

DH Laser Diode의 전기적 포화현상에 관한 이론적 해석

(Theoretical Analysis of the Electrical Saturation Behavior of the DH Laser Diode)

朴 漢 奎*, 權 寧 機**
(Park, Han Kyu, and Kwon, Young Key)

要 約

rate equation을 사용하여 DH Laser Diode에서 나타나는 전기적 포화현상이 이론적으로 설명되었다. Carrier density는 threshold 이후에 서서히 n_s 에 접근해가며 이론적으로 계산된 $I \frac{dV}{dI}$ 곡선과 예측된 ΔV_j 는 전에 보고된 실험결과를 정확히 설명할 수 있음이 입증되었다. carrier saturation factor k_β 를 제안하였으며 k_β 는 L.D의 이상성을 결정하는 중요한 factor임이 설명되었다. k_β 와 β 와의 관계를 통해 β 가 작으면 작을수록 diode의 특성은 이상적 diode에 가까워짐이 밝혀졌다.

Abstract

In this paper, the saturation behavior in the electrical phenomena of the DH Laser diode is explained theoretically using rate equations.

The carrier density approaches to n_s gradually well above the threshold and theoretically expected curve of $I \frac{dV}{dI}$ and calculated value of ΔV_j are exactly equal to the experimental results which was observed, as shown. The carrier saturation factor k_β is proposed and we show k_β is a measure of the ideality of the sample diode. In the light of k_β - β relation, the sample diode's ideality increases as β decreases.

I. 序 論

DH (Double Heterostructure) Laser Diode(L.D.)의 spontaneous emission이 threshold 이후에서 포화되는 현상¹⁾이 보고된 이래 DH L.D의 전기적 광학적 포화현상에 대한 실험적 연구가 많았으며 이러한 포화현상은 L.D에서의 중요한 특성중의 하나로 인식되었다.

포화현상을 설명키 위한 모델로는 Bell 연구진에 의한 전기적 모델²⁾이 가장 간단하며 실제 실험결과를 정성적으로 설명할 수 있으나 threshold 전후에 있어서의 L.D의 행동을 예측할 수 없는 단점이 있으며 Sommers와 North의 모델³⁾은 활성층에서 junction voltage의

분포상태와 전류의존성을 설명할 수 있으며 Chinone의 모델⁴⁾은 광학적 비선형 특성(Kink 현상)을 정상적으로 설명할 수 있으나 모두 이론 전개에 필요한 많은 변수와 복잡함으로 인해 L.D의 물리적 특성과 광학적 특성을 동시에 설명하기에는 미흡하다고 생각된다.

L.D의 광학적 특성에 중요한 영향을 미치는 spontaneous emission factor β 의 이론적 의미와 실험에 의한 측정이 Y.Suematsu⁵⁾등에 의해 행해짐에 따라 L.D의 여러 현상 설명에 rate equation 방법이 시도되기 시작하였고, 1978년 T.L. Paoli⁶⁾는 junction voltage derivative factor $\frac{dV_j}{dI}$ 를 이론적으로 설명하는데, 성공하였다.

그러나 지금까지 많은 논란을 가져온 광학적, 전기적 포화현상의 설명에는 도달하지 못하고 있으므로 본 논문에서는 rate equation을 기초로 하여 L.D에서 실험적으로 보고되었던 전기적 양에 대한 포화현상을 이론적으로 규명하려 한다.

* 正會員, 연세대학교 공과대학 전자공학과

** 準會員, 연세대학교 공과대학 전자공학과(Dept. of Electronic Engineering, Yonsei Univ.)

接受日字: 1978年 8月 23日

II. 이론적 해석

DH L.D의 경우 활성층에서 불순물 농도가 낮을 때의 rate equation은 다음과 같다.

$$\frac{dn}{dt} = P - \frac{n}{\tau_s} - \sum_i v_g^i (a_i n - b_i) N_p^i \quad (1)$$

$$\frac{dN_p}{dt} = \Gamma v_g^i (a_i n - b_i) N_p^i + \beta \frac{n}{\tau_s} - \frac{N_p^i}{\tau_p} \quad i=1, 2, M \quad (2)$$

첨자 i 는 각 모드에 의한 기여도를 표시키 위한 것으로 L.D가 단일모드로 동작하고 있을 때는 $i=1$ 로 하여 첨자는 무시될 수 있다. 본 논문에서는 단일 모드로 동작하는 L.D에 대해 해석하였으나 이러한 가정은 threshold 부근에서 어떤 형의 L.D에 대해서는 성립하지 않을 수도 있다. (1)식과 (2)식에서 n 과 N_p 는 전자와 광자의 농도, P 는 injection rate, τ_s 는 spontaneous Lifetime, Γ 는 optical confinement factor, v_g 는 Photon의 군속도, β 는 spontaneous emission factor, τ_p 는 photon의 lifetime을 뜻한다.

