

레이저 다이오드의 전기적 미분특성에 관한 연구

(Electrical Derivative Characteristics of Laser Diodes)

金昌均*, 都萬熙**, 金相培*

(Chang Gyun Kim, Man Hee Do and Sang Bae Kim)

要約

레이저 다이오드는 전기 에너지를 coherent한 빛 에너지로 변환시키는 전광변환 소자로 광학적 특성과 전기적 특성은 매우 밀접한 관계를 갖고 있다. 그러므로 전기적특성을 측정함으로써 광학적 특성의 예측이 가능하다. 이 뿐 아니라 전기적 특성을 측정하는 것이 광학적 특성을 측정하는 것보다 쉽고 정밀하므로 전기적 특성에 대한 정확한 모델은 중요한 의미를 지니게 된다. 이 논문에서는 전기적 특성으로부터 광학적 특성을 예측하기 위한 보다 정밀한 모델을 제시하기 위해 접합전압과 캐리어 농도와의 관계를 Fermi-Dirac 적분식으로 나타냈을 때와 실험적 근사식으로 나타냈을 때 두가지 경우에 대해 전류-전압 특성을 비교, 분석하였다. 계산결과 레이저 다이오드의 전류-전압특성을 해석하기 위한 보다 정확한 모델은 Fermi-Dirac 적분식을 사용하고, bimolecular 발광성 재결합을 가정하며, 캐리어 농도 증가에 따른 에너지 갭 감소의 영향을 고려한 모델임을 확인할 수 있었다.

Abstract

Based on the close correlation between the optoelectronic and electrical characteristics of laser diodes, this paper is to present an exact model for electrical characteristics of laser diodes with bulk active layers so that the optoelectronic characteristics may be estimated from the electrical characteristics. Among the considered models, the most exact model is shown to be one which uses the Fermi-Dirac integral and the bimolecular recombination and takes into account the energy-gap shrinkage with the injected carrier density.

1. 서론

레이저 다이오드는 전기 에너지를 coherent한 빛 에너지로 변환시키는 전광변환(electrical-to-optical conversion) 소자로 광학적 특성과 전기적 특성은

매우 밀접한 관계를 갖고 있다. 그것은 접합전압 V_j 가 quasi-Fermi 준위 차이로 주어지므로 접합전압 V_j 는 캐리어 농도의 함수로 나타낼 수 있고, 레이저 다이오드의 동작특성을 기술하는 비울 방정식으로부터 전류 I 와 광자밀도 S 를 캐리어 농도의 함수로 구할 수 있기 때문에 접합전압 V_j 와 전류 I 및 광자밀도 S 는 서로 일정한 관계를 갖게된다. 그러므로 전기적 특성을 측정함으로써 광학적 특성의 예측이 가능하다. 이 뿐 아니라 전기적 특성을 측정하는 것이

*正會員, **學生會員, 亞洲大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng. Ajou Univ.)

接受日: 1992年 9月 14日

광학적 특성을 측정하는 것보다 쉽고 정밀하므로 전기적 특성에 대한 정확한 모델을 찾는다는 것은 매우 중요하다.^[1]

지금까지 연구되어진 모델은 비발광성 재결합 및 누설전류의 영향, 캐리어 농도변화에 따른 에너지 갭 축소의 영향 등의 비이상성 및 2차 효과를 고려하지 않은 Fermi-Dirac(F-D) 적분을 사용한 모델^[2]이 있었고, 위의 비이상성을 고려한 경우에는 캐리어 수명이 일정하다고 가정하고, 이상계수를 캐리어 주입 정도에 관계없이 일정한 상수로 가정한 실험적 근사식을 이용한 모델^[11]이 주로 연구되었다. 그러나 실험 결과는 전류가 증가하면서 캐리어 수명이 감소하는 현상을^[3,4] 나타내는데 이는 캐리어 수명이 일정하지 않으며 bimolecular 재결합이 일어나고 있음을 보여 주는 것이다. 또한 이상계수가 캐리어 주입 정도에 따라 변화하기 때문에 이상계수가 상수로 가정한 모델에서는 모든 전류영역에서 정확한 결과를 주지 못한다. 이밖에 비발광성 재결합 및 누설전류의 영향 등이 레이저 다이오드에 중요한 영향^[1]을 미치므로 비발광성 재결합 및 누설전류의 영향 등을 고려하지 않은 모델은 큰 오류를 범할 수 있다.

이 논문에서는 캐리어 수명이 일정하다고 가정한 실험적 근사식을 이용한 모델과 F-D 적분식을 이용하고 bimolecular 재결합을 가정하며 캐리어 농도변화에 따른 에너지 갭 축소가 없는 모델 및 F-D 적분식을 이용하고 bimolecular 재결합을 가정하며 캐리어 농도변화에 따른 에너지 갭 축소가 있는 모델을 중심으로 이상적인 경우와 비이상성(이 논문에서는 Auger 재결합 전류와 생성-재결합 전류, current spreading만 고려함)이 고려된 경우를 고찰함으로써 레이저 다이오드의 전기적 특성을 해석하기 위한 보다 정밀한 모델을 제시하고자 한다. 이를 위해 Ⅱ장에서 이상적인 레이저 다이오드의 전류-전압 미분특성에 대한 컴퓨터 계산결과를 보이고 Ⅲ장에서 비발광성 재결합 및 누설전류의 영향에 대한 계산결과를 보인 후 Ⅳ장에서 결론을 맺기로 한다.

