

論文95-32A-1-19

열전 냉각기가 집적된 레이저 다이오드

(Design and Fabrication of Laser Diode Integrated with Peltier Cooler)

李 相 一 * , 朴 廷 浩 **
(Sang Il Lee, Jung Ho Park)

요 약

열전 Peltier 냉각기와 double-heterostructure mesa-stripe 구조의 레이저 다이오드를 직접화하여 제작하였다. MOCVD 방법을 이용하여 에피층을 성장시켰다. 소자의 메사폭이 $14\mu\text{m}$ 이며 공동 길이가 $380\mu\text{m}$ 인 레이저 다이오드와 Peltier 냉각부를 집적하여 냉각효과를 측정하였다. 열전 냉각 특성은 열전 냉각부에 흘려주는 일정한 전류에 대해 광출력의 증가를 측정함으로써 확인할 수 있다. 레이저에 흘려주는 전류가 250mA 일 때 4.8mW이었던 광출력이 열의 발생에 따라 약 3.8mW까지 떨어졌다가 열전 냉각효과에 의해 4.2mW까지 올라감으로써 약 40% 이상의 광출력이 회복된 것을 알 수 있었다. 따라서 별도의 복잡한 냉각 장치 없이 공정의 개발만으로 냉각이 가능하다는 것이 증명되었다.

Abstract

A double-heterostructure mesa-stripe-geometry laser diode integrated with thermoelectric Peltier cooler has been designed and fabricated. Epi-layers have been grown by metal organic chemical vapor deposition(MOCVD) method. Peltier cooling effect has been measured for devices with a mesa width of $14\mu\text{m}$ and a cavity length of $380\mu\text{m}$. The effects of thermoelectric cooling could be shown by measuring the optical output of the laser with the increase of the current in the thermoelectric cooler. While the input current of the laser was maintained at 250mA, the optical output was decreased from 4.8mW to 3.8mW due to heating, but with the thermoelectric cooler on the optical output power was recovered by more than 40%. The results show that the complicated cooling device is not needed since the cooling can be achieved by the development of the fabrication processing.

* 準會員, ** 正會員, 高麗大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Korea Univ.)

※ 본 논문은 '93년도 교육부 학술연구 조성비에 의해 연구되었음.

接受日字 : 1994年 9月 3日

I. 서 론

응용분야가 광통신 시스템의 광원으로 한정되어있던 반도체 레이저 다이오드가 콤팩트 디스크 플레이어(CDP), 비디오 디스크 플레이어(VDP)의 pick-up등에 사용되는 가정용 기기, 레이저 비임 프린터(LBP),

바 코드 리더(BCR)등의 사무용기기, 그의 의학용, 정밀 측정용 기기의 광원으로 응용분야를 넓혀감에 따라 최근의 반도체 레이저 다이오드 시장은 매년 약 20%의 성장을 보이고 있다.^[11] 따라서 반도체 레이저 다이오드의 구조설계에 대한 연구도 많은 진척을 보이고 있다. 그러나 반도체 레이저의 경우 발광뿐만 아니라 발열이 수반되어 소자의 성능을 떨어뜨리는 결과를 가져오게 되므로 레이저의 구조 설계뿐만 아니라 효율적인 열발산에 관한 연구도 레이저의 특성 향상에 중요한 역할을 한다. 레이저 다이오드의 발열은 주로 활성층 영역에서 nonradiative recombination^[12]에 의한 것으로 이러한 레이저 다이오드의 발열은 소자의 성능을 저하시킬 뿐만아니라 고온에서 장시간 동작시 소자 자체의 파괴와 같은 치명적인 결과를 가져올 수도 있다. 일반적으로 온도의 상승에 따른 레이저 다이오드의 악영향은 다음과 같다.^{[13][14]} 첫째 광출력이 감소하고, 둘째 발진 개시 전류 밀도의 증가 및 발광 파장의 변화이다. 특히 고도의 안정성을 요구하는 광학 시스템이나 레이저 다이오드 어레이, 고출력 레이저 다이오드의 경우 이러한 레이저의 발열에 따른 소자의 성능 저하는 그 정도가 한층 심하다 할 수 있다. 따라서 반도체 레이저 다이오드의 냉각방법에 대한 연구는 소자의 성능향상 뿐만아니라 지속적인 레이저 다이오드의 개발에 필요불가결한 연구의 한 부분을 차지할 것이다.

