD의 발진에 필요한 캐리어의 수가 많이 필요하게 되어 발진 임계전류는 증가함을 알 수 있다. 마찬가지로 그림 7의 결과에서 밴드갭에너지가 각각 다른 SCH층으로 형성

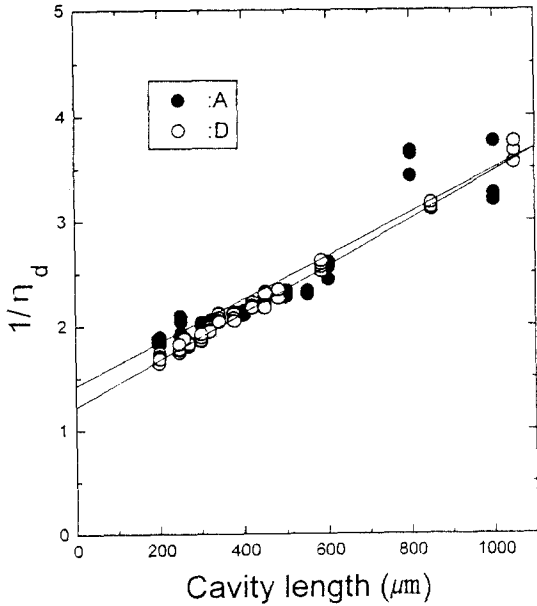


그림 6. SCH층을 감소시켰을 경우의 공진기길이에 따른 미분양자효율의 역수의 변화
 Fig. 6. Dependence of the reciprocal of differential quantum efficiency on the cavity length with decreasing the thickness of SCH layer.

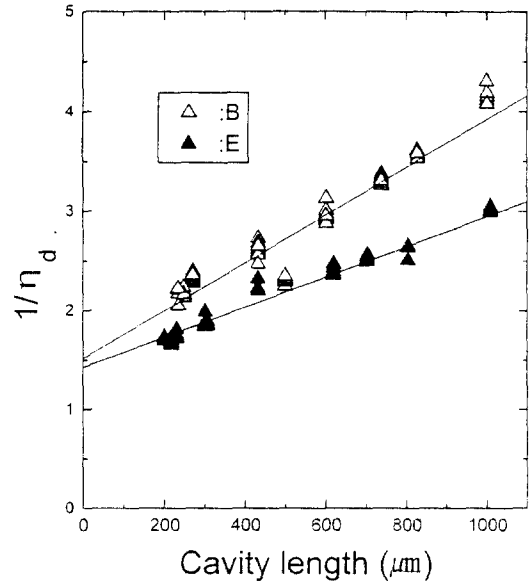


그림 8. 2단계 SCH층 사용한 경우 공진기길이에 따른 미분양자효율의 역수의 변화
 Fig. 8. Dependence of the reciprocal of differential quantum efficiency on the cavity length for 2-step SCH layer.

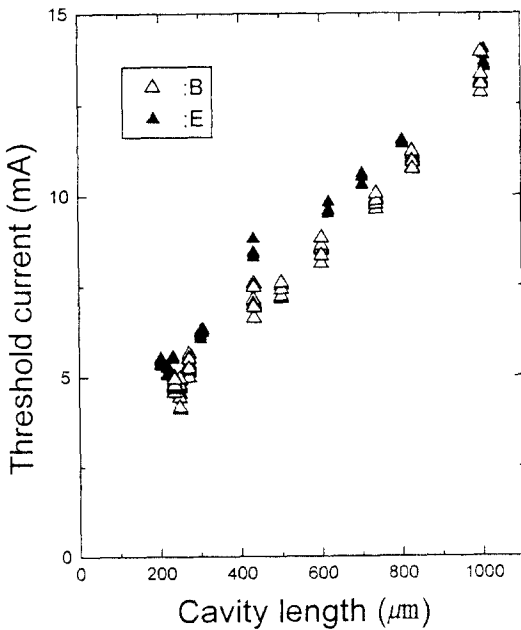


그림 7. 2단계 SCH층을 사용한 경우의 발진임계전류의 변화
 Fig. 7. Variations in threshold current for 2-step SCH layer.

