

780nm InGaAsP/GaAs LD의 단일 모드 동작을 위한 구조 설계에 관한 연구

안세경* · 하홍춘* · 박윤희* · 홍창희**

A Study on the Design of Structure for Single Mode Operation of 780nm InGaAsP/GaAs Laser Diode

An Se-kyung, Ha Hong-Choon, Park Yoon-Ho, Hong Tchang-Hee

Abstract

We have designed active layer lasing with single mode in InGaAsP/GaAs BH semiconductor laser.

The results have been derived as follows: the condition $n_1 > n_{eq} > n_2$ and $n_{eq} > n > n_3$ to confine modes to the transverse and the lateral direction in cladding layer and active layer acting in the range 670nm~780nm, the relation for thickness and width of active layer lasing with single mode, and the fact that the optical confinement coefficient is 30~60%.

The optimal design condition has been found from the above results.

1. 서 론

최근 들어 광전자산업의 총아라 불려지는 CD, 레이저프린터 및 바코드리더 장치들에 대한 급진적인 발전 보급은 초소형, 저소비전력 및 고신뢰도를 갖는 AlGaAs/GaAs계의 반도체레이저 개발에 힘입은 바 크다. 역사적으로 볼 때, 이 계의 반도체레이저는 850nm대의 광섬유통신의 광원으로서 1970년대 부터 각광을 받기 시작하여 1970년대 중반 이후 부터는 실제 광섬유통신에 사용할 수 있을 정도로 발전하게 되었다. 1980년대에

* 한국해양대학교 대학원 전자통신공학과

** 한국해양대학교 이공대학 전자통신공학과

들어서면서 부터 통신용을 목표로 하여 개발되었던 AlGaAs의 제작기술은 적외선 보다는 오히려 가시광 영역 쪽으로 이동되어 1980년 후반 부터는 상기 언급한 CD등의 광원으로 이용되게 되었다. 현재 CD 및 레이저프린터에 사용되고 있는AlGaAs계의 반도체레이저는 가시광선 파장대역의 가장 장파장 쪽인 780nm이다. 그런데 장차 Si위에 GaAs를 성장시킨 기판을 사용하여 광소자를 제작하게 되는 경우를 생각해 볼 때, 격자정합의 수월성 등의 이유 때문에 780nm파장에 대한 레이저도 AlGaAs계 보다는 InGaAsP계가 유리해 질 것으로 생각된다.

이러한 상황들을 비춰보아 InGaAsP/GaAs계의 반도체레이저를 제작할 때, 단일모드로 발진하는 설계규격이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 BH형 반도체레이저에 대해 단일모드로 발진하는 활성층을 설계하였다.

2. 본 론

본 연구에서 목표로 하는 반도체레이저는 0.67 μ m에서 0.78 μ m파장에 걸쳐 동작하는 클래드층과 활성층을 가지는 이중접합구조의 BH레이저를 설계 모델로 한다. 보통 가시광 영역의 AlGaAs계 반도체레이저에 있어 활성층은 0.1~0.2 μ m, 클래드층은 2~3 μ m이다. 이와 같은 규격은 광이 충분히 활성층 안에 가두어지면서 발진임계 전류값을 최소로하기 위한 설계 규격이다.

본 연구의 InGaAsP계의 레이저인 경우에도 규격은 이 정도의 범위 내에 존재할 것으로 예상되지만, AlGaAs계와 InGaAsP계의 굴절율에 있어 다소 차이가 있으므로 이론적인 검토가 뒤따라야 할 것으로 생각된다. 활성층의 두께는 공진기내의 파장($\lambda = \lambda_0/n_{eq} = 0.78\mu\text{m}/3.6 = 0.22\mu\text{m}$) 보다 작으므로 두께방향으로 기본모드만 존재할 것으로 예상되기 때문에 기본모드에 대해서만 해석을 한다. 공진기내의 전파모드는 TE모드와 TM모드가 존재하지만 TM모드는 TE모드보다 단면 반사율이 작기 때문에 레이저 발진은 거의 TE모드만 일어난다.¹⁾ 따라서 TE모드에 대해 본 연구에서는 중점적으로 취급한다.