일반적인 반도체 레이저 다이오드의 냉각방법은 heat sink라는 열전도도가 큰 물질을 소자의 이면에 부착시킴으로써 열을 방출하는 수동적인 열 발산 방법이다. 그러나 레이저 다이오드의 출력이 커짐에 따라, 또한 고도의 안정성을 요구하게 됨에 따라 이러한 수동적인 냉각방법만으로는 좋은 결과를 기대하기 힘들며 보다 능동적인 냉각 방법을 요구하게 된다. 따라서 본 연구에서는 열전현상의 하나인 Peltier 효과를 이용하여 레이저 다이오드와 냉각부가 집적화된 구조를 제안한다. Peltier 효과란 열전현상의 하나로 물질의 물리적인 현상중의 하나이다.^{[5][16][17]} 즉 물질에 전류를 흘려줌에 따라 온도의 차이를 발생시키는 현상으로, 물질마다 Peltier계수의 크기가 결정되고 그 계수가 큰 물질일 수록 적은 전류에 대해서도 큰 온도의 차이를 얻을 수 있다. 일반적으로 Peltier계수는 전기저항에 역비례하는 특성을 보이며 반도체 레이저 다이오드를 성장시키는 GaAs의 경우 도핑농도의 함수로서 0.12~0.09V정도의 큰 값이라는 것이 알려져 있다.^[8] 현재 Peltier효과를 응용한 냉각기는 냉장고 시제품이 나올 정도이며 응용방법에 따라 기존의 레이저구조에 별도의 부가 장치없이 큰 효율의 냉각효과를 얻을 수 있다.

따라서 본연구에서는 GaAs 기판위에 레이저구조를 성장시킨후 메사의 형태로 식각하여 레이저의 양면을 열전냉각부로 집적화하고자 한다. 제안된 구조의 소자를 설계 제작하기 위하여 Peltier효과에 대한 이론적인 근거 및 레이저와 냉각부의 집적화 방법을 제시하고, 열전냉각기의 제작공정 및 각 공정의 조건실험 결과를 알아본다. 또한 제작된 소자의 성능을 실험하기위한 전기적, 광학적 특성 측정 결과를 보여준다.

II. 열전 냉각기가 집적된 레이저 다이오드의 설계

Peltier효과는 열전기 현상의 하나로 열의 흐름과 전류의 상호 관계로부터 나타나는 물리적인 현상의 한 가지로 어떤 시료에 전류를 흘려줌으로써 시료의 온도의 차이를 발생시킬 수 있다. 즉, 두 도체 a와 b가 접합되어서 그 접합부를 통하여 전류가 흐르면, 시간당 일정한 비율로 열이 발생하거나 흡수된다. 이 열 발생을 Q는 전류에 비례하고 전류의 방향이 바뀌면 그 부호도 바뀐다. 그러므로 이러한 관계를 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = \pi_{ab} = -\pi_{ba} \quad (1)$$

여기서 π_{ab} 는 전류가 도체 a에서 b로 흐를때의 Peltier 계수이고, 열 발생을 Q를 Peltier열(Peltier heat)이라 한다.

또한 두 도체가 접합되고 그 접합부에 일정한 온도 차이를 유지하여 줄때 온도 차이에 따라 샘플 양단에 전위차를 발생시킬 수 있는데 이러한 효과를 Seebeck 효과라 하고 그 계수는 α 로 나타낸다.^[7] 따라서 두 계수 사이에는 $\pi = \alpha T$ 라는 관계가 존재하게 된다. 레이저 다이오드의 냉각부로 이용되는 Peltier효과는 주로 저항성 금속-반도체 접합에 의해 발생된다.^[9] n형 반도체 물질인 경우이고 k는 볼츠만 상수, Nd는 불순물의 농도, T는 온도, h는 프랑크 상수일때 상온에서의 Seebeck 계수를 구하면,

$$\alpha_s = -\frac{k}{e} \left[\ln \frac{P_1}{N_d} + 2 \right] \quad (2)$$

$$\text{단, } P_1 = 2 \left(\frac{2\pi m k T}{h^2} \right)^{3/2}$$

p-형 물질에서도 같은 결과를 얻을 수 있다. 이 결과를 이용하여 기판의 도핑농도를 결정할 수 있는데 Peltier계수는 기판의 도핑 농도에 대해 역비례 함을 알 수 있다. 따라서 기판의 도핑 농도가 작을수록