된 E형의 발진임계전류 증가는 밴드갭이 작은 SCH층으로 형성된 B형의 경우에 비해 활성층 영역에서의 등가 굴절율이 낮아지고 광가둠이 효율적으로 이루어지지 않으므로 주입캐리어의 전/광 변환 효율(양자효율)이 감소하기 때문으로 생각된다.

한편, 다중 양자우물 LD에 있어서 이득은 캐리어 밀도 즉, 주입 전류밀도에 따라 대수적으로 증가하게 되므로, 양자우물당 광이득 g 는 다음과 같은 근사식으로 나타낼 수 있다. [28]

$$g \sim \beta J_0 \ln(J/J_0) \quad (1)$$

식 (1)에서 J_0 는 투명전류밀도(transparency current density)를 나타내며, β 는 이득상수(gain constant)로서, 이 값들은 성장된 에피층의 질과 활성층의 구조에 따라 변화하게 된다. 양자우물층 개수 N_w 의 경우 발진임계전류에서 순이득(net gain) G_{th} 는 거울면에 의한 손실 α_m 과 내부손실(혹은 도파로 손실) α_i 와 같게 되므로 다음 식으로 주어진다.

$$G_{th} = N_w \Gamma_w g_{th} = \alpha_i + \alpha_m = \alpha_i + \frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \quad (2)$$

여기서 Γ_w 는 양자우물층 1개당 광가둠계수를 나타내며, L은 공진기 길이, R은 공진기의 양쪽 거울면에서의 반사율, g_{in} 는 임계 광이득을 나타낸다. 식 (2)를 주입된 전체 캐리어가 활성층내에서 광자로 변환되는 캐리어의 변환 효율 즉 내부양자효율 η_i (internal quantum efficiency)를 고려하여, 식 (1)에 대입하면 발진임계전류밀도는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$J_{th} = \left(\frac{J_0 N_w}{\eta_i} \right) \exp \left\{ \frac{\alpha_i + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{R} \right)}{\beta J_0 N_w \Gamma_w} \right\} \quad (3)$$

일반적으로 발진임계전류는 발진임계전류 밀도에 활성층의 면적을 곱하여 얻을 수 있는데, 활성층 폭과 길이를 각각 W와 L로 표시하여 식 (3)을 다시 쓰면 다음과 같이 된다.

$$I_{th} = \left(\frac{WLJ_0 N_w}{\eta_i} \right) \exp \left\{ \frac{\alpha_i + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{R} \right)}{\beta J_0 N_w \Gamma_w} \right\} \quad (4)$$

식 (4)에서 발진임계전류는 공진기 길이에 따라 선형적으로 증가함과 동시에 지수적으로 감소함을 알 수 있다. 식 (4)를 이용하여 그림 3, 그림 5 및 그림 7에 나타나 있는 공진기 길이에 따른 발진임계전류의 변화와 그림 4, 그림 6 및 그림 8의 내부손실 및 내부양자효율로부터 양자우물층 개수와 SCH층 구조에 따른 J_0 와 β 값을 구할 수 있다.

표 2는 표 1에 나타나 있는 5종류의 LD의 내부손실, 내부양자효율, 이득상수 및 투명전류 밀도를 정리한 것이다.

표 2. 제작된 다중양자우물PBH-LD의 특성 상수

Table 2. The characteristic constant for the fabricated MQW-PBH-LD (α_i : internal loss, η_i : internal quantum efficiency, J_0 : transparency current density, β : gain constant).

	A	B	C	D	E
α_i (cm ⁻¹)	16.4	15.5	15.6	18.6	13.8
η_i (%)	75.9	64.4	60.3	80.5	72.0
J_0 (A/cm ²)	85.8	76.2	67.1	119.1	87.0
β (cm/A)	23.3	28.41	31.2	16.57	32.9

표 2의 결과에서 우선 내부손실에 대해 살펴보고자 한다. 내부손실 α_i 의 경우 양자우물 개수가 증가할수록 거의 비슷하거나 다소 감소하고 있음을 알 수 있다. 양