열적 평형상태에서, 즉 carrier의 thermalization time이 lifetime에 비해 상당히 짧은 경우 (1)(2)식은 다음 형태로 변환된다.

$$P = \frac{n}{\tau_s} + \Gamma v_g (an - b)N \quad (3)$$

$$N_p = \frac{-\beta n / \tau_s}{\Gamma v_g a(n - n_s)} \quad (4)$$

따라서 $\frac{p\tau_s}{n_s}$ 와 $\frac{n}{n_s}$ 의 관계를 구할 수 있다.

$$\frac{p\tau_s}{n_s} = \left(\frac{n}{n_s}\right) \left\{ \frac{(1-\beta)\frac{n}{n_s} + \beta\frac{n_t}{n_s}}{n/n_s - 1} \right\} \quad (5)$$

여기서 n_s 는 photon의 lifetime을 고려한 전손실 등가 캐리어 농도이며 n_t 는 $n_t = b/a$ 로 주어지는 값이다.

Junction voltage와 전자농도와와의 관계는 L.D의 hreshold 부근에서 전도대와 가전대가 parabola형일때

$$\frac{1}{V_T} \frac{dV_i}{dP} = \left(\frac{1}{N_c F_c'} + \frac{1}{N_v F_v'}\right) \frac{dn}{dp} \quad (6)$$

로 주어지며 V_T 는 열적등가전압이고 N_c, N_v 는 각각 전도대와 가전대에 대한 유효상태밀도이며 F_c' 과 F_v' 은 Fermi 적분의 미분치이다. (5)식으로부터 $d\left(\frac{n}{n_s}\right)/d$

$\left(\frac{p\tau_s}{n_s}\right)$ 를 구하며代入하면 (6)식은

$$\frac{1}{V_T} \frac{dV_j}{d\left(\frac{p\tau_s}{n_s}\right)} = \left(\frac{n_s}{N_c F_c'} + \frac{n_s}{N_v F_v'}\right) \frac{\frac{n}{n_s} - 1}{\left\{ 2(1-\beta)\frac{n}{n_s} + \left(\beta\frac{n_t}{n_s} - 1\right) - \frac{p\tau_s}{n_s} \right\}} \quad (7)$$

DH L.D의 활성층의 유효폭을 S , 유효 두께를 d , 길이를 L 이라하고 bias 전류를 I , bias 전압을 V , 활성층이 아닌 부분의 저항(series resistance)을 R 이라 할때 $I, I \frac{dV_j}{dI}, I \frac{dV}{dI}$ 등의 양은 다음식으로 표현된다.

$$I = \left(\frac{p\tau_s}{n_s}\right) \times \left(\frac{n_s}{\tau_s}\right) \times qdSL \quad (8)$$

$$I \frac{dV_j}{dI} = \frac{p\tau_s}{n_s} \frac{dV_j}{d(p\tau_s/n_s)} \quad (9)$$

$$I \frac{dV}{dI} = IR + I \frac{dV}{dI} \quad (10)$$

수치계산에 있어서의 모든 오차는 10^{-7} 이하로 하였으며 먼저 주어진 $\frac{n}{n_s}$ 로부터 Fermi 적분을 사용하여 quasi Fermi level ϵ_n 과 ϵ_p 를 구한다음 $F_c'(\epsilon_n), F_v'(\epsilon_p)$ 를 계산한 후, (7)식부터 (10)식까지의 식을 계산하였다. V_j 는 구해진 $\frac{dV_j}{dI}$ 로부터 discrete numerical integration의 방법⁸⁾을 사용하여 계산하였고 이때의 mesh point의 갯수는 10^{-7} 이상의 변화가 일어나지 않을 정도로 정해주었다.