Peltier계수는 큰 값을 갖게 되고 냉각효과도 크다고 볼 수 있다. 그러나 기판의 도핑 농도가 낮을수록 금속과 반도체 접합부분의 접합저항이 커짐에 따라 주열이 상대적으로 커지게 되어 기판의 도핑농도에 대한 냉각률은 트레이드오프가 존재하게 된다. 최대의 냉각효율을 W_m 이라고 할때 이를 구하면,

$$W_m = \frac{\pi^2 \epsilon}{2R} \quad (3)$$

단, $\epsilon = \frac{R}{R+2r}$

여기에서 R은 전기저항을 r은 접촉저항을 나타낸다. 위의 식에서 최대 냉각효율이 Peltier계수 π 와 R의 함수이고, π 와 R은 GaAs의 도핑농도의 함수이다. 따라서 최대의 냉각효율을 얻을 수 있는 기판의 적정 농도를 찾기 위하여 기판의 도핑농도를 변화시켜 계산한 결과를 그림 1에 나타내었고, 기판의 도핑농도가 약 $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 일때 최대의 냉각효과를 얻을 수 있다.

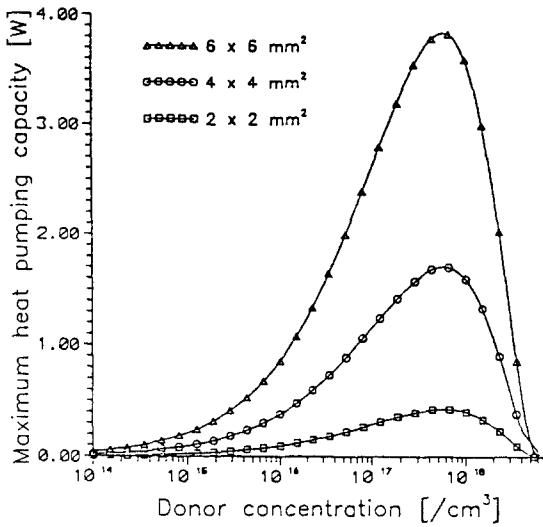


그림 1. GaAs의 도핑 농도에 따른 냉각율 계산
Fig. 1. Calculated maximum heat-pumping capacity.

본 실험에서는 double hetero (DH)구조의 레이저를 사용하였다. DH LD는 기판위에 버퍼층, n-confinelayer, 활성층, p-confinelayer, p-capping층의 총 5층의 에피층으로 이루어져 있다. LD의 전후면은 거울면으로 이루어졌으며, 상하부에 전극이 형성된다. 그림 2는 DH 구조의 LD에 열전 냉각기가 집적된 구조를 보여주고 있다. 기판에 MOCVD 방법을 이용하여 소자의 전체 면적에 레이저구조의 에피층을 형성한다.^[10]

에피층이 형성된 기판에 레이저 부분과 냉각부 부분을 분리하기위하여 레이저 부분을 제외한 나머지 부분을 식각하여야 한다. 식각은 냉각부 부분이 p-n접합이 생기지 않도록 적어도 활성층영역까지는 식각이 이루어져야 한다. 즉 하나의 기판위에 mesa형태의 레이저를 만들어 줌으로써 식각을 통해 레이저와 냉각부를 분리할 수 있다. 냉각효율을 극대화하기 위해서는 레이저 부분을 냉각부 부분이 에워싸는 구조가 이상적이다. 그러나 레이저의 특성상 레이저 양면에 거울면이 형성되어야 하므로 그림 2 (b)와 같이 길이 방향의 크기가 제한되게 된다. 따라서 본 연구에서는 레이저의 길이를 230 μm , 380 μm 의 두 종류에 대해서 제작하여 특성을 살펴해보았다. 또한 냉각부의 크기에 따른 냉각정도를 측정하기 위하여 냉각부의 너비를 450 μm , 900 μm 의 두종류로 나누어 실험하였다.