자우물 활성층의 광가둠계수가 수 %정도에 불과하므로 SCH영역이나 크래드층 영역에서의 손실 역시 무시할 수 없게 된다. 따라서 양자우물층 자체의 손실과 장벽층이나 SCH층에서의 손실로 나누어 생각하면, 양자우물에서의 손실은 광가둠계수 Γ 와 투명전류밀도 J_0 에 비례하고, 양자우물 외부의 손실은 $(1-\Gamma)$ 에 비례한다고 볼 수 있다. 표 2에 나타나 있는 5종류 LD의 광가둠계수 Γ 값은 C→B→A→E→D 순서로 감소하고 투명전류밀도는 역 순서를 가지므로 양자우물에 의한 내부손실의 경향은 C→B→A→E→D가 된다는 사실을 추정할 수 있다. D형의 경우와 같이 SCH층 영역을 줄여 준 경우의 손실은 오히려 증가함을 알 수 있는데 활성층에서의 매우 높은 투명전류밀도가 주된 원인으로 추정되며, 좁은 SCH층에 의한 광가둠계수의 감소가 크래드층으로 광의 퍼짐을 증가시키어서 크래드층에서의 흡수 손실이 증가하여 내부손실이 커지는 것으로 추정된다. 그리고 E형 LD의 경우에는 B형에 비교할 때 활성층에서 발생하는 손실은 거의 비슷한 수준으로 평가되나, SCH층을 B형에 비해 밴드갭 에너지가 큰 SCH층을 부가적으로 사용함으로써 활성층으로 주입된 캐리어의 SCH 영역으로 overflow가 높은 밴드갭 에너지를 가진 SCH층에 의해 차단됨으로써 내부손실의 체적 감소로 SCH층에서의 손실이 줄어들어 전체 내부손실은 크게 감소한 것으로 해석된다.

다음으로 내부양자효율의 경우에 대하여 살펴보면, 양자우물층 개수가 증가할수록 내부양자효율은 감소되었다. 이러한 현상은 양자우물개수가 증가할수록 활성층의 총 투명전류밀도 $J_0 \times N_w$ 는 증가하므로, 이에 의해 장벽층과 SCH층을 통한 캐리어 overflow 나 양자우물에서의 전류밀도 증가에 의한 비발광재결합이 증가하여 내부양자효율이 감소되는 것으로 생각된다. 한편, D형 LD와 같이 SCH층의 두께를 줄여 주면 내부양자효율은 증가한다. 양자우물층의 광가둠계수를 Γ_w , SCH층과 장벽층의 광가둠계수를 Γ_c 라 할 때, Γ_c 가 Γ_w 에 비해 훨씬 크기 때문에 광손실은 주로 Γ_c 에 크게 의존하게 된다.^[29] 즉, SCH층에서의 손실의 증가는 양자우물층에서 보다 작기는 하지만 Γ_c/Γ_w 가 10~30 정도 되기 때문에 SCH층에서의 손실은 양자우물층보다 더 큰 영향을 미치게 되므로 SCH층을 줄이게 되면 내부양자효율은 증가된다. 따라서 이러한 사실은 D형 LD의 내부양자효율이 B형 보다 증대된다는 사실과 부합된다. 또한 E형의 LD에서는 큰 밴드갭에너지를 가

진 SCH층을 사용함으로써, 앞에서 언급한 바와 같이 SCH에서의 손실의 감소에 의하여 내부양자효율이 증가한 것으로 판단된다.