Ⅱ. 이상적인 레이저 다이오드의 전류-전압 미분특성

1. 실험적 근사식에 의한 전류-전압 미분특성

p-n 접합 다이오드에서 전자 농도 N 과 접합전압 V_j 관계식은 주입 정도에 따라 이상계수 n 값을 조정해 주고 일정 캐리어 수명 τ_n 과 nondegenerate 상태를 가정하면 다음과 같이 근사될 수 있다.

$$V_j = nV_T \ln(N/N_0) \quad (1)$$

N_0 : 평형상태에서의 캐리어 농도

N : 전자 농도

V_T : 열 전압(thermal voltage)

이 식은 실험적 근사식으로, 다음에 보일 threshold 이전에서의 비유방정식의 정상상태해 $I = \alpha N/\tau_n$ 에 (1)식을 대입하면 일반적인 다이오드 I - V 특성식이 유도된다. 전류-전압특성을 구하기 위해서는 전자 농도 N 과 전류 I 와의 관계를 구해야 한다. 이 관계는 레이저 다이오드의 동작특성을 기술하는 비유 방정식으로부터 구할 수 있다. 캐리어 수명이 일정하다고 가정한 비유 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dS}{dt} = \left\{ \frac{\Gamma A(N - N_s)}{1 + \epsilon S} - \frac{1}{\tau_p} \right\} S + \frac{\Gamma B N}{\tau_n} \quad (2)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{\alpha} - \frac{A(N - N_s)}{1 + \epsilon S} S - \frac{N}{\tau_n} \quad (3)$$

여기서 S 와 N 은 각각 광자밀도 및 전자 농도이고 I 은 발광성 주입전류이며 기타변수들은 표 1에 정리하였다.

이 비유 방정식의 정상상태 해는 주입전류에 대한 해석적 형태(analytic form)로 주어진다. 한편, 레이저 다이오드에 걸여준 전압을 V , 직렬저항을 R_s 라 했을 때, 누설전류나 비발광성 재결합 전류가 없으면 전체전류 $I = I_i$ 이 되어 접합전압과 동저항 dV/dI 는 다음과 같이 주어진다.

$$V_j = V - IR_s = nV_T \ln(N/N_0) \quad (4)$$

$$\frac{dV}{dI} = \frac{dV_j}{dI} + R_s = \frac{nV_T}{I} \left\{ \frac{I}{N} \frac{dN}{dI} \right\} + R_s \quad (5)$$

식(4)와 식(5)에 비유 방정식의 정상상태 해를 대입하면 원하는 전류-전압특성 및 미분특성을 해석적인 형태로 구할 수 있다. 그림 1은 비발광성 재결합 및 누설전류가 없을 때 식(2)와 식(4)~(5)로부터 계산된 레이저 다이오드의 정특성이다. 이때 계산에 사용된 변수값을 표 1에 정리하였다.^[5]

2. Fermi-Dirac 적분에 의한 전류-전압 미분특성
접합전압 V_j 는 quasi-Fermi 준위 차이로 주어지

표 1. 계산에 사용된 레이저 다이오드 특성변수와 값^[5]

Table 1. Laser diode parameters and their values used in the calculation.

| 기호 | 변수 설명 | 전형적인 값 |
|------------|--|---|
| τ_p | 광자수명 ($e \nu_e a_m^{-1}$) | 1.27 (ps) |
| τ_c | 캐리어수명 | 2.2 (ns) |
| Γ | 기본모드의 광결속계수 | 0.3 |
| A | 광이득계수 | 1.857×10^4 (cm ² /sec) |
| N | 활성영역의 캐리어 농도 | (cm ⁻³) |
| N_0 | 광이득이 0인 캐리어 농도 | 1×10^{18} (cm ⁻³) |
| N_0' | 평형상태에서의 캐리어 농도 | $10 r_s / a$ |
| S | 활성영역에서의 광자밀도 | (cm ⁻³) |
| β | 자발 방출계수 | 1×10^{-6} |
| ϵ | 비선형 이득계수 | 1×10^{17} |
| λ | lasing 파장 | 1.3×10^4 (cm) |
| v_g | 군속도 | 0.75×10^{10} (cm/sec) |
| a_m | TE 모드의 총 손실 ($=\alpha_i + \alpha_w$) | 80 (cm ⁻¹) |
| α_i | 내부 손실 | 40 (cm ⁻¹) |
| α_w | 유로 거울 손실: $(1/\Gamma) \ln(1/R)$ | 40 (cm ⁻¹) |
| d_0 | 비활성 영역 clad 층의 두께 | 0.15 (μ m) |
| d | 활성층 두께 | 0.15 (μ m) |
| W | 활성층 폭 | 2 (μ m) |
| L | 레이저 공진기 길이 | 250 (μ m) |
| V_{act} | 활성영역 부피 ($L \times W \times d$) | $250 \times 2 \times 0.15$ (μ m ³) |
| σ | 활성영역 부피 \times 전자 전하량 | 1.2×10^{18} (C/cm ³) |
| R | 거울의 반사율 | 0.325 |
| m | 성공-재결합 경로의 이상계수 | 3 |
| n | 실용적 근사식에서 사용한 이상계수 | 1.5 |
| C_{sp} | Auger 재결합 계수 | 3×10^{20} (cm ³ /sec) |
| J_0 | $\text{InGaAsP}(1.3\mu\text{m})/\text{InP}$ 접합 포화전류 밀도 | 9×10^3 (A/cm ²) |
| E_g | 활성층 비결합 상태에서의 에너지 | 0.963846 (eV) |
| I_{sp} | 성공-재결합 경로의 역포화 전류 | $0.00013 \times W \times L$ (A) |