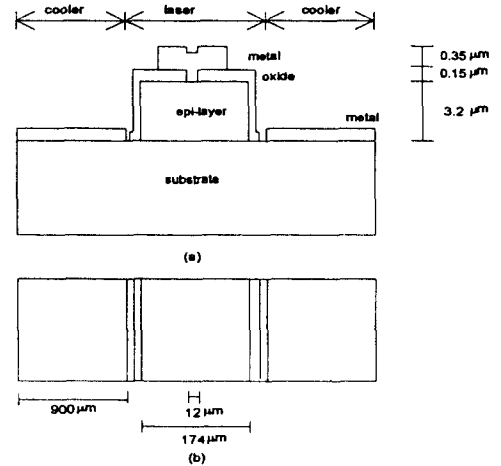


그림 2. 레이저 다이오드에 열전냉각기의 집적화 방법

- (a) 설계된 소자의 단면
- (b) 설계된 소자의 평면

Fig. 2. Design of laser diode integrated with Peltier cooler.

- (a) Cross sectional view of a device
- (b) Top view of a device

III. 소자의 제작

소자의 제작은 레이저 구조의 에피층 성장, 레이저 부분과 냉각부 부분을 분리하기위한 메사의 형성, 절연막증착, 냉각부의 전극형성, 레이저부의 전극형성, 본딩과 패키징 공정으로 이루어진다. 각각의 단위공정에 대해서 살펴보면 다음과 같다.

앞 장의 설계에서 살펴본 바와 같이 최적의 냉각효과를 얻을 수 있는 $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 의 불순물 농도를 갖는 기판 위에 에피층을 형성하였고 각각의 에피층의 종류와 도핑 농도는 표 1과 같다.¹¹⁾ 에피층의 성장온도 결정성과 두께 조절이 용이한 MOCVD 방법을 이용하였고, 그림 3은 성장된 에피층의 모습을 SEM 사진을 통해 보이고 있다.

표 1. DH구조의 에피층 성장
Table 1. A Structure of epilayer

구 조	형	도핑농도 (cm^{-3})	도판트	두께 (μm)
capping	p-GaAs	1×10^{19}	Zn	1
confine	p-AlGaAs	7×10^{17}	Zn	1
활성층	undoped	$< 1 \times 10^{15}$		0.14
confine	n-AlGaAs	1×10^{18}	Si	1
buffer	n-GaAs	1×10^{18}	Si	2
기 판	n-GaAs	1×10^{18}	Si	

AlGaAs의 Al mole fraction : 0.27

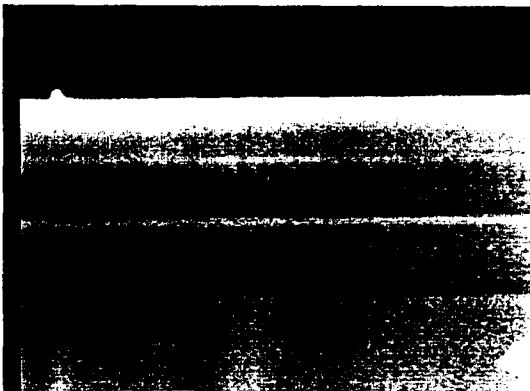


그림 3. 에피층의 성장 결과 사진
Fig. 3. SEM photograph of the epi-layer.