투명전류밀도의 경우 양자우물개수가 증가할수록 감소하는 것을 알 수 있는데, 동일한 캐리어 주입시 양자우물개수가 감소할수록 양자우물 한 개당 투명전류밀도는 증가하므로, 투명전류(transparency current)는 오히려 감소하는 것이 되어 그림 3에서 보여주는 바와 같이 거울면 손실을 작게 받는 영역에서의 임계전류는 양자우물 개수가 작을수록 감소한다는 사실을 의미한다. 본 실험에서는 동일한 양자우물구조를 가지므로, 양자우물에 주입된 캐리어의 개수에 따른 준 페르미준위의 상승이 같다고 가정하면, 투명전류밀도는 주입된 캐리어의 양자우물층에 의한 capture 확률에 비례한다고 생각할 수 있다. 즉 양자우물의 개수가 늘어날수록 캐리어의 capture 확률은 높아지게 되므로, 투명전류밀도는 낮아진 것으로 해석할 수 있다. D형과 같이 좁은 SCH 영역을 가지는 경우 A형에 비해 주입된 캐리어의 capture 확률은 높을 것으로 예상되므로 낮은 투명전류밀도를 가져야 하지만, A형에 비해 훨씬 작은 광가둠계수때문에 주입된 캐리어에 의한 양자우물의 투명화 효과가 줄어들어 투명전류밀도의 증가를 가져오는 것으로 생각되며, 아울러 이러한 작은 광가둠계수는 뒤에서 언급될 이득상수의 감소도 유발하는 것으로 생각된다. E형 LD의 경우 D형과 마찬가지로 큰 밴드갭 에너지를 가진 SCH층을 사용하여 양자우물층에서의 capture 확률은 다소 증가하지만, B형에 비해 광가둠계수가 조금 감소된 정도이므로 capture 확률과 광가둠계수 효과의 상쇄에 의해 비슷한 투명전류밀도를 갖는 것으로 추정된다.

그리고 양자우물 한 개당 이득상수 값은 양자우물개수의 증가에 따라 증가함을 알 수 있는데 이러한 현상 역시 위에서 기술한 양자우물에서의 capture 확률이 큰 경우가 높은 이득상수를 갖는다는 사실과 일치한다. 또한 SCH영역의 폭이 감소하면 이득상수는 감소하며, 밴드갭에너지가 큰 SCH영역을 삽입하면 이득상수는 증가하는 것으로 나타났다.

이상의 결과를 종합해 보면 양자우물 개수를 증가시키면, 내부양자효율과 투명전류밀도는 감소하며, 이득상수는 증가한다. 그리고 SCH층의 폭을 줄이게 되면 내부양자효율이 증가하며, 밴드갭에너지가 큰 SCH층을 삽입하게 되면 내부손실은 감소하고 이득상수가 증

가하는 것으로 요약된다.

4. 제작된 다중 양자우물 PBH-LD의 온도특성
 활성층을 압축응력 다중 양자우물층으로 하는 경우 가전자대에서의 heavy hole band와 light hole band 간의 에너지 분리 및 밴드구조의 변형이 일어나기 때문에 가전자 대 흡수가 줄어들고, 이것이 고온에서의 온도 특성을 좋게 할 수 있는 것으로 예견되었지만, 활성층 재료가 GaInAsP나 GaInAs의 경우 conduction band offset이 작기 때문에 활성층 내의 전자의 구속이 고온에서 효율적으로 이루어지지 않아서 현재까지 특성온도의 현저한 향상은 보고되지 않고 있다. 광통신 시스템에 적용시킬 경우 LD의 최대 동작온도 및 온도안정성을 정의하는 척도로 자주 사용되는 것이 특성온도(characteristic temperature) T_0 이다.^[30] 특히 uncooled-LD의 경우 패키지지 TEC를 사용하지 않기 때문에 넓은 온도범위에서도 안정된 발진임계전류를 가지는 것이 중요한데, 높은 T_0 값을 가질수록 안정된 온도특성을 가지게 된다. 표 1에 나타나 있는 5 가지 종류의 LD에 대해 온도를 변화시키면서 연속동작으로 측정된 발진임계전류의 변화를 표시한 것이 그림 9에 나타나 있다.

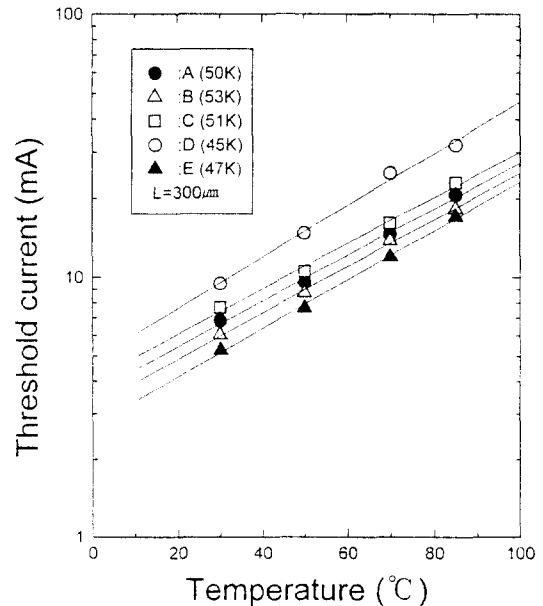


그림 9. 온도에 따른 발진 임계전류의 변화
 Fig. 9. Temperature dependence of the threshold current.