$E_{Fn}(E_{Fp})$: 전자(정공)의 quasi-Fermi level
 E_c : 전도대 바닥 에너지
 E_v : 가전대 천정 에너지
 E_g : 에너지 갭

$E_{Fn}-E_{Fp}$ 는 전자와 정공의 농도가 주어질때 F-D 적분으로부터 구할 수 있으며, j 차의 F-D 적분식은 다음과 같이 표현된다.^[6,7]

$$S_j(\eta) = \frac{1}{j!} \int_0^\infty \frac{\xi^j}{1 + \exp(\xi - \eta)} d\xi \quad (7)$$

여기서 전도대에 대해서는 $\xi = (E - E_c)/kT, \eta = \eta_c = (E_{Fn} - E_c)/kT$, 가전대에 대해서는 $\xi = (E_v - E)/kT, \eta = \eta_v = (E_v - E_{Fp})/kT$ 이며, E 는 에너지이다. 따라서 전자농도 $N = N_c S_{1/2}(\eta_v)$, 정공농도 $P = N_v S_{1/2}(\eta_c)$ 가 되며 N_c, N_v 는 각각 전도대, 가전대의 유효상태 밀도이다.

이 논문에서는 F-D 적분에 대한 근사식 중에서 지금까지 알려진 가장 정확한 Nilsson의 근사식을 사용하여 η_c 와 η_v 를 구하였다. $U = S_{1/2}(\eta)$ 라 했을 때, Nilsson의 근사식은 다음과 같다.^[7]

$$\eta = \ln(U) + U \left[64 + 0.05524U(64 + U^{1/2}) \right]^{-0.25} \quad (8)$$

식(8)의 계산결과 근사식에 의한 에러율은 $\eta < 10$ 에 서는 1/2차일 때 10^{-4} 이하이고, -1/2차 일 때 10^{-3} 이하이다.

전류-전압특성을 구하기 위한 캐리어 농도 N 과 전류 I 와의 관계는 레이저 다이오드의 동작특성을 기술하는 비율 방정식으로부터 구할 수 있다. 여기서는 발광성 재결합이 bimolecular 재결합에 의해 일어난다고 가정했을 때의 비율 방정식을 사용하기로 하며 그 근거에 대해서는 다음에 다시 기술하기로 한다.

$$\frac{dS}{dt} = \left\{ \frac{\Gamma A(N - N_0)}{(1 + \epsilon S)} - \frac{1}{\tau_p} \right\} S + \Gamma \beta BNP \quad (9)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I_r}{\alpha} - \frac{A(N - N_0)}{(1 + \epsilon S)} S - BNP \quad (10)$$

B : 발광성 재결합 계수 (1.4×10^{10} cm³/sec, $1.3 \mu\text{m}$ InGaAsP)^[8]
 P : 정공의 농도

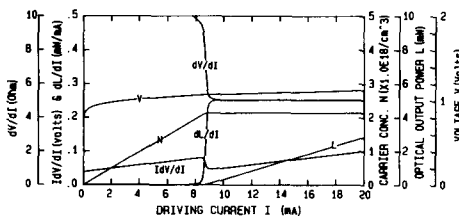
므로 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V_j &= (1/q)(E_{Fn} - E_{Fp}) \\ &= (1/q) \left\{ (E_{Fn} - E_c) + (E_v - E_{Fp}) + (E_c - E_v) \right\} \\ &= (kT/q)(\eta_c + \eta_v) + (1/q)E_g \end{aligned} \quad (6)$$

반도체 레이저에서와 같이 low level injection에서부터 high level injection까지 넓은 전류영역에서 동작하는 경우에는 이 형태의 비율 방정식이 더 정확한 결과를 주지만 해석적인 정상상태 해를 구할 수 없는

그림 1. 캐리어 수명이 일정하다고 가정하고 실험적 근사식을 사용하며 비발광성 재결합 및 누설전류가 없는 경우에 계산된 정특성 그래프.

Fig. 1. Laser diode static characteristics calculated under the assumption of constant carrier life time, experimental approximation for the junction voltage, and no nonradiative recombination and leakage current terms.



단점이 있다. 식(9)와 (10)으로부터 정상상태에서의 주입전류와 캐리어 농도와와의 관계를 구한다. 이때 정공의 농도는 전하 중성 조건(charge neutrality condition)이 만족됨을 가정하여 $BNP = BN(P_c + N - N_0) \cong BN(P_c + N)$ 을 이용하였다.

