

경사형 굴절도파구조를 갖는 레이저 다이오드의 호울 버닝 효과

The effect of hold burning of graded-index-guide structure laser diode

오환술*

(Hwan-Sool Oh)

요 약

AlGaAs/GaAs 이중접합구조 레이저 다이오드의 활성층 두께를 변화시킬때 스트라이프 폭과 광출력에 미치는 영향을 해석하였다. 안정된 단일발진 도파모우드를 위해서는 $R > 0$ 되어야 함을 밝혔다. 고출력에서 캐리어분포와 이득분포에 대해 공간적 호울버닝 현상이 일어났고, 이는 출력을 고정시키고 스트라이프폭만을 채널폭보다 크게 하여도 발생하였다.

ABSTRACT

The characteristics of AlGaAs/GaAs double heterostructure laser diode with lateral thickness variation in the active region, which related to the stripe width and the optical power, has been analyzed.

For stable and single guiding mode operation, it is important that the value of R must be larger than zero. It is observed that the phenomena of spatial hole burning in the carrier and gain distribution appear at high optical power. And also spatial hole burning is occurred when stripe width is larger than the channel width.

1. 서 론

광통신용 광원인 레이저다이오드는 최근 레이저프린터, OMR 판독기, 광디스크 등 응용범위가 증가되고 있다. 또 최근 레이저다이

오드에 관한 연구도 단일모우드와 고출력용으로 진행되고 있다[1, 2]. 레이저다이오드의 구조는 스트라이프구조와 굴절도파구조가 있으며 전자는 이득도파로이며 높은 양자효율을 갖으나 임계전류가 높다[3]. 본 연구는 이를 보완한 굴절도파구조로서 활성층을 경사지게 하여 주입전류에 의한 실효굴절율 변화에 의한 캐리어분포와 이득분포를 모의

* 건국대학교 전자공학과

모델에 적용하여 해석하였다.

2. 해 석

기존의 스트라이프구조는 각층의 두께를 평탄하게 액상성장시킨 것이며 [4, 5] 본 연구에서 고찰한 모의모델은 그림 1과 같이 활성층을 경사지게 하여 두께의 변화를 주었다. 이 두께는 가우시안분포로 다음식과 같다[6].

$$t(y) = t(0) - [t(0) - t(\infty)] [1 - \exp(-hy^2)] \dots\dots\dots (1)$$

여기서 h는 상수, t(0)는 y=0에서 두께, t(∞)는 경사영역이 끝나는 지점의 두께이다. 각 층의 굴절율은 알루미늄의 성분비 x로 결정된다[7]. 안정된 도파모우드를 위해선 굴절율이 n₂ > n₁, n₃로 또 성분비는 x₂ < x₁, x₃로 설계한다[8]

본 연구는 3층 도파구조에서의 결함을 보완하기 위하여 그림 1의 활성층, n₂ 밑으로 얇은 두개의 층(n₃, n₄)을 삽입하여 5층구조로 하여 해석하였다. 이때 설계변수값들은 표 1과 같다. 광전계에 관한 해는 파동방정식

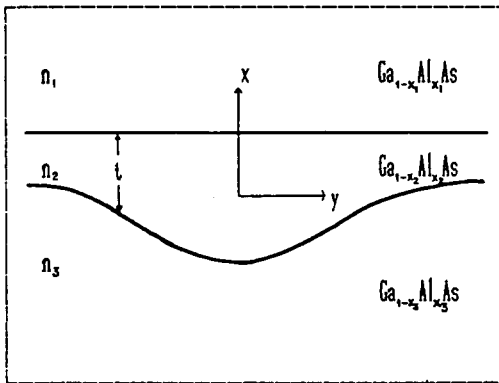


그림 1. 경사형 활성층을 갖는 AlGaAs/GaAs 레이저 다이오드의 단면도

Fig 1. Schematic diagram of AlGaAs/GaAs laser diode with graded-shaped active region.

lasing wavelength = 0.6867 [micro meter]

aluminium contents :	refractive indices :
x 1 = 0.22500	n 1 = 3.46592
x 2 = 0.05400	n 2 = 3.63799
x 3 = 0.05400	n 3 = 3.63799
x 4 = 0.05400	n 4 = 3.63799
x 5 = 0.39000	n 5 = 3.35106

<표 1>. 5 - 층 구조 모의모델인 레이저 다이오드의 광학적 설계변수

Table 1. Optical design parameter of imitative 5-layer structure laser diode.

에 의한 근사기법으로 접근 하였다.