III. 결과 및 고찰

그림 1에 (5)식으로부터 계산된 결과가 그려져 있

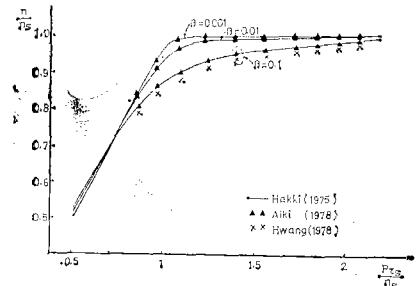


그림 1. 정규화 carrier 농도와 injection rate 관계 곡선

Fig. 1. Normalized carrier density versus injection rate curve.

표 1. 선택된 Laser Diode의 제원

Table 1. Various Constants of selected Laser Diode.

	d(μ)	S(μ)	L(μ)	Jth or Ith	Gth(cm ⁻¹)	type
Hakki(1975) ⁹⁾	0.3	10	380	1500(A/cm ²)	40	DH
Aiki(1978) ¹⁰⁾	0.1	7.5	300	50(mA)	45	CSP-DH
Hawang(1978) ¹¹⁾	0.2	13	380	50(mA)	64	DH

다. 여기에는 3가지 선택된 L.D.에 대한 것이 나타나 있는데 주목할 점은 각각의 L.D.가 전손실도 다르고 dimension도 다름에도 불구하고 전자 농도가 포화되어 가는 양상은 거의 같다는 점이다. 선택된 Laser의 제원은 표 1에 표시되어 있다.

$\beta=0.1$ 일때 Hwang의 것이 차이들어주고 있는 이유는 이 L.D.가 diffraction Loss 8 cm^{-1} 를 포함하고 있기 때문이며¹¹⁾ diffraction Loss가 크다는 것은 transverse mode가 기본모드만으로 구성되어 있지 않음을 의미한다. 따라서 실제의 β 는 0.1보다 조금 더 크게되기 때문에 약간의 차이를 보여주고 있다.

이러한 점을 고려한다면 모든 제원이 다른 3가지 유형의 well-behaved L.D.의 경우 전자농도의 포화상태는 거의 같은 형태를 지니고 있다고 볼 수 있으며 따라서 이 곡선은 활성층에서의 물리적 현상을 음미하는데 있어서 매우 중요한 의미를 지니고 있다고 생각된다.

$\beta=0.1$ 인 경우는 많은 spontaneous emission power가 lasing mode에 흡수되므로 인해 carrier의 포화threshold 이후에 지연되고 있으며 β 가 작아질수록 이 현상은 줄어들어 나타난다. 그러나 아무리 β 가 작아도 결코 실제 L.D.에서 $\frac{pc_s}{n_s}=1$ 일때 $n=n_s$ 로 완전히 포화되지 못하며 이러한 완전포화되는 L.D.는 이상적인 L.D.로 간주될 수 있다.

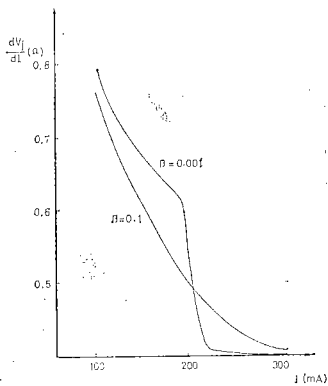


그림 2. $\frac{dV_j}{dI}$ 와 전압 관계곡선 $I_{th}=200\text{mA}$

Fig. 2. $\frac{dV_j}{dI}$ vs I curve $I_{th}=200\text{mA}$

그림 2에 $\frac{dV_j}{dI}$ 의 계산치를 보였다. $\beta=0.001$ 인 경우 $\frac{dV_j}{dI}$ 는 0보다 큰 유한한 값을 항상 지니면서 차츰 0에 접근되어 가며 따라서 $I > I_{th}$ 일때 V_j 는 V_{jth} 보다 증가할 것임을 추측할 수 있다. $\beta=0.1$ 일 때는 $\frac{dV_j}{dI}$ 의 값이 완만한 형태로 나타나고 있는데 여기에 서도 carrier의 포화상태가 junction voltage의 변화에