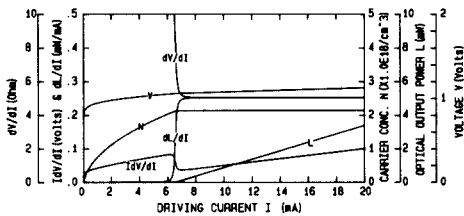
레이저 다이오드에 걸어진 전압을 V 라 했을 때 접합전압은 식(11)과 같이 주어진다.

$$V_j = V - IR_s = (kT/q)(\eta_c + \eta_v) + (l/q)E_g \quad (11)$$

그러므로, (11)식과 정상상태에서의 해로부터 전류-전압 특성 및 미분특성을 해석적인 형태로 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dl} &= \frac{dV_j}{dl} + R_s = \left\{ \frac{dV_j}{dN} \frac{dN}{dl} \right\} + R_s \\ &= \frac{kT}{q} \left\{ \frac{d\eta_c}{dN} + \frac{d\eta_v}{dN} \right\} \frac{dN}{dl} + R_s \end{aligned} \quad (12)$$

식(11)과 (12)를 이용하여 원하는 전류-전압특성 및 미분특성을 구할 수 있다. 그림 2는 비발광성 재결합 및 누설전류가 없고 캐리어 농도변화에 따른 에너지 갭 축소 영향이 없을 때 식(9)와 식(11)~식(12)의 결과로 계산된 레이저 다이오드의 정특성이다.



그림·2. Bimolecular 발광성 재결합을 가정하고 F-D 적분식을 사용하며, 비발광성 재결합 및 누설전류가 없고 캐리어 농도변화에 따른 에너지 갭 축소가 없는 경우의 정특성 그래프.

Fig. 2. Laser diode static characteristics calculated under the assumption of bimolecular recombination, the inverse Fermi-Dirac integral for the junction voltage, and no nonradiative and leakage terms. The energy gap shrinkage with the carrier density does not have been taken into account.

3. 에너지 갭 축소를 고려한 전류-전압 미분특성
 앞절에서는 캐리어 농도변화에 따른 에너지 갭 축소를 고려하지 않은 경우의 F-D 적분에 의한 전류-전압 미분특성에 대하여 알아 보았다. 이 절에서는 F-D 적분식을 사용하고 캐리어 농도변화에 따른 에너지 갭 축소를 고려했을 때의 전류-전압 미분특성에 대하여 알아 보겠다. 레이저 다이오드에 걸어진 전압을 V 라 했을 때 접합전압은 (11)식과 같이 주어지며 (11)식으로부터 미분특성을 해석적인 형태로 유도할 수 있다.

$$\frac{dV}{dl} = \frac{kT}{q} \left\{ \frac{d\eta_c}{dN} + \frac{d\eta_v}{dN} \right\} \frac{dN}{dl} + \frac{1}{q} \frac{dE_g}{dN} \frac{dN}{dl} + R_s \quad (13)$$

여기서 에너지 갭 E_g 는 캐리어 농도에 따라 다음과 같이 변화한다.⁽⁹⁾

$$E_g = E_{g0} - 1.6 \times 10^{-8} (N^{1/3} + P^{1/3}) \quad (14)$$

그러므로

$$\frac{dE_g}{dN} = 1.6 \times 10^{-8} \left\{ \frac{N^{-2/3} + P^{-2/3}}{3} \right\} \quad (15)$$

이다.

그림 3은 식(9)와 식(11)가(15)의 결과이다. 그림 1과 그림 2, 그림 3을 비교해 보면 threshold 이하에서만 V , dV/dI , $I(dV/dI)$, N 등의 변화가 있고, threshold 이상에서는 dV/dI , N 은 거의 일정하고 V , $I(dV/dI)$ 는 직선성을 보임을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 일단 레이저 동작이 일어나면 캐리어 농도가 거의 일정한 값으로 고정되므로⁽¹⁾, 접합전압이 고정되고 접합차재의 미분저항이 없어지게 되어, 결국 접합의 미분특성은 직렬저항에 의해서만 결정되는 현상과 일치한다. threshold 이하에서 캐리어 수명이 일정하다고 가정한 결과인 그림 1은 캐리어 농도가 전류에 비례해서 증가하지만, 그림 2, 3은 유효 캐리어 수명이 전류에 반비례하므로 처음에는 빨리 증가하다가 점점 그증가율이 줄어들게 된다. 따라서 캐리어 농도 증가율의 변화량은 그림 1에서 더 급격하게 변하게 된다. 그러나 dV/dI 는 식(12)에서 볼 수 있는 것처럼 dV/dI 과 dN/dI 의 곱에 비례하므로, F-D 적분에 의한 dV/dN 값이 더 큰영향을 미치게 되어 dV/dI 값의 변화량은 그림 2, 3에서 더 크게 된다. 그림 2는 그림 3과 같은 조건에서 캐리어 농도변화에 따른 에너지 갭 변화가 없느냐 있느냐에 대한 결과로 그림 3에서의 전압 V 가 그림 2의 결과에 비해 전 구간에서 줄어든 반면 $I(dV/dI)$, dV/dI 는 threshold 이하에서만