각 층에서 굴절율분포는

$$n_j^2(x, y) = n_{j0}^2 + n_{jv}^2(y) \dots\dots (2)$$

j = 1, 2, 3, 4, 5

여기서 n_{j0}와 n_{jv}는 passive와 active 상태의 각 층의 굴절율이다.

전계분포 E를 식(3)으로 나타낼때

$$E(x, y, z) = \prod(x, y) V(y) e^{j(\omega t - \gamma z)} \dots\dots\dots (3)$$

파동방정식은 다음과 같다 [6]

$$[V^2 + k_0^2 n_j^2(x, y) + \gamma^2] E = 0 \dots (4)$$

식(3)을 식(4)에 대입하면

$$V \frac{\partial^2 \prod}{\partial x^2} + \prod \frac{\partial^2}{\partial y^2} + [k_0^2 n_j^2(x, y) + \gamma^2] \prod = 0 \dots\dots\dots (5)$$

단 k_0 는 자유공간의 전파상수, γ 는 매질에서 전파 상수이다.

식(5)에 \square 의 공액수 \square^* 를 곱하고 $(-\infty, \infty)$ 의 x 구간에서 적분하면

$$\frac{d^2 v}{dy^2} + [\gamma^2 - \gamma_0^2 + k_0^2 n_j^2(x, y)]V = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

활성층내에서 유전율의 변화량 $\delta k(y)$ 의 곱으로 나타낼 수 있고 여기서 $\delta k(y)$ 는 다음식으로 나타낸다 [9]

$$\delta k(y) = 2n\Delta n(y) + jng(y)/k_0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

여기서 n 은 활성층의 굴절율, $\Delta n(y)$ 은 y 방향의 굴절율변화량, $g(y)$ 는 이득상수이다. 단, 굴절율변화량은 다음과 같다 [10].

$$\Delta n(y) = R[g(y) + 190]/k_0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

여기서 R 은 굴절율변화에 의한 이득 변화량이다.

$$R = \delta n / \delta g \quad \dots\dots\dots (9)$$

그리고 각 영역에서 횡방향의 광구속인자 $\Gamma_j(y)$ 는 x 축에 대한 각 영역의 경계조건을 적용하여 normalization 화 하면

$$\Gamma_j(y) = \frac{\int_j |E(x, y)|^2 dx}{\int_{-\infty}^{\infty} |E(x, y)|^2 dx} \quad \dots\dots\dots (10)$$

가 된다. [10]

식(10)의 결과는 그림 2에 있으면 이는 스트라이프폭이 $4 \mu m$ 일 때이고 이 보다 폭을 증가할때는 순바이어스 와 관계없이 공간적 hole burning 현상이 나타남을 보았다.

그리고 식(9)에서 $R > 0$ 이면 도파모우드가 되고 $R < 0$ 일 때 anti-guiding, $R = 0$ 이면 굴절율 변화가 없음을 보았다 [8]. 활성층에

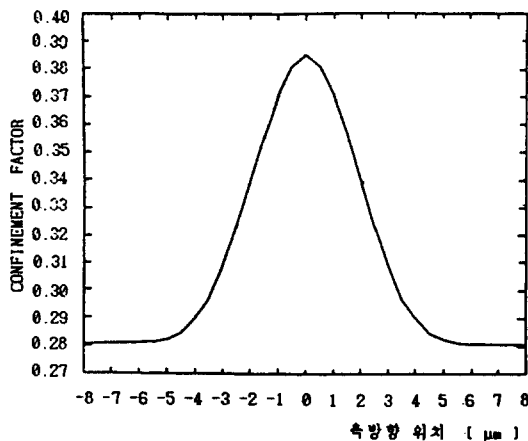


그림 2. 5-층 구조 레이저 다이오드의 활성층에서의 광구속인자. ($S = 4 \mu m$)

Fig 2. Confinement factor of 5-layer structure laser diode in the active region ($S = 4 \mu m$)

주입된 캐리어 농도 $N(y)$ 에 의한 이득분포 $g(y)$ 는

$$g(y) = AN(y) - 190 [cm^{-1}] \quad \dots\dots\dots (11)$$

여기서 190은 광펌핑을 하지 않았을때 활성층의 흡수계수이다. 레이저발진을 위한 임계조건은

$$G_{th} = \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \quad \dots\dots\dots (12)$$

이며 L 은 레이저길이, R_1, R_2 는 반사계수이다.