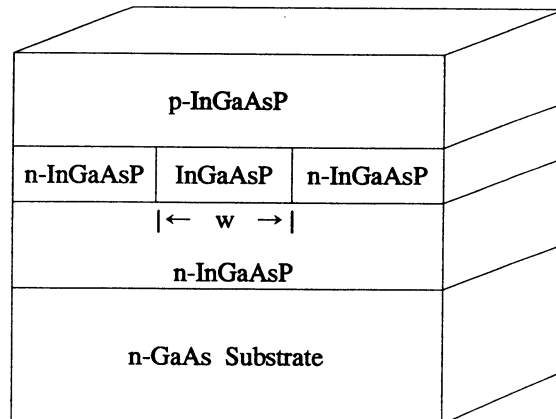
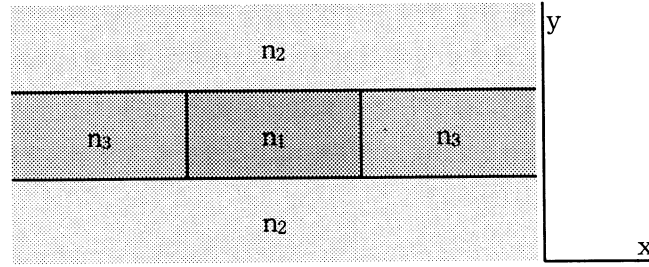
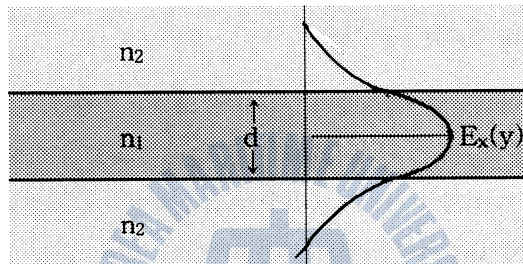


그림 1. 가시광 BH 반도체레이저의 개략적인 구조

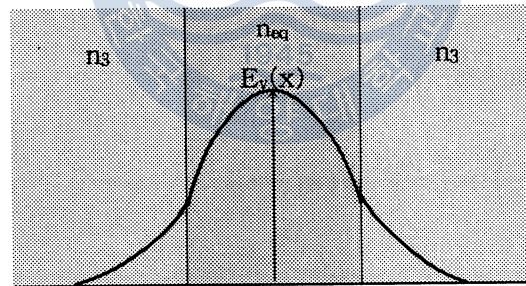
780nm InGaAsP/GaAs LD의 단일 모드 동작을 위한 구조 설계에 관한 연구



(a) BH 단면



(b) 횡방향



(c) 측방향

그림 2. 이차원적인 모델링

2.1 모드해석

그림 1은 본 연구에서 횡방향 및 측방향으로 단일모드로 동작하는 가시광 BH 반도체레이저를 설계하기 위해 가상적으로 구현한 구조로써 횡방향에서의 클래드층 재료는 에너지 갭이 1.85eV ($\lambda=670\text{nm}$)인 재료로 고정시켰고, 활성층은 캐리어를 충분히 가두기 위해 클래드층의 에너지갭 보다 0.2eV정도 작은 재료를 사용하였다. 따라서 본 연구에서는 이론 해석상 에너지 갭이 1.54eV ($\lambda=780\text{nm}$)인 재료를 사용하였다.

모드분포는 Maxwell방정식의 해로부터 얻어지며, 반도체레이저 제작에 사용된 여러 층들의 굴절율과 두께, 그리고 폭에 의존한다. 모드해석에 있어 실질적으로 고려되는 층은 4~5개이지만 활성층 상하의 클래드층이 충분히 두껍다고 가정하면 그림 2와 같이 모델링을 할 수 있다.