감소함을 보여 주고 있다. 이는 캐리어 증가에 의해 에너지 갭이 점점 작아지는 것과 threshold 이후에서 캐리어 농도가 고정되는 사실을 생각했을 때 당연한 결과이다. 이밖에 β 값이 클수록 threshold 부근에서 dV/dI , $I(dV/dI)$, dI/dI 특성이 완만해 지는 특성^[10]을 확인할 수 있으며, 이득계수값이 증가하면 threshold 전류가 작아지고, N^* (이득이 '0' 일 때 캐리어 농도)값이 증가할수록 threshold 전류가 높아진다. 또 cavity length l 값이 증가함에 따라 $I(dV/dI)$ 가 threshold 부근에서 완만한 특성을 보이면서 threshold 전류가 높아진다. 한편 광출력 L 은 다음 식에서 구하였다

$$L = \left\{ \frac{h\nu_g \alpha_m W l d}{2\lambda \Gamma} \right\} S \quad (16)$$

그리고 $I(dV/dI)$ - I , 또는 dV/dI - I 특성으로부터 threshold 전류 I_{th} , 직렬저항 R_s 를 구할 수 있다. I_{th} 는 그림에서 dV/dI , $I(dV/dI)$, dI/dI , 등 미분특성이 가장 급격히 변화하는 전류값, 즉 $-I^2(d^2V/dI^2)$ 가 최대가 되는 점을 잡는 것이 타당함을 보여주고 있다.

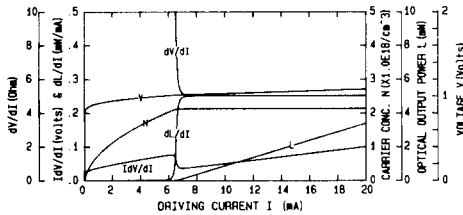


그림 3. bimolecular 발광성 재결합을 가정하고 F-D 적분식을 사용하며, 캐리어 농도 변화에 따른 에너지 갭 축소가 있는 경우의 정특성 그래프

Fig. 3. Laser diode static characteristics calculated under the assumption of bimolecular recombination, the inverse Fermi Dirac integral for the junction voltage, and no nonradiative and leakage terms. The energy gap shrinkage with the carrier density has been included.

III. 비이상성을 고려한 전류-전압 미분특성

지금까지 이상적인 경우에 대해 살펴 보았는데, 실제 레이저 다이오드는 이상적인 경우와 많은 차이를 보여 준다. 그 중에서 가장 중요한 요소가 병렬 누설전류와 비발광성 재결합 전류로, 병렬누설 경로는

저항성 누설경로와 다이오드성 누설경로, 기타 비선형 누설경로 등을 생각할 수 있으며^[6,11] 비발광성 재결합중 가장 중요한 것은 Auger 재결합이다. 이 장에서는 Auger 재결합 전류(I_{ak})와 생성-재결합 전류(I_{gr}), current spreading으로 인한 누설전류(I_{sk})의 영향만을 고려하며, 일정한 캐리어 수명을 가정하고 실험적 근사식을 이용한 모델과 F-D 적분식을 이용하고 bimolecular 재결합을 가정한 모델을 중심으로 비이상성의 영향을 고려하기로 한다. 마지막으로 비선형 이득계수 ϵ 으로 모델링된 spectral(또는 spatial) hole burning 등에 의한 이득포화 현상의 영향에 대하여 다룬다.

1. 비발광성 재결합의 영향

비발광성 재결합 전류에는 Auger 재결합 전류(I_{ak})와 생성-재결합 전류(I_{gr})가 대표적이며 다음과 같다.