실험에 사용된 LD의 특성온도 값은 45~53°K범위에 분포하고 있음을 알 수 있고, 이 값은 전형적인 GaInAsP계 LD의 40~55°K와 거의 비슷한 수준이다. A형, B형, C형의 경우 거의 비슷한 특성온도 값을 가지는데, 다중양자우물 개수가 증가하거나 광이득이 높아지면 특성온도가 개선된다는 보고^[31]와 다소 차이가 난다. 이 결과는 본 연구에서 사용된 활성층구조의 경우 6, 8, 10개의 양자우물로 구성된 LD는 양자우물 개수에 따른 특성온도 의존성은 거의 없는 것으로 판단된다. 그리고 SCH층의 폭을 감소시킨 D형 LD의 경우 특성온도 값은 약간 낮게 나타났다. 이것은 주입전류에 따른 캐리어 overflow의 증가는 양자우물에서의 한정된 캐리어 capture 시간에 기인하며, 특히 고온에서는 양자우물로부터 장벽층이나 SCH층으로 캐리어의 thermionic emission이 캐리어의 overflow를 결정하므로 고온에서의 동작 특성을 좋게하기 위해서는 SCH층과 장벽층에서의 캐리어 overflow를 최소화 하기 위해 높은 band offset 구조를 가지거나 좁은 SCH층을 사용하는 것이 좋다는 보고^[32]와는 상반된 결과이나, 앞서 얻어진 높은 투명전류밀도 및 낮은 이득상수에 의해 특성온도 값의 감소를 가져온 것으로 추정할 수 있다. D형 LD를 A형과 비교하여 볼 때 장벽층의 밴드 갭에너지는 변화시키지 않고 SCH층의 폭만 줄어듦으로서 고온에서의 thermionic emission의 영향은 A형과 같게 받는다고 볼 수 있지만, 투명전류밀도 및 이득상수 비교에서 언급된 바와 같이 SCH영역에서의 캐리어의 hetero barrier leakage가 커져서 발진임계전류에 미치는 영향이 심화되는 것으로 생각된다. E형 LD의 경우 B형에 비해 높은 투명전류밀도 값을 가지므로 온도가 높아질수록 주입된 캐리어의 leakage가 증가하여 캐리어의 주입효율이 감소하고, 이는 발진임계전류에 영향을 미쳐서 특성온도 값을 저하시킨 것으로 추정된다. 가입자망에 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 특성온도만으로는 고온에서의 온도특성을 가늠할 수 없다는 사실이 지적되고 있다.^[33] 온도 특성 측정 결과 5종류의 LD는 85°C까지 안정된 slope efficiency를 가지므로 이러한 문제는 발생하지 않을 것으로 생각된다.

이상의 사실로부터 본 연구에 사용된 LD들은 발진 임계전류, 미분양자효율, 온도 특성은 광가입자망에 사용되는 LD로서의 규격을 충분히 만족시킬 수 있을 것으로 생각된다.