레이저다이오드의 평균전력은 다음과 같이 근사모델로 해석하였다 [11]

$$P(z) = \frac{1}{2} \int \int_{-\infty}^{\infty} Re(E \times H^*) dx dy$$

$$\equiv P_0^+ |\square(x, y)|^2 |V(y)|^2 \exp(GZ) \quad \dots\dots\dots (13)$$

이는 $+Z$ 방향의 단위면적당 평균전력이며 $Z = 0$ 에서 총전력 P_0 는

$$P_0 = P_0^+ \iint \square^2(x, y) V^2(y) dx dy$$

$$\cong P_0^+ \int \square^2(x, 0) dx \int V^2(y) dy \dots (14)$$

즉, $\square(x, y)$ 는 $V(y)$ 보다 매우 천천히 변화하기 때문이다. +Z 방향에서 전력밀도 P_z^+

$$P_z^+ = P_0 \frac{\int \square^2(x, y) V^2(y) \exp(Gz) dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \square^2(x, 0) dx \int_{-\infty}^{+\infty} V^2(y) dy}$$

[Watt / m²] (15)

+Z 방향으로 이동한 광속(photon flux), N_{ph}^+ 는

$$N_{ph}^+ = P_z^+ / E_g \quad [\text{photon / sec.m}] \dots (16)$$

여기서 E_g 는 에너지갭이다. 활성층内の 평균광속 \bar{N}_{ph}^+ 는

$$\bar{N}_{ph}^+ = \frac{P_0 \Gamma_2(y) V^2(y) \exp(Gz)}{E_g t \int V^2(y) dy}$$

[photons / sec.m] (17)

단위체적당 총광속은 \bar{N}_{ph}^+ 와 \bar{N}_{ph}^- 합이며

$$\bar{N}_{ph}^+ + \bar{N}_{ph}^- = \frac{P_0 \Gamma_2(y) V^2(y) \{e^{Gz} + e^{G(2L-z)}\}}{E_g t \int V^2(y) dy}$$

..... (17)

따라서 유도재결합율 R_{st} 값은

$$R_{st} = (\bar{N}_{ph}^+ + \bar{N}_{ph}^-) g(y)$$

$$= \frac{P_0 \Gamma_2(y) V^2(y) \{e^{Gz} + e^{G(2L-z)}\} g(y)}{E_g t \int V^2(y) dy}$$

..... (18)

따라서 레이저다이오드의 확산방정식은 다음과 같다.

$$D_n \frac{d^2 n(y)}{dy^2} - \frac{n(y)}{\tau_s} = \frac{1}{q} \left[-\frac{J(y)}{t(y)} \right] + R_{st}$$

..... (19)

여기서 D_n 은 확산계수, τ_s 는 소수캐리어 수명, $J(y)$ 는 축방향의 전류밀도이다.

식(20)을 풀기 위하여 COLSYS [12] 프로그램을 이용하였다.

3. 시뮬레이션 및 결과고찰

본 연구는 (Ga,Al)As/GaAs 경사형 5층 구조를 모의모델로 하여 캐리어분포의 확산 방정식을 유도하여 "COLYS" 소프트웨어 프로그램을 사용하였다. 그리고 횡방향의 광속속인자 $\Gamma_2(y)$ 를 구하기 위하여 경계치 조건을 구하여 해석하고 이를 Multipoint Boundary Value differential equation Solver인

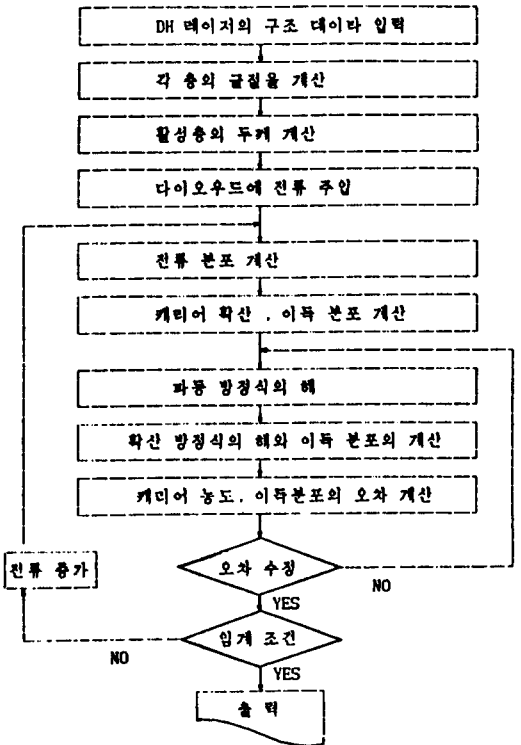


그림 3. 모의 모델에 의한 레이저 다이오드의 알고리즘

Fig 3. The algorithm of laser diode by the imitative model.