$$I_{ak} = aC_{ak}N^3 \quad (17)$$

$$I_{gr} = I_{gr0} \left(\exp(V_j/n_i V_T) - 1 \right) \quad (18)$$

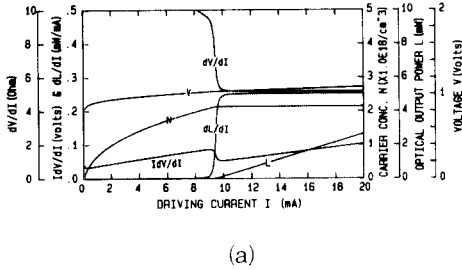
C_{ak} : Auger 재결합 계수

I_{gr0} : 생성-재결합 경로의 역포화 전류

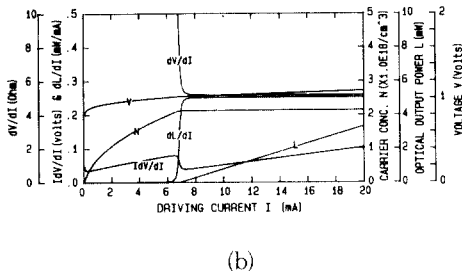
n_i : 생성 재결합 경로의 이상계수

따라서 전체전류 $I = I + I_{ak} + I_{gr}$ 로 주어진다. 그림 4 a)는 F-D 적분의 근사식을 사용하고, bimolecular 발광성 재결합과 캐리어 농도변화에 따른 에너지 갭의 변화를 가정하고, Auger 재결합과 생성-재결합 전류 모두를 고려한 것으로 그림 3에서 보여 주었던 이상적인 경우보다 threshold 전류값이 증가함을 알 수 있고, 1mA 근처에서 다른 양상을 보이고 있음을 알 수 있다. 그림 4 b)는 Auger 재결합의 영향을 보기 위해 그림 4 a)에서 Auger 재결합을 뺀 결과이다. 그림 4 a), b)를 좀 더 자세히 비교해 보면 흥미있는 점을 발견할 수 있는데, 저전류 영역에서(1mA 근처) 레이저 다이오드의 전류-전압특성 및 미분특성에 큰영향을 미치는 것은 Auger 재결합 전류보다는 생성-재결합 전류라는 사실과, threshold 전류를 증가시키는 결정적인 원인은 Auger 재결합 전류라는 사실이다. 또 한가지 중요한 사실은 비발광성 누설경로가 있을 때가 없을 때보다 threshold 전류값이 크지만, threshold를 넘어서면 레이저 동작이 일어남으로써 접합 양단 전압이 고정되어 비발광성 누설전류가 일정하게 되므로 전류-전압 미분특성은 이상적인 경우와 같은 형태로 주어진다. 그리고 threshold

근처에서 각 미분특성의 변화율이 Auger 재결합에 의해 완만해졌음을 알 수 있다. 여기에서는 보이지 않았지만 이러한 비발광성 재결합의 영향은 \parallel 장에서 제시한 3가지 경우에 대해 비슷한 형태로 나타난다.



(a)



(b)

그림 4. bimolecular 발광성 재결합을 가정하고 F-D 적분식을 사용하며, 캐리어 농도 변화에 따른 에너지 갭 축소가 있고 비발광성 재결합 중 a) Auger 재결합 전류 및 생성-재결합 전류를 포함한 정특성과 b) 생성-재결합 전류만을 포함한 정특성

Fig. 4. Laser diode static characteristics calculated under the same assumption as in Fig.3. But a)the Auger recombination and generation-recombination current and b)only the generation - recombination current have been taken into account.

2. 누설전류의 영향

누설전류의 영향은 current spreading만을 고려 하였으며 다음 식으로 주어진다. [12] 다른 형태의 누설 경로도 선형/비선형 병렬회로 소자로 쉽게 포함시킬 수 있다. 활성영역 가장자리에서의 전압을 V_c 라 하면

$$I_{lk} \cong 2I \left\{ \frac{2nV_r J_{sc}}{R_{sh}} \right\}^{1/2} \left\{ \exp \left(\frac{V_c}{2nV_r} \right) - 1 \right\} \quad (19)$$

R_{sh} : current spreading 층의 sheet 저항

($2.5k\Omega/\square$)

여기서 면저항 값 R_{sh} 는 clad 층의 불순물 농도가 $3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 일 때 비저항 ρ 가 $0.052\Omega\text{cm}$ 임을 이용하여 구했다.

그림 5는 실험적 근사식을 사용하고 발광성 재결합을 N/τ_n 이라 가정하며, 비발광성 재결합 전류 (I_{ag} 와 I_{gr}) 및 누설전류 (I_{lk}) 영향을 고려한 경우이고, 그림 6은 F-D 적분의 근사식을 사용하고 발광성 재결합을 BNP라 가정하고, 캐리어 농도 변화에 대한 에너지 갭 변화가 없고, 비발광성 재결합 전류 (I_{ag} 와 I_{gr}) 및 누설 전류 (I_{lk})의 영향을 고려한 경우이다. 그림 7은 그림 6에 비해 캐리어 농도 변화에 따른 에너지 갭 변화를 고려한 결과를 나타낸다. 그림 5와 6을 비교해 보면 threshold 전류값이 실험적 근사식을 이용한 경우가 더 높게 나타나고 있음을 알 수 있는데, 이는 그림 5, 6에서 비이상성을 제외한 각각의 결과인 그림 1과 그림 2에서는 threshold 전류값이 같음에 비추어 current spreading 효과가 실험적 근사식을 이용한 경우에 더 크게 나타났음을 보여준다. 반면 그림 6과 7을 비교해 보면 threshold 전류값은 에너지 갭이 캐리어 농도변화에 따라 변화하는 그림 7의 경우가 현저하게 작음을 알 수 있다. 그 이유는 에너지 갭의 축소로 접합전압값이 작아 누설전류가 작아졌기 때문이다. 그림 5~7의 결과는, 병렬누설 경로가 있을 때에는 레이저 다이오드의 접합전압 V_c 값을 정확히 계산해 내는 것이 중요하므로, F-D 적분식을 사용하고 에너지 갭 축소를 고려한 모델을 사용해야 한다는 것을 보여준다. threshold 전류 이하에서 그림 5가7의 결과를 비교 검토해 보면 캐리어 농도 증가율에서 많은 차이를 보이고 있으며, $I(dV/dI)$ 특성 또한 저전류 영역(1~4mA)에서 차이를 나타내고 있다. 특히 그림 7에서 알 수 있듯이 캐리어 농도변화에 따른 에너지 갭 변화를 고려한 모델인 경우 $I(dV/dI)$ 특성은 저전류 영역(1~4mA)에서 그 값이 감소하다가 증가하는 결과를 얻을 수 있다. 이 현상은 current spreading에 의한 병렬누설 경로의 영향임을 알 수 있다. [11] 또 병렬 누설경로 때문에 2mA 이하에서는 캐리어 농도의 증가율이 매우 낮게되어 접합전압도 이상적인 경우에 비해 낮게 나타난다.

