

論文 91-28A-10-8

# 레이저 다이오드의 비이상적인 전류-전압 미분특성에 관한 연구

## (Non-Ideal Electrical Derivative Characteristics and Their Implications in Laser Diodes)

金 相 培\*

(Sang Bae Kim)

### 要 約

레이저 다이오드의 전류-전압 및 그 미분특성과 전광변환 특성사이의 상관관계를 레이저 다이오드의 비이상적인 전기적특성의 영향을 중심으로 이론적으로 분석하고 실험적으로 확인하였다. 레이저 다이오드는 전기적으로 펌핑하는 소자이며, 발광성, 비발광성 캐리어 재결합이 모두 전류로 나타나고 캐리어 농도는 전압으로 나타나므로 전류-전압 및 그 미분특성의 측정을 통해 순수하게 광학적인 특성을 제외한 대부분의 레이저 다이오드 특성변수들을 측정할 수 있다.

### Abstract

The correlation between electrical (derivative) characteristics and electro-optical conversion characteristics of laser diodes has been investigated both theoretically and experimentally with emphasis on the nonideal behavior. Laser diodes are electrically pumped devices with the current resulting from the carrier recombination dynamics, and their junction voltage is given by the separation of the quasi-Fermi levels which are determined by the injected carrier concentration. Thus most of the information related to laser diode operation characteristics is revealed in the electrical characteristics which are relatively simple to measure with sufficient accuracy. Therefore the measurement of electrical characteristics and their derivatives is a very useful tool of laser diode characterization.

### I. 서 론

레이저 다이오드는 전기에너지를 coherent 빛 에너지로 변환시키는 전광변환소자의 하나로서 레이저 동작이 일어나기 전인 threshold 전류 이하의 순방향 전류에서는 보통의 pn 다이오드와 비슷한 전기적 특성

을 갖지만 threshold 부근과 그 이상의 전류에서는 유도 방출에 의한 캐리어의 재결합때문에 다른 새로운 현상들이 나타나게 된다. 그중에서 가장 두드러진 것이 threshold 이하에서는 전류에 거의 비례해서 증가하던 활성층에서의 캐리어 농도가 threshold 이후에는 거의 일정한 값으로 고정되는 현상이다. 이는 정상상태에서는 활성층에서의 광이득이 전체 손실보다 커질 수 없기 때문에 발생하는 필연적인 현상이며, 따라서 전류의 증가로 인해 과잉 공급되는 캐리어는 재결합을 통해 레이저 빛으로 변환되거나 활성층 밖

\*正會員, 亞洲大學校 電子工學科  
(Dept. of Elec. Eng., Ajou Univ.)  
接受日字: 1991年 7月 11日

으로 새나가게 된다. 이런 이유로 누설전류가 없으면 레이저 다이오드의 광출력-주입전류 특성은 기본적으로 선형적이게 된다.

한편 유도 방출에 의해 캐리어 농도가 고정됨에 따라 전자와 정공의 quasi-Fermi 준위의 차이로 주어지는 pn 접합 양단의 접합전압이 고정되게 되어 접합 자체의 미분저항이 없어지므로 접합의 미분특성(또는 동특성)은 1차적으로는 직렬저항에 의해서만 결정되고 다이오드 특성은 2차적인 효과만을 나타내게 된다. 이 때문에 레이저 다이오드의 전류-전압 미분특성은 레이저 다이오드의 동작과 관련하여 오랫동안 관심의 대상이 되어왔다<sup>1,2,3</sup>. 그것은 레이저 다이오드가 전광변환 소자이기 때문에 전기적 특성이 광학적 특성과 밀접하게 관련되어 있을 뿐 아니라 전기적 특성의 측정이 쉽고 간편하면서도 정밀하기 때문이다. 즉 레이저 다이오드는 전기적으로 덤핑을 해주는 레이저이므로 누설전류, 직렬저항, 고주파변조에서의 임피던스 정합 등의 특성이 콤팩트 효율을 결정한다. 이러한 병렬 누설전류, 직렬저항 등은 전류-전압 미분특성을 측정함으로써 예측할 수 있다.<sup>1,2,4,5</sup> 또 캐리어의 재결합이 곧바로 전류로 나타나기 때문에 캐리어의 재결합 과정을 전류를 통해 알아 낼 수 있다. 즉 저전류에서의 다이오드 이상계수를 통해 발광, 비발광 전류의 비율을 알아낼 수 있으며 접합전압의 고정이 일어나는 전류가 곧 threshold 전류이므로 threshold 전류를 전기적 특성만을 측정함으로써 알아 낼 수 있다.<sup>1,2,3</sup> 뿐만 아니라 캐리어 농도 변화를 수반하는 광출력-주입전류 특성상의 비선형성, 즉 kink도 전류-전압특성의 측정을 통해 알아 낼 수 있다.<sup>1,6</sup>