소프트웨어 프로그램을 사용하였다.[13] 활성층 두께를 경사형으로 변화를 주었고 채널폭을 $16\mu\text{m}$ 로 선정하였고 발진파장은 $0.8387\mu\text{m}$ 로 하였다. 그림 3은 본 연구에서 실제 수행된 프로그램의 알고리즘이다. 계산결과로서 본 연구의 모의모델에 사용된 설계변수값들은 각 층의 알루미늄 성분비율 $0.225 - 0.054 - 0.054 - 0.054 - 0.39$ 로 하였고 이때의 굴절률값은 $3.466 - 3.638 - 3.638 - 3.638 - 3.351$ 이 되었다. 레이저다이오드의 길이 L 은 $350\mu\text{m}$, 반사계수 R_1, R_2 는 모두 $0.3\mu\text{m}$ 로 하여 스트라이프폭을 가변시켜 가면서 성능지수값들을 조사하였다. 그리고 활성층의 두께는 채널의 중심인 $y = 0$ 에서 $0.14\mu\text{m}$, 채널영역 밖알 ($y = \infty$)에서 $0.12\mu\text{m}$ 로 하였다. 그림 4는 스트라이프폭이 $4\mu\text{m}$ 일 때 y 방향에서의 실효굴절률값이며 바이어스가 증가됨으로써 분포가 더욱 좁아짐을 알 수 있다. 이를 바탕으로 하여 광의 전계분포, 캐리어농도, 이득분포를 얻을 수 있다. 그림 5는 측방향에 따른 바이어스변화를

줄 때 캐리어농도 분포이다. 출력이 증가함에 따라 채널 중심 근처에서 공간적 호울 버닝 현상이 일어남을 볼 수 있다. 캐리어농도분포를 알면 이득분포도 구할 수 있으며 이를 그림 6에 나타내고 있다. 그림 6에서도 광출력이 증가될 때 이득분포에서 호울 버닝현상을 뚜렷하게 볼 수 있다. 이와같이 공간적 호울 버닝현상은 전류와 광출력간의 특성곡선에서

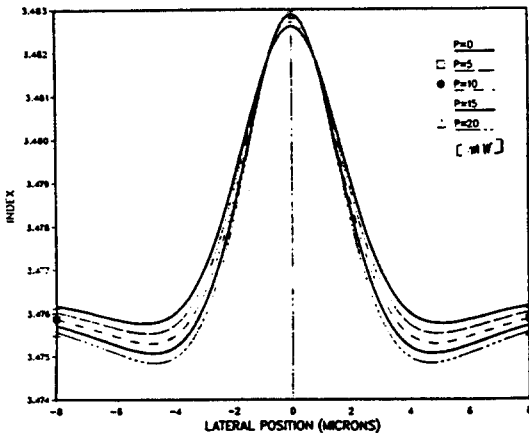


그림 4 . 활성층에서 실효굴절률의 측방향에 대한 변화 ($S=4\mu\text{m}$)

Fig 4 . Lateral variation of effective refractive index in the active region ($S = 4\mu\text{m}$)

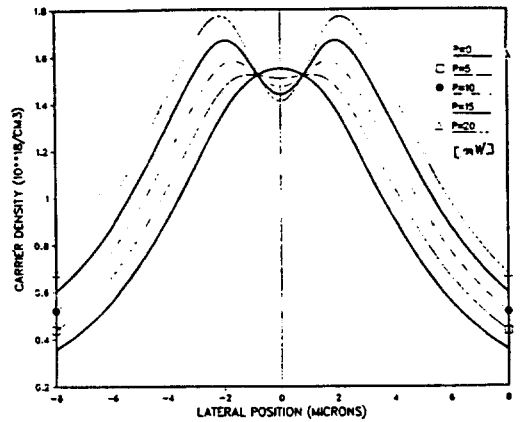


그림 5 . 광출력에 의한 측방향의 캐리어농도 변화
Fig 5 . Carrier concentration variation of lateral direction according to optical power.