이상, 누설전류의 영향을 고려한 결과를 살펴보았는데, 이 중에서 가장 정확한 결과는 그림 7로, F-D 적분식을 사용하고 캐리어 농도 변화에 따른 에너지 갭 변화를 고려한 모델이 비발광성 및 누설전류 영향 등 비이상성을 고려하여 레이저 다이오드의 특성을 해석하는 데에 가장 적절한 모델이라는 결론을 얻을

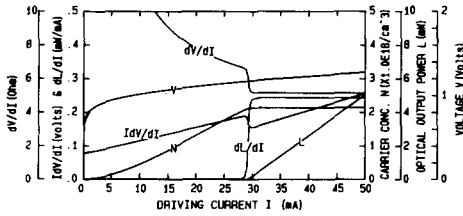


그림 5. 캐리어 수명이 일정하다고 가정하고 실험적 근사식을 사용하여 비발광성 재결합 전류 I_{0q} 와 I_{0r} 및 누설전류 I_k 가 있는 정특성 그래프

Fig. 5. The same figure as Fig. 1 with the Auger recombination and leakage current considered additionally.

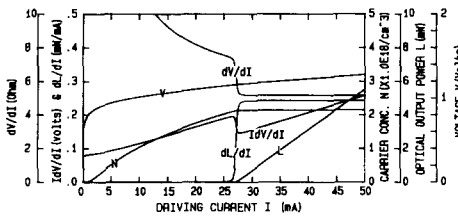


그림 6. bimolecular 발광성 재결합을 가정하고 F-D 적분식을 사용하며, 캐리어 농도 변화에 따른 에너지 갭 축소가 없고 비발광성 재결합 전류 I_{0q} 와 I_{0r} 및 누설전류 I_k 가 있는 정특성 그래프

Fig. 6. The same figure as Fig. 2 with the Auger recombination and leakage current included additionally.

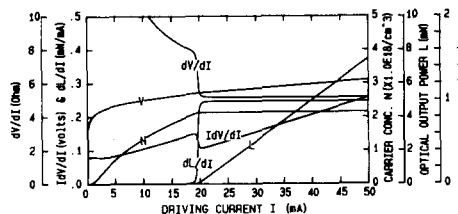


그림 7. bimolecular 발광성 재결합을 가정하고 F-D 적분식을 사용하며, 캐리어 농도 변화에 따른 에너지 갭 축소가 있고 비발광성 재결합 전류 I_{0q} 와 I_{0r} 및 누설전류 I_k 가 있는 정특성 그래프.

Fig. 7. The same figure as Fig. 3 with the Auger recombination and leakage current considered additionally.

수 있다.

3. 비선형 이득계수의 영향

비선형 이득계수 ϵ 은 레이저 다이오드의 변조특성에 중요한 영향을 미치는 중요한 변수로서, 미분특성으로부터 이 값을 유추해 낸다는 것은 매우 가치있는 일이다. ϵ 값이 커지면 식(2), (3)과 식(11), (12)의 비율 방정식으로부터 알 수 있는 바와 같이 threshold 이상에서의 캐리어 농도, 즉 접합전압의 고정이 불완전하게 되어 접합의 미분저항이 '0'보다 커지게 된다. 그림 8은 ϵ 값이 $dV/dI-I$, $I(dV/dI)$ -특성에 미치는 영향을 F-D 적분식을 사용하고 에너지 갭 축소를 고려한 모델을 이용하여 계산한 결과로 ϵ 값이 클수록 threshold 이상에서의 접합의 미분저항이 커지고, 따라서 $I(dV/dI)$ -특성의 기울기가 커짐을 알 수 있다. 이러한 경향은 $\epsilon > 10^{17}$ 일 때부터 현저하게 나타나므로 이영역에서는 직렬저항 R_s 값을 정확하게 측정할 수 있다면 ϵ 값을 전류-전압 미분특성으로부터 유추해 낼 수 있음을 보여준다. 한편 threshold 전류값 이하에서는 모든 특성이 비선형 이득계수 ϵ 에 관계없이 같은데, 이것은 레이저가 발진을 시작하기 이전이므로 광자밀도 S 가 무시할 수 있을 정도로 낮음을 감안했을 때 당연한 결과이다.

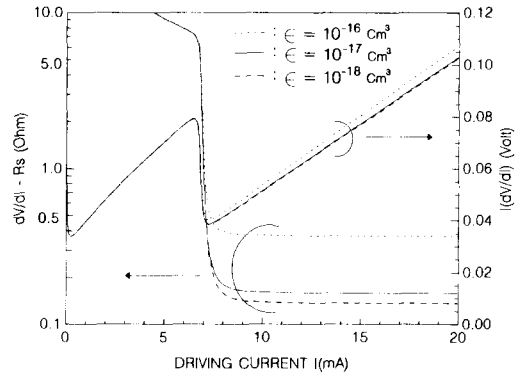


그림 8. 비선형 이득계수 ϵ 값에 따른 $dV/dI-I$ 및 $I(dV/dI)$ 의 변화

Fig. 8. Effects of the nonlinear gain coefficient ϵ on $dV/dI-I$ and $I(dV/dI)$ characteristics. The same assumptions as in Fig. 3 have been used.