한편으로는 접합전압의 고정을 불완전하게 하는 요소들인 누설전류<sup>7</sup> 활성층 내에서의 캐리어 확산<sup>8</sup> 등에 대한 연구도 이루어졌다. 또 이러한 특성들이 레이저의 수명을 결정하므로 수명과 전류-전압특성과의 상관관계에 대한 연구도 이루어져 일정한 순방향 전류를 흘리기 위한 전압값이 작을수록 threshold 전류가 증가함도 밝혀졌다.<sup>9</sup> 이는 비발광전류의 증가에 따른 당연한 현상이기도 하다. 이뿐만 아니라 접합의 질, Ohmic 접촉공정 등을 평가하는 데 있어서도 전류-전압특성은 매우 중요한 의미를 갖는다.

이와같은 유용성 때문에 전류전압특성 및 미분특성의 측정은 레이저 다이오드의 성능을 평가하는 데에 많이 사용되고 있고<sup>10</sup> 이론적인 많은 연구가 이루어진 반면에 측정결과를 해석하고 그 원인을 분석하는데에 필요한 해석적 모델, 실험적인 전류-전압특성과 광출력-전류특성과의 상관관계 및 1mA 이하의 낮은 전류영역에서의 특성 등에 대한 연구는 비교적 잘

이루어지지 않은 형편이다. 이 논문에서는 측정된 전류-전압 및 미분특성이 레이저 다이오드의 전광변환특성과 어떤 상관관계를 갖는 지에 대해 낮은 전류영역까지를 포함하여 비이상적인 특성을 중심으로 고찰하기로 한다. 먼저 II 장에서는 이를 위한 이론적인 배경과 해석적 모델 및 컴퓨터 계산결과에 대해 살펴보고, III 장에서는 II 장의 결과를 바탕으로 하여 비이상적인 전류-전압 특성을 갖는 레이저 다이오드를 중심으로 하여 비이상성의 원인 및 전광변환 특성과의 상관관계에 대한 실험결과를 다루고 IV 장에서 결론을 맺기로 한다.

## II. 이론적 배경

레이저 다이오드의 전류-전압특성은 threshold 이하에서는 보통의 p-n 다이오드와 같이 다음과 같이 주어진다.

$$I = I_0 \left[ \exp \frac{V - IR_s}{n V_T} - 1 \right] + I_{gr} \left[ \exp \frac{V - IR_s}{n_1 V_T} - 1 \right] \\ \approx I_0 \left[ \exp \frac{V - IR_s}{n V_T} \right] + I_{gr} \left[ \exp \frac{V - IR_s}{n_1 V_T} \right] \quad (1)$$

식(1)에서 첫항은 발광성 재결합항인 확산전류로서 이상계수  $n$ 은 약 1.5 정도의 값을 가지며 두번째 항은 비발광성 생성-재결합 전류로서 이상계수는 약 2.2 정도가 된다.  $R_s$ 는 직렬저항,  $V_T$ 는 thermal voltage 이다. 한편 레이저 다이오드의 동작특성을 기술하는 비율방정식은 다음과 같이 주어진다.