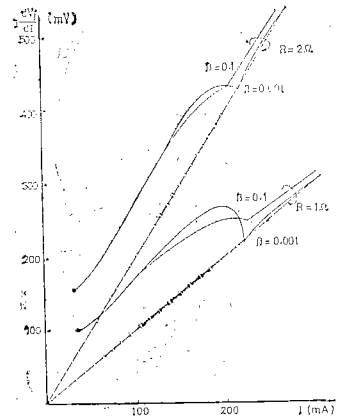


그림 3. $I \frac{dV_j}{dI}$ 와 I의 관계곡선 $I_{th}=200\text{mA}$

Fig. 3. $I \frac{dV_j}{dI}$ Vs I curve; $I_{th}=200\text{mA}$.

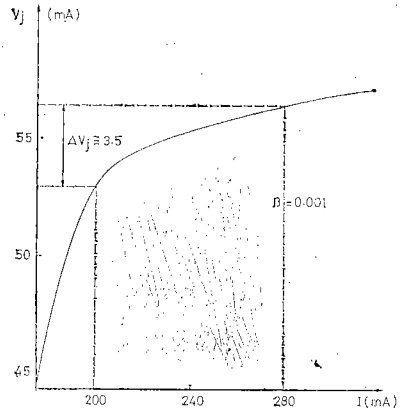


그림 4. $V_j(I)$ 와 I 관계곡선 $I_{th}=200\text{mA}$

Fig. 4. $V_j(I)$ vs I curve $I_{th}=200\text{mA}$.

미치는 영향이 잘 나타나고 있음을 알 수 있다.

그림 3에 이론적인 $I \frac{dV_j}{dI}$ 곡선이 그려져 있다 $I \frac{dV_j}{dI}$ 는 L.D.에 있어서 전기적 포화현상을 나타내는 매우 중요한 factor 중의 하나로서 실험결과를 매우 만족하게 설명할 수 있으리라는 것이(그림 3)으로부터 예측될 수 있다. $\beta=0.001$ 인 경우의 곡선은 T.L. Paoli 등¹²⁾에 의해 관측된 실험결과를 정확히 설명하고 있다.

수치적분된 $V_j(I)$ 곡선은 그림 4에 도시되었다. 최근에 개발되고 있는 L.D.는 보통 $\beta=0.001$ 이하이므로 $\beta=0.001$ 인 경우에 대해서만 표시하였다. 그림 4에도 나타나 있듯이 $\Delta I=80\text{ mA}$ 에 대한 threshold 이후의 ΔV_j 는 약 3.5 mV 정도로서 이것은 North와 Sommers의 실험결과를 정확히 예측하고 있다.

지금까지 고찰된 전기적 양들과 carrier density의

포화상태는 β 에 의해서 크게 영향을 받을 수 있으며 따라서 Laser diode의 특성분류를 위해서는 반드시 β 가 결정되어야 한다. 그러나 최근에 Y.Suematsu 씨가 threshold 이전에서 β 를 측정했을뿐⁵⁾ threshold 이후에서 β 를 측정하지 못하고 있다. 따라서 지금까지의 논의를 기초로 하여 carrier saturation factor k_β 를 제안하고 이 k_β 의 의미를 살펴보고자 한다.

$$k_\beta \triangleq -\log_{10}\left(1 - \frac{n}{n_s}\right) \quad (11)$$

이 factor는 등가적인 power saturation factor나 junction voltage saturation factor로도 바뀔 수 있으며 L.D의 구조적 상수나 손실의 정도에는 β 를 통해 관련지워진다.

$$\beta = \frac{2\pi^2 n_{eff}^3 V \Delta\lambda}{\lambda^4} \quad (12)$$

이때 $V=dSL$, n_{eff} 는 활성층의 유효굴절율, $\Delta\lambda$ 는 spontaneous emission의 half-spectral width, λ 는 power confinement factor λ 는 lasing wavelength이다.

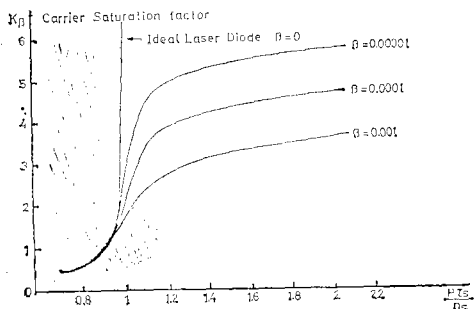


그림 5. Carrier Saturation factor와 Injection rate 관계곡선

Fig. 5. Carrier saturation factor vs Injection rate curve.