IV. 결론

레이저 다이오드는 전기 에너지를 coherent한 빛 에너지로 변환시키는 소자로 전류-전압특성을 해석함으로써, 레이저 다이오드의 광전변환 특성의 대부분

을 알아낼 수 있다. 그러므로 이를 해석하기 위한 보다 정확한 모델이 제시되어야만 한다. 지금까지 세가지 모델을 중심으로 살펴 보았는데 실험적 근사식을 이용하여 캐리어 수명이 일정하다고 가정한 모델과 F-D 적분식을 사용하고, bimolecular 발광성 재결합을 가정하며 캐리어 농도에 따른 에너지 갭 변화를 고려하지 않은 모델은 비발광성 재결합과 누설경로가 없는 이상적인 경우에는 유용성이 있으나, 비발광성 재결합 전류 및 누설전류가 존재하는 비이상적인 경우에는 상당한 오차를 범할 수 있음을 III장에서 확인할 수 있었다. 따라서 비이상성까지를 포함하여 레이저 다이오드의 정특성을 해석하기 위해서는 F-D 적분식을 사용하고 bimolecular 발광성 재결합을 가정하며, 캐리어 농도에 따른 에너지 갭 변화를 고려한 모델을 사용해야 함을 보였다. 그 예로서 current spreading에 의한 누설전류의 영향을 고려한 모델의 예를 보였으며 이것은 지금까지 알려진 모델 중 가장 정확한 모델이다.

앞으로의 과제는 비선형 이득계수에 영향을 줄 수 있고, threshold 에서 불완전한 전압고정의 원인이 될 수 있는 축 방향 및 횡 방향으로의 비균일성의 영향을 포함하는 연구와 이 모델을 기초로 레이저 다이오드의 변수를 전류-전압특성만으로 정확히 측정하기 위한 방법에 대한 연구이다.

參 考 文 獻

[1] 김상배, "레이저 다이오드의 비이상적인 전류-전압 미분특성에 관한 연구", 전자공학회 논문지, 제28권, A편, 제10호, pp.830-839, 1991년 10월

[2] T. L. Paoli, "Theoretical derivatives of the electrical characteristic of a junction laser operated in the vicinity of threshold", *IEEE. J. Quantum Electron.*, vol, QE-14, No.1, pp.62-68, Jan., 1978.

[3] R. Olshansky, J. Lacourse, T. Chow, and W. Powazinik, "Measurement of radiative, Auger, and nonradiative currents in 1.3 μ m InGaAsP buried heterostructure lasers", *Appl. Phys. Lett.*, vol.50, no. 6, pp.310-312, Feb. 1987.

[4] D. P. Wright et al., "Electrical derivative characteristics of InGaAsP buried

heterostructure lasers", *J. Appl. Phys.*, vol.53, no. 3, pp.1364-1372, March, 1982.

[5] G. P. Agrawal and N. K. Dutta, *Long-wavelength Semiconductor Lasers*, Van Nostrand Reinhold, New York, pp.227, 1986.

[6] R. F. Pierret and G. W. Neudeck, *Modular series on solid state devices, Vol. 1, Semiconductor Fundamentals*, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, pp.43-45, 1988.

[7] J. S. Blakemore, "Approximations for Fermi-Dirac integral, especially the function $F_{1/2}$ (가) used to describe electron density in a semiconductor", *Solid-State Electronics*, vol.25, no.11, pp.1067-1076, 1982.

[8] F. Stern, "Electrical characterization of heterostructure lasers", *J. of Appl. Phys.*, vol.47, 1976, particularly Fig.6.

[9] H. Ghafoori-Shiraz, "Temperature, band gap-wavelength, and doping dependence of peak-gain coefficient parabolic model parameters for InGaAsP/InP semiconductor laser diodes", *J. of Lightwave Technology*, vol.6, no.4, April, 1986.

[10] P. J. Anthony, "Fabrication and characterization of semiconductor laser", Ch.9, of *Optoelectronic Technology and Lightwave Communication Systems*, (C.Lin ed.), Van Nostrand Reinhold, New York, pp.235-238, 1989.

[11] H. Ishikawa et al., "Lasing-induced change in the differential resistance of stripe geometry Ga_{1-x}Al_xAs DH lasers," *Jap. J. of Appl. Phys.*, vol.18, no.2, pp.333-341, Feb., 1979.

[12] 도만희 외, "횡방향 p-n 접합으로 누설전류를 줄인 1.3 μ m InGaAsP/InP ridge waveguide 레이저 다이오드의 설계", 전자공학회 논문지, 제 29권 A편, 제 12호, pp. 1170-1181, 1992년 12월

 著者紹介



金昌均(正會員)

1963年 4月 15日生. 1986年 2月
 아주대학교 전자공학과(학사).
 1992年 8月 아주대학교 산업대학
 원 전기, 전자공학과(석사). 1989
 年 8月~현재 금성생산기술 연구
 소 주임연구원.

都萬熙(學生會員) 第 29卷 A編 第 12號 參照
 현재 한국통신 연구개발단

金相培(正會員) 第 29卷 A編 第 12號 參照
 현재 아주대학교 전자공학과 조교
 수