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

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

여기서  $S$  = 광자 밀도,  $N$  = 캐리어 밀도,  $\Gamma$  = 광구속 계수,  $A$  = 이득계수,  $N_g$  = 이득이 0일 때 캐리어 밀도,  $\epsilon$  = 비선형 이득계수,  $\tau_p$  = 광자수명,  $\beta$  = 자연방출계수 (spontaneous emission factor),  $\tau_n$  = 발광성 재결합에 의한 캐리어 수명,  $\alpha$  = 전자의 전하량  $\times$  활성영역의 부피,  $I_r$  = 발광성 주입전류 ((1)식의 첫항),  $t$  = 시간을 나타낸다. 표. 1에 계산에 사용된 변수값들을 정리하였다.

식(1)은 threshold 이하에서의 I-V, 식(2)~(3)은 전 영역에서 N-S-I의 관계를 나타내므로 레이저 다이오드의 I-V 특성을 기술하려면 threshold 이하에서의 I-V 특성인 (1)과 일치하도록 N-V 관계를 정해 주어

표 1. 계산에 사용된 레이저 다이오드 특성변수 및 값

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

| 기호       | 변수설명           | 변수값   |
|----------|----------------|---|
| $\Gamma$ | 광구속계수          | 0.3   |
| $\tau_p$ | 광자수명           | 1.6 (ps)  |
| $\tau_n$ | 캐리어수명          | 2.2(ns)   |
| $\alpha$ | 활성영역부피×전자전하량   | $9 \times 10^{-30}(\text{C} \cdot \text{cm}^3)$ |
| A        | 광이득계수          | $1.875 \times 10^{-6}(\text{cm}^2/\text{sec})$  |
| N        | 활성영역의 캐리어 밀도   | $(\text{cm}^{-3})$                              |
| $N_g$    | 광이득이 0인 캐리어 밀도 | $1 \times 10^{18}(\text{cm}^{-3})$              |
| S        | 활성영역에서의 평판광자밀도 | $(\text{cm}^{-3})$                              |
| $\beta$  | 사인방출 결합계수      | $1 \times 10^{-4}$                              |

야 한다. 일반적으로 N과 V의 관계는 quasi-Fermi 준위와 활성층의 상태밀도를 사용한 Fermi-Dirac 적분식을 이용하여 구할 수 있지만 불순물 도핑에 의한 상태밀도의 변화등까지를 고려하려면 너무 복잡하게 되므로 비율방정식에서 일정한 캐리어 수명을 가정할 것과 일치하도록 다음과 같이 가정한다.

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

여기서 V<sub>j</sub>는 접합전압 즉 전자와 정공의 quasi-Fermi 준위 차이이며 식(3)에서 S=0인 정상상태에서  $I_r = \alpha N / \tau_n$ 이므로  $I_0 = \alpha N_0 / \tau_n$ 이 되어 (1)식과 일치하게 된다. (1)식에서의 생성-재결합 전류는 별개의 병렬 다이오드로 취급하였다. (4)와 같이 가정하면 해석적인 결과를 얻을 수 있으며 실험 결과와도 일치함을 알 수 있다. (2), (3)의 정상상태 해와 (4)식을 이용하면 생성-재결합전류를 무시할 수 있는 threshold 부근과 그 이상의 고전류 영역에서의 전류-전압 미분특성을 복잡하긴 하지만 해석적인 형태로 유도할 수 있으며 확산전류를 무시할 수 있는 threshold 이하의 저전류영역, 즉 생성-재결합 전류가 중요한 영역에서는 (1)식의 마지막 항만을 사용하면 전류-전압특성 및 미분특성을 유도할 수 있으며 이때는 비율방정식을 고려하지 않아도 된다. 먼저 확산전류가 우세한 고전류영역에서는 (4)식으로부터 다음과 같이 주어진다.