다음 공정은 메사의 형성으로서 일반적인 레이저의 경우에서 가지는 활성층의 너비 조절 역할 뿐만 아니라 레이저부와 냉각부를 분리시키는 역할을 하게 되므로 세심한 주의가 필요하다. 메사의 폭은 $170\mu\text{m}$ 이고 높이는 $3.2\mu\text{m}$ 이며 $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{DI water}(1:1:10)$ 용액을 이용하여 패터닝하였다. 산화막은 전류를 차단하기 위한 절연막으로서 역할을 하게 되며 이를 위해 1500\AA 두께의 산화막을 350°C 에서 PECVD 방법을

이용하여 증착하였다. 전극 형성은 n형 기판과 p형 기판을 별도로 두번에 걸쳐 이루어진다. n형 GaAs의 경우 Ni/Ge/Au/Ni/Ti/Au를 $100/400/800/200/1500/1200\text{\AA}$ 의 두께로 총 4200\AA 증착하였으며 E-beam evaporator를 사용하였다. 전극 형성 후 측정된 접촉 저항은 $0.4 \Omega\text{-cm}$ 로 낮은 접촉저항 값을 나타내었다. p형 GaAs의 경우에는 AuZn/Au를 $1500\text{\AA}/2000\text{\AA}$, 총 3500\AA 증착하였고 thermal evaporator를 이용하였다.

마지막으로 패키징을 하여 소자를 완성하였으며 최종 완성된 소자의 사진을 그림 4에 제시하였다.



그림 4. 완성된 소자의 사진
Fig. 4. A photograph of a device.

IV. 특성 측정 결과 및 고찰

1. 레이저 다이오드의 측정 결과

레이저 다이오드의 특성은 크게 두가지로 나누어 볼 수 있다. 첫째로 소자의 전기적 특성으로 전류 대 전압 곡선을 측정하여 p-n 접합이 이루어졌는지를 확인하여야 하며, 둘째로 광학적 특성을 알아보기 위하여 전류 대 광출력 특성 및 효율과 파장과의 관계를 측정하는 것이다. 그림 5는 제작된 소자의 전기적 특성으로 전류와 전압의 관계와 전류와 광출력의 관계를 동시에 나타낸 측정 결과이다.

그림 5에서 보여 주는 바와 같이 빌트-인 전압(Vbi)은 2V로 이형 접합에서 어브러트한 p-n접합이 이루어졌음을 알 수 있다.

그림 6은 소자의 광학적 특성 측정 결과로 전류대 광출력의 관계와 효율의 측정 결과이다. 그림 6에서 보여주듯이 제작된 소자의 발전 계수 전류는 199.2mA

이고 효율을 약 28%임을 알 수 있다.

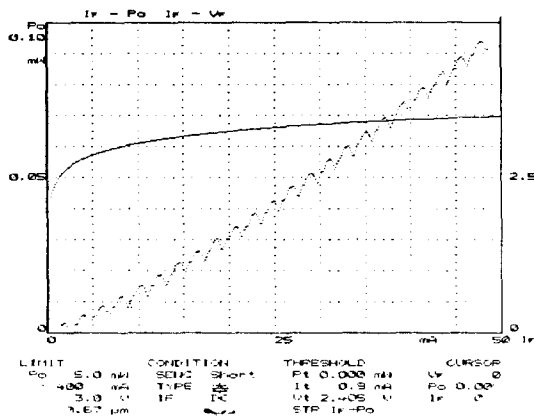


그림 5. 레이저 다이오드의 전기적 특성
Fig. 5. Electrical characteristics of laser diode.

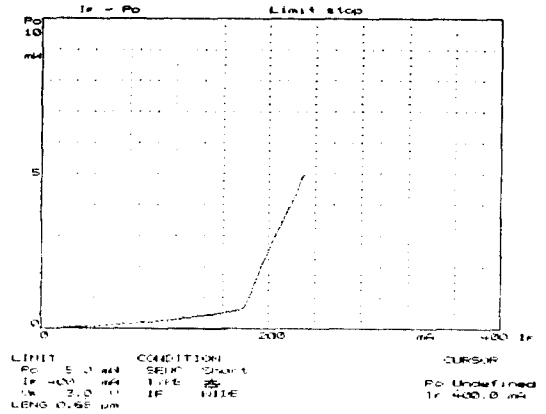


그림 7. 열전 냉각측정을 위한 소자의 I-L 특성
Fig. 7. I-L curve for measuring thermoelectric cooling effects.