IV. 맺음말

본 연구에서는 광가입자용 1.3 μ m FP형 uncooled-LD를 제작하고 동작특성을 조사하여 보았다. 저 가격, 고효율 및 재현성을 갖는 uncooled-LD를 얻기 위하여 저압 MOVPE로 3회의 결정성장을 행하여 다중양자우물 PBH-LD를 제작하였다. 특히, 발진임계전류의 감소와 온도특성의 안정화 및 에피층의 신뢰도를 높이기 위하여, 활성층으로 압축응력 우물과 인장응력 장벽을 사용하여 응력완화 시켰다. 특히 활성층으로 사용되는 다중 양자우물의 개수와 SCH층의 영향을 조사하기 위하여 5가지 종류의 LD를 제작하였다. 제작된 각각의 LD에 대해 발진임계전류 및 양자우물층의 투명전류밀도 및 이득상수를 산출하였고, 내부양자효율 및 내부손실을 측정함으로써 양자우물개수와 SCH층의 구조에 따른 변화를 관찰하였다. 양자우물개수를 변화시키면서 실험해 본 결과 양자우물 개수가 증가할수록 발진임계전류는 다소 증가하지만 양자우물당 투명전류밀도는 오히려 감소하고 이득상수는 증가한다는 사실을 확인하였다. 그리고 내부손실과 내부양자효율은 양자우물개수가 증가할수록 오히려 감소하였다. 아울러 활성층의 양자우물 개수를 같게 하고 SCH층을 변화시키면서 동작특성을 조사하여 본 결과 SCH층을 1000 Å으로 한 경우 보다 500Å으로 줄인 경우가 내부양자효율이 증가하였으며, 밴드갭이 큰 물질을 사용하면 내부 손실은 감소함을 알 수 있었다. 그리고 광가입자망에서 중요한 요소 중의 하나인 온도특성을 측정하였는데 특성온도 T₀ 값은 45~53°K 범위에 있고, SCH층의 구조에 따라 특성온도가 다소 영향을 받지만, 본 연구에서 사용된 양자우물 개수 범위에서는 그 영향이 두드러지게 나타나지 않았다.

이상의 측정 결과를 종합해 보면, 본 연구에 사용된 LD들은 광가입자망에 사용되는 uncooled-LD가 갖추어야 할 요건은 충분히 만족시킬 수 있을 것으로 판단된다. 향후 제작된 LD의 공진기 거울면에 AF: (anti-reflection) 혹은 HR(high reflection) 코팅을 하여 발진임계전류 및 온도특성 등을 향상시키기 위한

연구가 계속되어야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

※ 본 논문은 "B-ISDN 공동 연구개발 사업"의 출연
금에 의해 수행한 연구 결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] 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, no.4, pp.668-669, 1989.
- [2] Y. Takahashi, "10-Gbit/s optical transmission systems and devices," *Fiber and Integrated Optics*, vol.11, pp. 91-103, 1992.
- [3] T. Fukushima, N. Matsmoto, H. Nakayama, Y. Ikegami, T. Namegaya, A. Kasukawa, and M. Shibata, "Wideband and high-power compressively strained GaInAsP/InP multiple-quantum-well ridge waveguide lasers emitting at $1.3\mu\text{m}$," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.5, no. 9, pp. pp. 963-965, 1993.
- [4] H. Yamada, T. Terakado, Y. Sasaki, S. Takano, K. Uehara, T. Torita, and Uji, "Extremely low operating current $\lambda=1.3\mu\text{m}$ multiple-quantum-well laser diodes," *NEC Res. & Devel.*, vol. 33, no. 3, pp.354-364, 1992.
- [5] T. Asano, and T. Okumura, " $1.3\mu\text{m}$ high-power BH laser on p-InP substrate," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-21, no. 6, pp.619-622, 1985.
- [6] Y. Sakakibara, H. Higuchi, E. Oomura, Y. Nakajima, K. Goto, H. Namizaki, K. Ikeda, and W. Susaki, "High power $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP P-substrate buried crescent laser," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. LT-3, no. 5, pp.978-984, 1985.
- [7] S. Oshiba, A. Matoba, M. Kawahara, and Y. Kawai, "High-power output over 200mW of $1.3\mu\text{m}$ GaInAsP VIPS lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-23, no. 6, pp.783-743, 1987.
- [8] S. Yamashida, A. Oka, T. Kawano, T. Tsuchiya, K. Saitoh, K. Uomi, and Y. Ono, "Low-threshold(3.2mA per element) $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP MQW laser array on a p-type substrate," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 4, no. 9, pp.954-957, 1992.
- [9] H. Nishiguchi, T. Nishimura, I. Ishimura, Y. Nakajima, R. Hirano, and M.Aiga, "Low threshold 10-element laser array on the p-type substrate for high-speed optical interconnection," *Proc. ECOC'92*, vol. 1, pp. 109-111, 1992.
- [10] A. Oishi, A. Oka, T. Kawano, Y. Ono, K. Uomi, T. Tsuchiya, M. Komori, and A. Takai, "Low-threshold(1.8mA) and high-efficiency(0.39W/A) $1.3\mu\text{m}$ strained quantum well 10-element laser array for high-throughput optical interconnections," *Proc. ECOC'93*, vol. 1, pp.21-23, 1993.
- [11] C.-E. Zah, R. Bhat, B. N. Pathak, F. Gavire, W. Lin, N. C. Andreaskdakis, D. M. Hwang, M. A. Koza, T. -P. Lee, Z. Wang, D. Darby, D. Flanders, and J. J. Hsieh, "High-performance uncooled $1.3\mu\text{m}$ Al_xGa_yIn_{1-x-y}As/InP strained-layer quantum-well lasers for subscriber loop applications," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 30, no. 2, pp.511- 523, 1994.
- [12] T. Fukushima, A. Kasukawa, M. Iwase, T. Namegaya, and M. Shibata, "Small turn-on delay time in $1.3\mu\text{m}$ InAsP/InP strained double quantum-well lasers with very-low threshold current," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.5, no.2, pp. 117-119, 1993.
- [13] M. Yamamoto, N. Yamamoto, and J. Nakano, "MOVPE growth of strained InAsP/InGaAsP quantum-well structures for low-threshold $1.3\mu\text{m}$ lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 30, no. 2, pp.554-561, 1994.
- [14] C. H. Henry, R. A. Logan, and F. R. Merrit, "The effect of intervalance band absorption on the thermal behavior of InGaAsP lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-19, no. 6, pp.947-952,