Maxwell방정식으로 부터 그림 2의 3층 도파로에 대한 횡방향에 대한 모드분포방정식과 축방향에 대한 모드분포방정식은 다음과 같이 주어진다.²⁾

$$\frac{\partial^2 E_x(y)}{\partial y^2} + k_0^2(n_1^2 - n_{eq}^2)E_x(y) = 0 \quad (2-1)$$

$$\frac{\partial^2 E_x(y)}{\partial y^2} + k_0^2(n_{eq}^2 - n_3^2)E_y(x) = 0 \quad (2-2)$$

여기서 n_1, n_2 , 그리고 n_3 는 각각 활성층, 횡방향의 클래드층, 그리고 축방향의 클래드층에 대한 굴절율이며, n_{eq} 는 n_1, n_2, d 에 의해 결정되는 등가굴절율($n_{eq} = \beta/k_0$)이다. 그리고 β 는 길이방향에 대한 전파정수이다.

경계조건은 유전체 경계면에서 전계성분과 그 도함수가 연속이어야 한다는 것과 도파모드에 대한 경계조건은 y 가 무한대가 될 때 전계는 0이 되어야 한다는 것이다.

식 (2-1)과 식 (2-2)의 방정식을 풀어 경계조건에 대입하면 다음과 같은 횡방향과 축방향에 대한 고유치 방정식이 얻어진다.

$$\frac{\gamma d}{2} = \frac{kd}{2} \times \tan\left(\frac{kd}{2}\right) \quad (2-3a)$$

$$\left(\frac{kd}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma d}{2}\right)^2 = \left(\frac{k_0 d}{2}\right)^2 (n_1^2 - n_2^2) \quad (2-3b)$$

$$k = k_0 \sqrt{n_1^2 - n_{eq}^2} \quad (2-3c)$$

$$\gamma = k_0 \sqrt{n_{eq}^2 - n_2^2} \quad (2-3b)$$

$$\frac{bw}{2} = \frac{aw}{2} \times \tan\left(\frac{aw}{2}\right) \quad (2-4a)$$

$$\left(\frac{aw}{2}\right)^2 + \left(\frac{bw}{2}\right)^2 = \left(\frac{k_0 w}{2}\right)^2 (n_{eq}^2 - n_3^2) \quad (2-4b)$$

$$a^2 = k_0^2 \sqrt{n_{eq}^2 - n^2} \quad (2-4c)$$

$$b^2 = k_0^2 \sqrt{n^2 - n_3^2} \quad (2-4d)$$

780nm InGaAsP/GaAs LD의 단일 모드 동작을 위한 구조 설계에 관한 연구

κ 와 γ 는 각각 활성층과 클래드층의 횡방향에 대한 전파정수이며, a 와 b 는 각각 활성층과 클래드층의 측방향에 대한 전파정수이고 n 은 모드가 활성층에서 느끼는 굴절율이다. 횡방향과 측방향에서 모드가 활성층으로 가두어지기 위해서는 다음 조건을 만족해야 한다.

$$n_1 > n_{eq} > n_2 \quad (2-5)$$

$$n_{eq} > n > n_3 \quad (2-6)$$

식 (2-3b)은 $\kappa d/2 - \gamma d/2$ 평면에서 원을 나타내는 방정식으로서 식 (2-3a)와 함께 사용하여 고유치방정식의 해를 구할 수 있으며, 이 해로부터 횡모드 해석에서 중요한 등가굴절율을 구할 수 있다. 여기에서 계산된 등가굴절율을 이용하여 측방향에 대한 고유치방정식, 식 (2-4)에 대한 해를 구할 수 있다.

그림 3은 활성층의 발진파장이 각각 730nm, 750nm, 780nm인 반도체레이저에서 식 (2-3)으로 부터 계산한 활성층의 등가굴절율을 나타내었다. 여기에서 각층의 굴절율은 MSEO³⁾ 방법으로 계산하였으며, 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 활성층의 굴절율은 3.62였으며, 횡방향에서의 클래드층 굴절율은 3.36이었다.