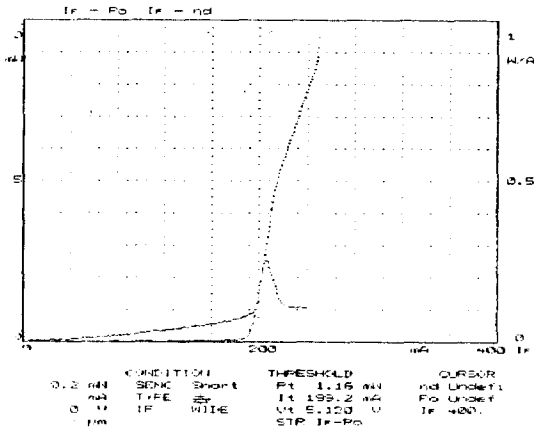


그림 6. 소자의 광학적 특성 측정 결과
Fig. 6. Optical characteristics of laser diode.

2. 열전 냉각 특성 측정

서론에서 밝힌 바와 같이 레이저 다이오드의 활성층에서 발생하는 열은 발진 개시 전류의 증가, 스펙트럼 폭의 증가 및 파장 이동, 광출력의 감소와 같은 소자의 성능저하를 가져 온다. 그림 7은 소자의 열전 냉각 정도를 측정하기 위한 소자의 I-L 특성 측정 결과이다. 측정결과에서 알 수 있듯이 이 소자는 250mA의 전류에서 4.8mW의 광출력을 얻을 수 있었다.

그림 8은 열전냉각에 따른 광출력의 변화를 측정된 결과이다.

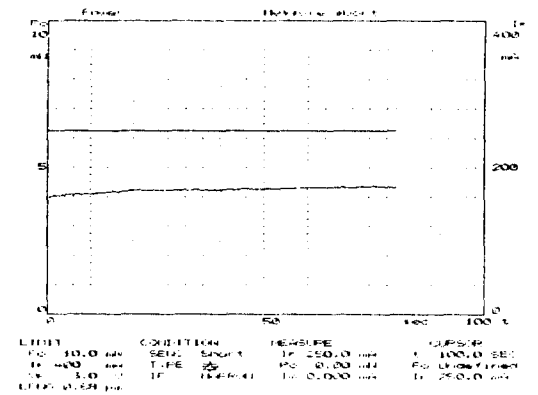


그림 8. 열전 냉각 특성 측정
Fig. 8. Measured thermoelectric cooling effects.

측정결과에서 위의 선은 레이저에 흘려준 전류값을 나타내며 250mA를 유지하고 있음을 알 수 있다. 아래 선은 이 상태에서 발진하는 레이저의 광출력을 표시하고 있다. 결과에서 알 수 있듯이 광출력이 시간에 따라 증가함을 볼 수 있다. 이 효과는 열전 냉각기에 전류를 흘려줌에 따라 소자의 온도를 떨어뜨린 결과이다. 250 mA의 전류에서 초기 4.8mW였던 광출력이 온도상승에 따라 3.8mW까지 떨어졌으며, 열전냉각부에 전류를 흘려줌에 따라 80초후 4.2mW까지 회복됨을 볼 수 있다. 즉 레이저의 발열에 따른 광출력의 감소가 열전 냉각 효과에 의해 약 40% 이상 회복된 것을 알 수 있다. 이때 열전 냉각부에 흘려준 전류는 최대 0.6A로 계산

결과^[12]로부터 최대 열방출 가능전류인 1.2A보다 작은 값이다. 이는 열전냉각부에 흘러주고자한 전류가 레이저에 영향을 준 것으로 소자의 구조 개선에 따라 누설전류를 최소화할 수 있다면 더큰 냉각효과를 기대할 수 있다.