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

(2), (3)식으로부터  $\epsilon$ 과  $\beta$ 가 0이면 (I/N) (dN/dI)가

threshold 이하에서는 1, 이상에서는 0, threshold에서는 1에서 0으로 변하는 계단함수가 됨을 알 수 있다. 그러나  $\epsilon$ 과  $\beta$ 는 표.1에서 볼 수 있듯이 작지만 0은 아니기 때문에 (I/N) (dN/dI)는 threshold 이하에서는 거의 1, 이상에서는 거의 0, 부근에서는 1에서 0으로 급격하긴 하지만 연속적으로 변하므로 (5)식은 다음과 같이 근사된다.

$$\frac{dV}{dI} = \begin{cases} \frac{nV_T}{I} + R_s & (\text{threshold 이하}) \\ R_s & (\text{threshold 이상}) \end{cases} \quad (6)$$

따라서 IdV/dI도 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} I \frac{dV}{dI} &= \left( \frac{d}{dV} \ln I \right)^{-1} = \ln 10 \left( \frac{d \log I}{dV} \right)^{-1} \\ &= \begin{cases} nV_T + IR_s & (\text{threshold 이하}) \\ IR_s & (\text{threshold 이상}) \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

(6)에서  $nV_T/I$  항은 전류의 증가, 즉 캐리어 농도의 증가에 따른 quasi-Fermi 준위 차이의 증가에 기인된 항이므로 레이저 동작과 함께 없어지게 되며 (7)식으로부터 IdV/dI는 이상계수 n과 관계됨을 알 수 있다. threshold 전류부근에서의 (I/N) (dN/dI) 값의 변화는  $\beta$  값이 커지면 커질수록 완만해지며 이는  $\beta$  값이 클수록 완만한 threshold 특성을 보여주는 다른 실험적인 사실과 일치한다.

그림 1은 생성-재결합전류만을 포함하는 이상적인 레이저 다이오드의 V, dV/dI, IdV/dI, N, 광출력 L, dL/dI와 전류 I와의 관계를 보여주고 있다. 여기서 한편으로부터의 광출력 L은 다음 식으로 주어진다.

$$L = \frac{h c v_g \alpha_m V_a S}{2 \lambda \Gamma} \quad (8)$$

h는 planck상수,  $\lambda$ 는 레이저 파장, c는 광속도,  $v_g$ 는 군속도,  $\alpha_m$ 는 거울손실,  $V_a$ 는 활성영역 부피이다. 따라서 IdV/dI-1 또는 dV/dI-I특성으로부터 이상계수 n, 직렬저항 R<sub>s</sub>, threshold 전류 I<sub>th</sub>를 구할 수 있다. I<sub>th</sub>의 정의 또는 측정법에 대해서는 아직도 논란의 여지가 있지만 그림 1의 결과로 보면 dV/dI, IdV/dI, dL/dI 등의 미분특성이 가장 급격히 변하는 전류 값 즉,  $-I^2 d^2V/dI^2$ 가 최대가 되는 점을 잡는 것이 타당함을 알 수 있다.<sup>[10]</sup> threshold 전류 부근에서 각 변수들의 변화율은  $\beta$ 가 커질수록 작아지게 되며, (2), (3)의 비율방정식에서 가정한 바와 같이 각 변수들이 레이저 공진기 내에서 일정하기만 하면 이 변화율로부터  $\beta$  값을 추정해 내는 것이 가능하다.<sup>[7]</sup>

그러나 실제 다이오드는 그림 1의 이상적인 경우

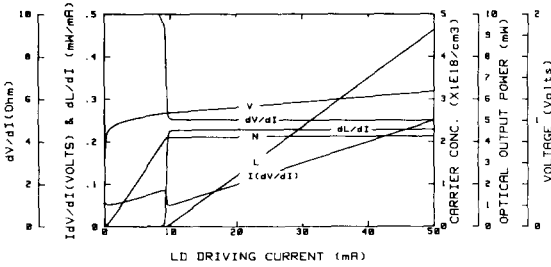


그림 1. 생성-재결합 전류만을 고려한 이상적인 레이저다이오드의 정특성. 주입전류에 따른 전압 V, 동저항 dV/dI, I(dV/dI), 캐리어농도N, 광출력 L, 변환효율 dL/dI의 변화를 보여준다

Fig. 1. Terminal voltage V, dynamic resistance dV/dI, I(dV/dI), injected carrier concentration N, and optical output power L versus current I curves calculated with the generation-recombination current term taken into account.