식 (2-3)으로 부터 계산된 등가굴절율을 이용하여 측방향에 있어서 모드가 활성층 내로 가두어지기 위한 조건인 식 (2-6)으로 부터 계산된 결과를 그림 5에 나타내었다. 이 그림으로 부터 활성층의 두께가 0.1 μ m, 0.2 μ m이면 측방향의 클래드층은 각각 에너지 갭이 1.74eV, 1.67eV 이상의 재료를 선택해야만 모드가 활성층으로 가두어짐을 알 수 있다.

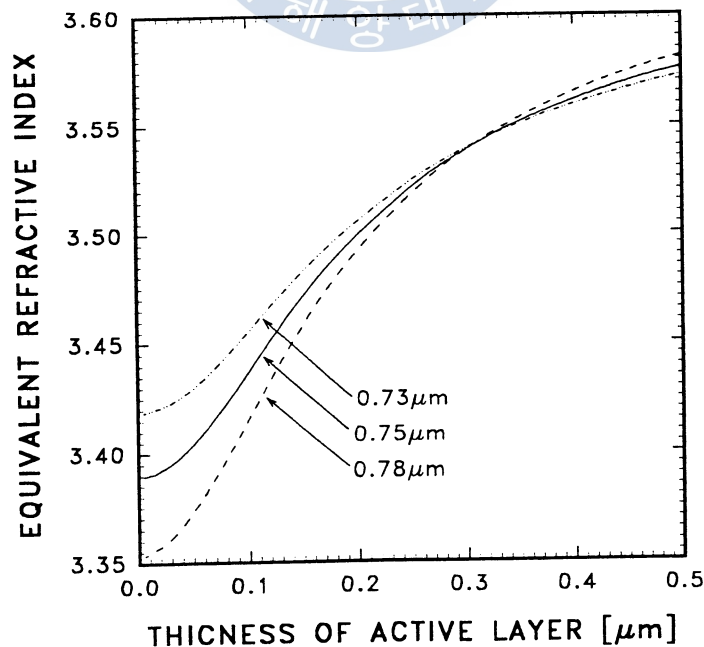


그림 3. 활성층의 등가굴절율

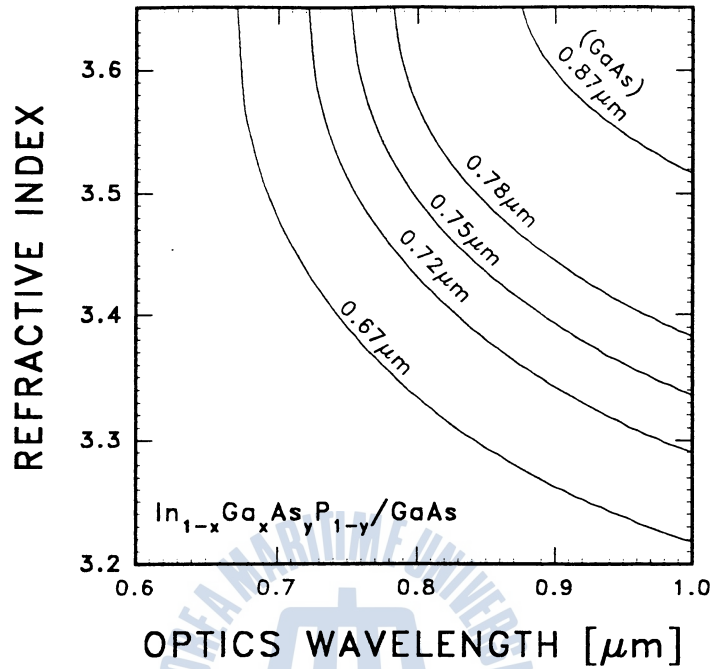


그림 4. 주입파장에 대한 굴절율

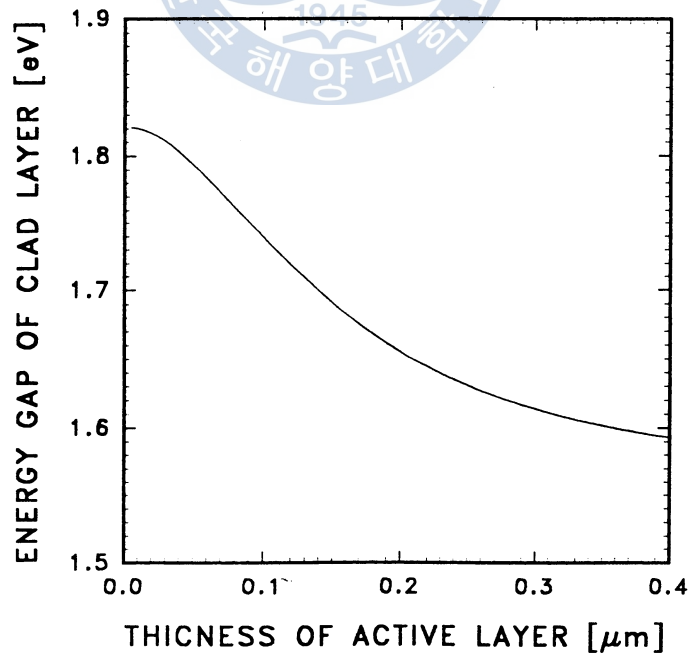


그림 5. 측방향에서의 모드차단 조건

2.2 단일모드 발진조건

횡방향에 있어서 식 (2-3a)의 곡선과 식 (2-3b)의 원과의 교차점은 TE모드의 p번째에 대한 κ_p, γ_p 값을 얻는다. 삼각함수의 주기성으로 많은 해가 나타나는데 허용되는 도파모드의 수는 $\gamma \leq 0$ 인 경우 클래드층에서 전계분포 $E_x(y)$ 가 지수함수 적으로 증가하므로 발산해를 가진다. 따라서 차단조건은 $\gamma=0$, 즉 다음 식을 만족할 때 나타난다.⁴⁾

$$kd = p\pi \quad (2-7)$$

$\gamma=0$ 일 때 식 (2-3)을 사용하여 κ 를 대입하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$D = p\pi \quad (2-8)$$

단, D 는 $k_0 d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ 이며 반도체레이저에서 단일횡모드만을 허용하는 규격화된 도파로 두께이다. 여기에서 $D < \pi$ 이면 도파로는 기본 TE모드만을 가지게 되므로 이 조건을 만족시키면 이중이종접합레이저는 단일횡모드로 발진하게 된다.