- 1983.
- [15] 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} ($\lambda=1.3\mu\text{m}$) double heterostructure lasers," *J. Appl. Phys.*, vol.56, pp.1959-1964, 1984.
- [16] E. Yablonovitch, and E. O. Kane, "Reduction of lasing threshold current density by the lowering of valence band effective mass," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. LT-4, no. 6, pp.504-506, 1986.
- [17] H. Yasada, R. Iga, Y. Noguchi, and Y. Yoshikuni, "Pure effects of strain in strained-layer multiple-quantum-well lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol.29, no. 4, pp.1098-1103, 1993.
- [18] S. Kakimoto, Y. Nakajima, Y. Sakakibara, H. Watanabe, A. Takemoto, and N. Yoshida, "Extremely narrow spectral linewidth and low chirping of the MQW-DFB-PPIBH laser diode," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 26, no. 9, pp.1460-1465, 1990.
- [19] F. Kano, Y. Yoshikuni, M. Fukuda, and J. Yoshida, "Linewidth enhancement factor of 1.3- μm InGaAsP/InP strained-layer multiple-quantum-well DFB lasers," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 3, no. 10, pp.877-879, 1991.
- [20] B. I. Miller, U. Koren, M. G. Yang, and M. D. Chien, "Strain-compensated strained-layer superlattice for 1.5 μm wavelength lasers," *Appl.Phys.Lett.*, vol.58, no. 18, pp.1952-1954, 1991.
- [21] X. S. Jiang and P. K. L. Yu, "Strain compensated InAsP/InP/InGaP multiple quantum well for 1.5 μm wavelength," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 65, no. 20, pp.2536-2538, 1994.
- [22] T. Takiguchi, K. Goto, M. Takemi, A. Takemoto, T. Aoyagi, H. Watanabe, Y. Mihashi, S. Takamiya, S. Mitsui, "Improvement of crystal quality and laser characteristics by zero net strain structure," *J. Crystal Growth*, vol. 145, pp. 892-897, 1994.
- [23] J. S. Osinski, Y. Zou, P. Grodzinski, A. Mathur, and P. D. Dapkus, "Low-threshold-current-density 1.5 μm lasers using compressively strained InGaAsP quantum wells," *IEEE J. Photonics Technol. Lett.*, vol. 4, no. 4, pp.10-13, 1992.
- [24] T. Odagawa, K. Nakajima, K. Tanaka, H. Nobuhara, T. Inoue, N. Okazaki, and K. Wakao, "Separate-confinement heterostructure dependence of the effective carrier recombination coefficient of strained InGaAs/InGaAsP multiple quantum well lasers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 63, no. 22, pp.2996-2998, 1993.
- [25] U. Koren, B. I. Miller, G. Eisenstein, R. S. Tucker, G. Raybon, R. J. Capik, "Semi-insulating blocked planar BH GaInAsP/InP laser with high power and high modulation bandwidth," *Electronics Lett.*, vol. 24, no. 2, pp. 138-140, 1988.
- [26] I. F. Lealman, M. Bagley, D. M. Cooper, N. Fletcher, M. Harlow, S. D. Perrin, R. H. Walling, L. D. Westbrook, "Wide bandwidth multiple quantum well 1.55 μm lasers," *Electronics Lett.*, vol. 27, no. 13, pp.1191-1193, 1991.
- [27] H. S. Cho, D. H. Jang, J. K. Lee, J. S. Kim, K. H. Park, C. -S. Park, H. M. Kim, K. -E. Pyun, "High performance strain-compensated 1.3 μm PBH-MQW-LD prepared by two step etching," *Proc. ISCS'22*, p.46, 1995.
- [28] M. Rosenzweig, M. Mohrle, H. Duser, and H. Venghaus, "Threshold-current analysis of InGaAs-InGaAsP multi-quantum well separate-confinement lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 27, no. 6, pp.1804-1811, 1991.
- [29] K. Tanaka, K. Wakao, T. Yamamoto, H. Nobuhara, and T. Fujii, "Dependence of differential quantum efficiency on the confinement structure in InGaAs/InGaAsP strained-layer multiple quantum-well lasers," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 5, no. 6, pp.602-605, 1993.
- [30] J. I. Pankove, "Temperature dependence of