V. 결 론

레이저 다이오드에서 활성층 영역의 발열은 레이저 다이오드의 성능을 크게 떨어뜨린다. 따라서 본 논문에서는 활성층 영역의 온도를 감소시키기 위하여 DH 구조의 레이저 다이오드에 열전 냉각 장치를 집적화 하였다. 제작된 레이저 다이오드는 다음과 같다. 먼저 n형 기판 위에 DH 구조의 에피층을 MOCVD로 성장시킨후 레이저 부분과 열전 냉각부 부분을 분리하기 위하여 약 3.2 μ m의 메사형태로 식각하였다. 식각이 끝난 후 레이저에 홀릴 전류를 제한하기 위하여 산화막층 형성 후에 레이저와 냉각부에 전류를 흘려 주기 위하여 전극을 형성하고 공정이 완료된 소자의 특성을 측정하기 위하여 패키징 공정을 하였다. 소자의 특성 측정은 전기적 특성 측정과 광학적 특성 측정으로 나누어 실시되었으며, 열전 냉각효과에 따른 레이저의 성능 향상을 볼 수 있었다. 레이저의 빌트-인 전압은 약 2V로 약간 크게 측정 되었으나 어브립트한 p-n접합은 이루어졌다. 측정된 레이저의 발진 개시 전류는 소자에 따라 약간씩 다르게 측정되었으나 약 150mA에서 230mA까지 측정되었다. 광출력은 발진 개시 전류 이상인 300mA에서 약 10mA정도였다. 열전 냉각특성은 일정한 전류에 대해 광출력의 증감을 측정함으로써 알 수 있었다. 250mA에서 4.8mW이었던 광출력이 열의 발생에 따라 약 3.8mW까지 출력이 떨어졌으며, 열전 냉각효과에 의해 4.2mW까지 광출력이 회복됨을 보였다.

제작된 소자의 장점은 별도의 복잡한 냉각 장치 없이 냉각이 가능하다는 것과 응용분야가 매우 넓다는 것이다. 앞으로 진행되어야 할 공정 개발은 레이저의 경면형성에 의한 냉각부의 면적 제한을 없앨 수 있는 surface emitting 레이저 다이오드와 같은 소자의 응용이며, 이외에도 고효율 레이저 다이오드, 레이저 다이오드 어레이 등에서의 응용이 가능하다. 또한 냉각부와 레이저 활성층과의 밀착화로 냉각효율을 높힐 수 있는 공정개발 또한 요구된다 할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] D. Kales, Laser Focus World, Jan. 1989, p95.
- [2] Chinlon Lin, Optoelectronic Technology and Light Wave Communication Systems. Van Nostrand Reinhold, 1989 p212.
- [3] C.H. Gooch, Gallium Arsenide Lasers. New York : Willey, 1960, p109
- [4] H.c. Casey ,J.S. Somekh and Ilegens, Appl. Phys. Lett., vol.27,pp142, Aug. 1975.
- [5] 심재동, 현도빈, 하현필, 김준명, Thermoelectric Device의 개발및 응용에 관한 연구, 교육부 학술 연구 보고서, 1989
- [6] J.J. Brophy, Electronic Process in Materials. McGrow-Hill, 1963, p233.
- [7] T.C. Harman and J.M. Honig. Thermoelectric and Thermomagnetic Effects and Applications. McGrow-Hill 1967.
- [8] C.M. Cortes and R.G. Hunsperger "Effects of Contact Resistance and Dopant Concentration in Metal-Semiconductor Thermoelectric Cooler", *IEEE J.Electron Device* vol. ED-27, p521, Mar. 1980.
- [9] A. van der Ziel, Solid State Physical Electronics. Englewood Cliffs, NJ:Pren-tice-Hall, 1976.
- [10] R.D. Dupuis and P.P. Dapkus "Continuous room-temperature operation of Ga(1-x)AlxAs-GaAs double-heterostructure lasers grown by metalorganic chemical vapor deposition", Appl. Phys. Lett., vol32, p406, Apr.1978.
- [11] H.C. Casey,Jr. and M.B. Panish, Heterostructure Lasers, Academic press, 1978.
- [12] 김제한, GaAs 열전 냉각기의 특성과 레이저 다이오드에의 응용, 고려대학교 학위논문, p36, 1993

저 자 소 개

朴 廷 浩(正會員) 제 31권 A편 제 4호 참조
현재 고려대학교 전자공학과 부교수

李 相 一(正會員) 1964년 5월 24일 생. 1985년 3월
~ 1991년 8월 고려대학교 전자공
학과(공학사). 1992년 3월 ~ 1994
년 2월 고려대학교 전자공학과(공
학석사). 1994년 3월 ~ 현재 (주)
데이콤 근무중