식 (2-8)에 $k_0 = 2\pi/\lambda$ 를 대입하면 단일모드로 발진하기 위한 활성층의 두께에 대한 다음의 조건식이 얻어진다.

$$d < \frac{\lambda}{2\sqrt{n_1^2 - n_2^2}} \quad [\mu\text{m}] \quad (2-9)$$

마찬가지 방법으로 측방향에 있어서 단일모드로 발진하기 위한 활성층의 폭에 대한 조건식은 다음과 같이 주어진다.

$$w < \frac{\lambda}{2\sqrt{n_{eq}^2 - n_3^2}} \quad [\mu\text{m}] \quad (2-10)$$

식 (2-9)의 조건을 이용하여 횡방향에서 단일모드로 발진하기 위한 조건을 구한 결과를 그림 6에 나타내었다. 일반적으로 활성층의 두께는 $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 인데, 그림에서 알 수 있듯이 횡방향에서의 클래드층을 1.85eV 인 재료를 이용하고 활성층의 재료를 클래드층 보다 에너지 갭이 0.2eV 정도 작은 재료를 사용하면 이 영역에 대해서 모두 단일모드로 발진함을 알 수 있다.

그림 7은 단일모드로 발진하기 위한 활성층의 두께와 폭의 관계를 나타낸 것으로 활성층의 두께를 $0.1 \mu\text{m}$ 로 하였을 경우, 일반적인 활성층의 폭을 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 로 하고, 측방향의 클래드층은 에너지 갭이 $1.74 \sim 1.76 \text{eV}$ 인 재료를 사용하면 횡방향 및 측방향으로 단일모드만 발진하는 레이저를 제작할 수 있다. 그리고 활성층의 두께를 $0.2 \mu\text{m}$ 로 제작할 때에는 측방향의 클래드층을 $1.65 \sim 1.66 \text{eV}$ 인 재료를 사용하면 된다는 것을 알 수 있다.