- emission efficiency and lasing threshold in laser diodes," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-4, pp.119-122, 1968.
- [31] H. Temkin, D. Colblentz, R. A. Logan, J. P. van der Ziel, T. Tabun-Ek, R. D. Yadvish, and A. M. Sergent, "High temperature characteristics of InGaAsP/InP laser structures," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 62, no. 19, pp.2402-2404, 1993.
- [32] A. A. Bernussi, H. Temkin, D. L. Coblentz, and R. A. Logan, "Effect of barrier recombination on the high temperature performance of quaternary multiquantum well lasers," *Appl. Phys. Lett.* vol. 66, no. 1, pp. 67-69, 1995.
- [33] H. Temkin, D. Colentz and R. A. Logan, "High Temperature performance of strained quaternary quantum well lasers," *IPRM'94*, MA2, 1994.

 저 자 소 개

- | | | | |
|------------|--|------------|--|
| 曹 豪 成(正會員) | 第 32 券 A 編 第 6 號 參照
현재 한국전자통신연구소 화합물소자 연구실 | 朴 景 鉉(正會員) | 第 32 券 A 編 第 6 號 參照
현재 한국전자통신연구소 화합물소자 연구실 |
| 李 重 基(正會員) | 第 32 券 A 編 第 6 號 參照
현재 한국전자통신연구소 화합물소자 연구실 | 張 東 薰(正會員) | 第 32 券 A 編 第 6 號 參照
현재 한국전자통신연구소 화합물소자 연구실 |
| 金 定 洙(正會員) | 第 32 券 A 編 第 6 號 參照
현재 한국전자통신연구소 광전자 연구실 | 朴 基 聖(正會員) | 第 32 券 A 編 第 6 號 參照
현재 한국전자통신연구소 광전자 연구실 |
| 朴 喆 淳(正會員) | 第 31 券 A 編 第 7 號 參照
현재 한국전자통신연구소 화합물소자 연구실 실장 | 金 弘 晚(正會員) | 第 32 券 A 編 第 6 號 參照
현재 한국전자통신연구소 광전자 연구실 실장 |
| 片 廣 毅(正會員) | 第 27 券 第 12 號 參照
현재 한국전자통신연구소 화합물 반도체 연구부 부장 | | |