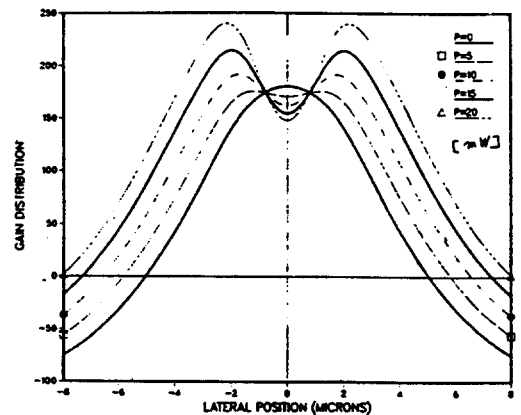


그림 6 . 광출력에 의한 측방향의 이득분포 변화
Fig 6 . Gain distribution variation of lateral according to optical power.

“KinK”현상이 초래되어 발진비임의 방향이 천이되고 변조대역이 저하될뿐만 아니라 광출력의 강도가 매우 불안정한 상태가 되기 때문에 가급적 이러한 현상이 나타나지 않도록 설계변수값들을 정확하게 설정하여야 한다. 즉 호울 버닝이 일어나는 영역은 $R < 0$ 이 되므로 $R > 0$ 이 되도록 설계하여야 한다.

4. 결 론

본 연구는 반도체레이저의 활성층에 두께변화를 줄때 실효굴절변화에 의한 공간적 호울 버닝 현상이 일어남을 밝혔다. 즉 광출력이 증가할 때 ($P = 30\text{mW}$)와 광출력은 고정시키고 스트라이프폭만 채널폭보다 증가할 때 호울 버닝이 일어났었다. 이에 반하여 활성층의 굴절율분포는 스트라이프폭과 광출력의 변화에 거의 변화가 없었다. 이는 $R < 0$ 였음을 입증할 수 있다. 따라서 안정된 단일발진 모우드를 얻기 위해서는 광출력을 낮추드래도 레이저다이오드의 표면의 전 영역을 금속으로 입힌 완전히 굴절율 도파구조인 CSP-Substrate Planar) 레이저로 만드는 것이 바람직하며 따라서 여기에 관한 구조적 해석이 요망되고 있다.

참 고 문 헌

- 1) L.J. Mawst et. al.; "Optimization and Characterization of Index-guided Visible AlGaAs/GaAs graded barrier Quantum Well Laser diodes," *IEEE J. Quant. Elect.*, 23, 6, 696~703, (1987)
- 2) K. Kuboki et al.; "Frequency offset locking of AlGaAs Semiconductor Lasers," *IEEE J. Quant. Elect.*, 23, 4, pp. 388~394, 1987
- 3) 吳煥述; "CSP구조 GaAs-(Ga, Al) As반도체 레이저의 특성," 건국대학교 학술지, 31, 99~104, 1987.
- 4) R.W. Dixon et. al; Improved light-output linearity in stripe-geometry double-heterostructure lasers," *Appl. phys. Lett.*, 29, 372~374, 1976
- 5) K. Kobayashi et. al.; "A GaAs-Al_xGa_{1-x}As double heterostructure planar Stripe Laser," *Jn J. Appl. phus.*, 12, 1985~1592, 1973.
- 6) W. Streifer et. al.; "Above-threshold analysis of double-hetero-structure diode Lasers With laterlly taped active regions." *Appl. phys. Lett.*, 37, 10, 877~879, 1980.
- 7) W. Strefer et. al.; *Appl. Optics*, 18, 3274~3275, 1981.
- 8) 吳煥述; "CSP-DH 구조 반도체 레이저의 발진모우드의 안정화," 건국대학교 산업연구보고, 12, 99~106, 1987
- 9) J.K. Butler et al.; "Coupled-mode analysis of gain and wavelength Oscillation Chauacteristicsg diode Laser phased arrays," *IEEE J. Quant. Electk.*, 21, 5, 458~464, 1985.
- 10) J.K Butler et. al.; "Analysis and performance of channeled-Substrate planar double-heterojunction Lasers With Geometrical Asymmetries," *IEEE J. Quant. Elect.*, 23, 11, 1890~1899, 1987.
- 11) J.K Butler; "Diffusion Modeling of CDH-LOC" MEMORANDUM, oct, 19, 1983.
- 12) U. Ascher et. al.; "Collection Software for Boundary-value ODEDS." *ACM Trans, Math, soft.*, 7, 209~222, 1981.
- 13) U. Ascher et. al.; *ACM Trans, Math, soft.*, 7. 223~229, 1981.
- 14) J.K Butler, 吳煥述; "Array Mode Characteristics of Channeled-Substrate-planar phased Laser Arrays," 대한전자 공학회 논문지, 23, 6, 936~943, 1986.