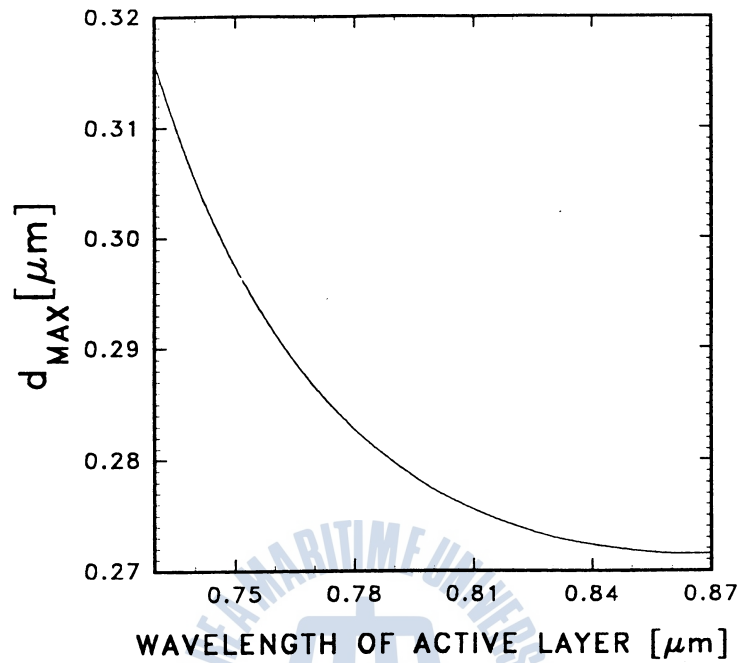


그림 6. 횡방향의 단일모드 동작을 위한 활성층의 최대 두께

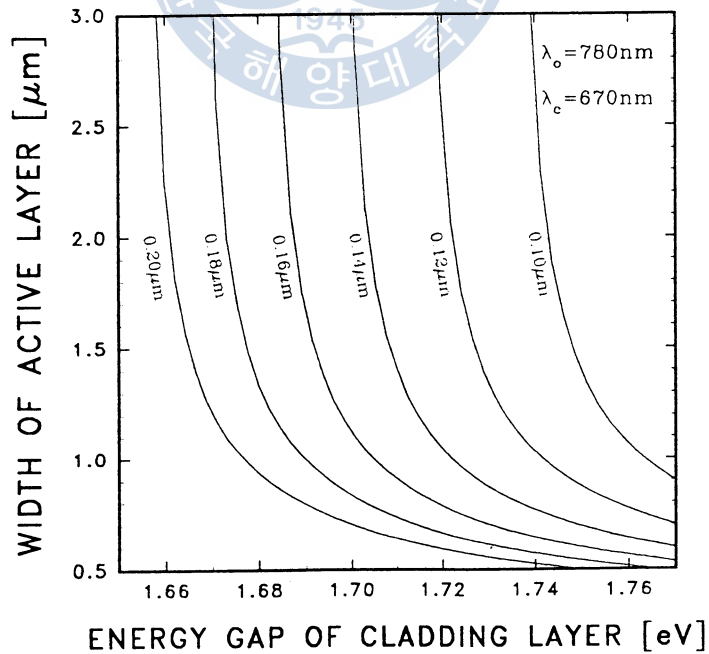


그림 7. 단일모드로 발진하기 위한 활성층의 두께와 폭과의 관계

2.3 광가둠계수

반도체에 있어 도파되는 모드의 전 광전력 중에 활성층 내로 도파되는 광전력의 비율은 발진개시 전류밀도에 큰 영향을 미치며 횡방향에 있어서 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\Gamma_T = \frac{1 + \frac{2\gamma d}{D^2}}{1 + \frac{2}{\gamma d}} \quad (2-11)$$