그림 5에 k_β 와 β 의 관계가 도시되었고, 이상적인 L.D의 k_β 도 함께 표시되었다. 여기서 k_β 는 β 에 매우 민감한 함수이며 β 가 작으면 작을수록 이상적인 L.D에 가까워짐을 알 수 있다. 만약 threshold 이후에서 gain의 포화상태를 측정하면 k_β 를 알 수 있고 이 k_β 로부터 β 를 간접적으로(그림 5)부터 구할 수 있으며 이러한 간접측정은 충분히 가능할 것으로 생각되어 제안하는 바이다.

IV. 결 론

rate equation을 사용하여 DH L.D에 있어서의 포화 현상을 해석하였다.

$\beta \approx 0$ 인 DH L.D의 경우 threshold에서 carrier는

완전히 포화되지 못하고 β 가 작을수록 포화현상은 더욱 뚜렷해지며 rate equation approach에 의해 예측된 $I \frac{dV}{dI}$ 곡선이나 ΔV 같은 양은 실험결과를 정확히 예측할 수 있음이 확인되었고, carrier saturation factor k_β 가 제안되었으며 DH L.D의 이상성을 나타내는 중요한 factor임이 분석되었고 β 를 threshold 이후에 간접적으로 측정하는 방법이 제시되었다.

뿐만 아니라 rate equation을 사용한 본 이론에 의해서 L.D를 특성화하는데 필요한 여러 물리량이 계산 가능하며, 광학적 포화현상이나 비선형 특성도 설명가능하리라 생각된다.

參考文獻

1. T.L. Paoli, "Saturation Behavior of the spontaneous emission from double-heterostructure junction lasers operating high above threshold." IEEE J. quan. electron vol QE-9 No.2 pp.267~pp.272 Feb. 1973.
2. P.A. Barnes and T.L. Paoli "devivative measurements of the current-voltage characteristics of double-heterostructure injection lasers" IEEE J. quan electron Vol QE-12 No. 10 pp.633~pp.639 Oct. 1976.
3. H.S. Sommers, Jr. and D.O. north "experimental and theoretical study of the spatial variation of junction voltage and current distribution in narrow stripe injection lasers" J. appl phys vol.48 No.11 pp.4460~pp.4467 Nov. 1977.
4. N. Chinone "nonlinearity in power-output current characteristics of stripe geometry injection lasers" J. appl. phys vol.48 No. 8 pp.3237~pp.3243 Aug. 1977.
5. Y. Suematus et al., "measurement of spontaneous emission factor of alGaAs double-heterostructure semiconductor lasers" IEEE J. quan electron Vol QE-13 No. 8 pp.596~pp.600 august 1977.
6. T.L. Paoli "Theoretical derivatives of the electrical characteristics of a junction laser operated in the vicinity of thershold." IEEE J. quan electron vol QE-14 No.1 pp.62~pp. 68 jan 1978.
7. T.K. Gaylord and L.N. Linxwiler, Jr. "A

- method for calculating fermi energy and carrier concentrations in semiconductors." Am. J. Phys. vol.44 No. 4 pp.353~pp. 355 april 1976.
8. Texas instrument Inc. "SR-50A Manual; mathematical library." 1978.
 9. B.W. Hakki "GaAs double heterostructure lasing behavior along the junction plane" J. applPhys. vol.46 No.1 Jan 1975.
 10. K. Aiki et al., "Transverse stabilised Al_xGa_{1-x} as injection lasers with channeled-substrate-planar-structure" IEEE J. quantum electron. vol QE-14 No. 2 pp.89~pp.94 Feb. 1978.
 11. C.J. Hwang et al., "Threshold behavior of (GaAl) as-gaas lasers at low temperatures." J. appl. phys. vol.149 No. 1 pp.29~pp.34 Jan. 1978.
 12. T.L.Paoli and P.A. Barnes "Saturation of the junction voltage in stripe-geometry (AlGa) as double-heterostructure junction lasers. appl. phys. lett. vol.28 No.12 pp.714~pp 716 June. 1976.