식 (2-11)에서 κ 와 γ 값은 식 (2-3)의 고유치해로부터 구해야 하는데, 본 연구에서는 이러한 번거로움을 피하고자 다음 식과 같이 광가둠계수를 근사시켰다.⁵⁾

$$\Gamma_T \cong \frac{D^2}{2 + D^2} \quad (2-12)$$

그림 8은 활성층 두께에 따른 광가둠계수를 나타내었다. 레이저의 발진파장이 780nm일 경우 그림으로 부터 활성층 두께가 0.1 μ m일 때 37%, 0.2 μ m일 때 70%정도임을 알 수 있다. 이 값은 식 (2-12)의 계산값과 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

그러나 측방향에 있어서의 광가둠계수는 활성층의 두께에 따른 등가굴절율의 변화와 연관되므로 복잡한 계산을 통해서 구할 수는 있으나 본 연구에서는 $n_{eq}^2 \cong n_2^2 + \Gamma_T(n_1^2 - n_2^2)$ ⁵⁾ 과 식 (2-12)의 관계식을 이용하여 광가둠계수를 구하였다.

$$\Gamma_L \cong \frac{W^2}{2 + W^2} \quad (2-13)$$

$$W \cong k_o w \sqrt{n_2^2 + (n_1^2 - n_2^2) \left(\frac{121d^2}{2 + 121d^2} \right)} - n_3^2 \quad (2-14)$$

W 는 반도체레이저에서 단일 측모드만을 허용하는 규격화된 도파로 두께이다. 그리고 활성층 내로 가두어 지는 전체 광가둠계수는 다음과 같이 주어진다.

$$\Gamma = \Gamma_T \Gamma_L \quad (2-15)$$

그림 9는 활성층의 두께를 0.1 μ m와 0.2 μ m로 하고, 이때 측방향의 클래드층의 재료를 각각 1.75eV와 1.66eV로 하였을 경우 광가둠계수를 구하였다. 활성층의 두께가 0.1~0.2 μ m일 때, 단일모드로 발진하는 활성층의 폭 규격에서 광이 측방향으로 거의 90%정도 갇힌다는 것을 알 수 있다. 따라서 횡방향 및 측방향에서 단일모드로 발진하는 활성층의 규격일 때, 전체 광가둠계수는 약 30~60% 정도인 것을 그림 8과 9에서 알 수 있다

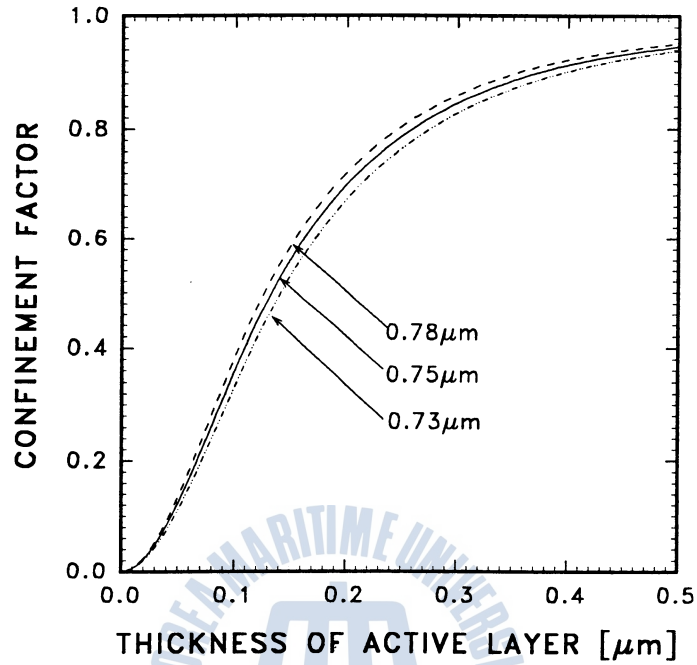


그림 8. 활성층 두께에 따른 광가둠계수

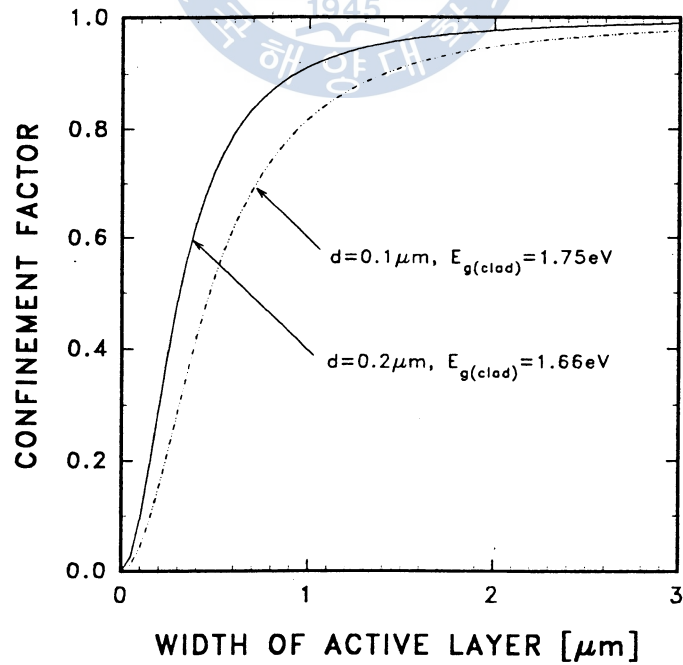


그림 9. 활성층 폭에 따른 광가둠계수

3. 결 론

본 연구에서 단파장대의 InGaAsP계 레이저를 제작할 때, 단일모드로 발진하기 위한 활성층 규격을 계산하였다. 활성층의 발진파장이 780nm이고, 횡방향에서의 클래드층을 $E_g=1.85\text{eV}$ ($\lambda=670\text{nm}$)인 재료로 하였을 경우, 일반적으로 설계되는 두께영역 $0.1\sim 0.2\mu\text{m}$ 에서 단일모드로 발진함을 알 수 있었으며, 측방향에서는 활성층의 두께에 따라 단일모드로 발진하기 위한 규격이 변하는데 있어, 두께가 $0.1\mu\text{m}$ 일 때, 일반적인 제작시 설계되는 폭 $1\sim 2\mu\text{m}$ 에서 단일측모드만 존재하기 위해서 측방향의 클래드층은 에너지 갭이 $1.74\sim 1.76\text{eV}$ 인 재료로 해야하며, 또 두께가 $0.2\mu\text{m}$ 일 때에는 에너지 갭이 $1.65\sim 1.66\text{eV}$ 인 재료를 사용하면 단일 횡모드 및 측모드를 가지는 반도체레이저를 제작할 수 있을 것으로 생각된다. 그리고 $d=0.1\mu\text{m}$ 일 때에는 횡방향에서는 37%, 측방향에서는 대략 90%정도 광이 갇히며, $d=0.2\mu\text{m}$ 일 때에는 횡방향에서 70%, 측방향에서는 90%이상 광이 갇힌다. 따라서 단일모드로 발진하는 공진기 규격에서 광은 적게는 30%, 많게는 60%정도 갇힘을 알 수 있었다.

참고문헌

- 1) 伊藤良一, 中村道治 共編 "半導體レザ," 倍風館, 1989, Chapt.4
- 2) 하홍춘, 조호성, 황상구, 홍창희, "InGaAsP/GaAs 단파장 단일모드 반도체레이저 설계에 관한 연구," 부산·경남지부 대한전자공학회 하계학술대회 논문집 제 1권, 1993
- 3) J.Buss and M.J.Adams, "Phase and group indices for double heterostructure laser," Solid State and Electron Device, Vol.3, pp.189~195, 1979
- 4) G.P.Agrawal and N.K.Dutta, "Long-wavelength semiconductor lasers, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1986, Chapt.2
- 5) Botes, D.IEEE J.Quantum Electron. QE-17, 178 1981

알 림

이 연구는 과학재단의 91~93년도 협력연구과제의 연구비 지원을 받았습니다.