와는 많은 차이를 보인다. 그중에서 가장 중요한 요소가 병렬 누설 전류항으로 여기에는 저항성 누설 경로와 다이오드성 누설 경로, 기타 비선형 누설 경로를 등을 생각할 수 있다. 또 회로적인 구성에 따라서는 직렬저항 부분을 제외한 레이저 다이오드와 병렬 연결된 병렬경로나 직렬저항을 포함한 레이저 다이오드와 병렬 연결된 경로냐에 따라 저전류 누설 경로와 고전류 누설 경로로 나눌 수 있다. 이와 같은 구분은 저전류 누설 경로는 threshold 이상에서는 양단의 전압이 고정되므로 저전류 영역에서 중요한 역할을 하는데 비해 고전류 누설 경로는 직렬 저항 때문에 레이저를 통한 전류의 증가에 따라 양단에 걸리는 전압이 threshold 이상에서도 지속적으로 증가하므로 고전류 영역에서 중요한 역할을 하기 때문이다. 저항성 저전류 누설 경로가 있는 경우에는 생성-재결합 전류항을 무시할 수 있을 때 그 병렬 저항값을  $R_p$ 라고 하면

$$\frac{dV}{dI} = \frac{R_p R_0}{R_p + R_0} + R_s \quad (9)$$

$$I \frac{dV}{dI} = \left[ \frac{V_j}{R_p} + I_0 \exp\left\{ \frac{V_j}{nV_T} \right\} \right] \frac{dV}{dI} \quad (10)$$

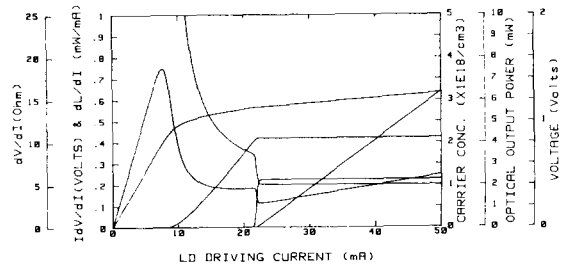
로 주어진다. 여기서 레이저 다이오드의 동저항  $R_0$ 는 다음과 같다.

$$R_0 = \frac{nV_T}{I_0 \exp(V_j/nV_T)} \quad (11)$$

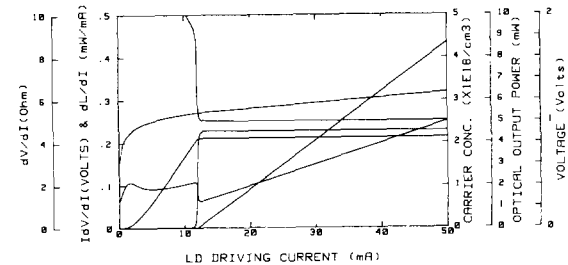
(9), (11)식에서 dV/dI값은 저전압에서는  $R_p$ 에 의해, 고전압에서는  $R_0$ 에 의해 결정됨을 알 수 있으며 따라서 IdV/dI값은 그 중간 영역에서 최대값을 갖게 된다.<sup>5)</sup> (10)식을 I에 대해 미분하여 그 최대값을 구하면 IdV/dI가 최대인 전압값을  $V_p$ 라 할 때

$$I \frac{dV}{dI} \quad V = V_p = V_p - nV_T \quad (12)$$

가 되어 동저항에 걸리는 전압과 실제 전압이  $nV_T$ 만큼 차이가 나는 점에서 IdV/dI값이 최대가 된다. 이상의 결과로부터 IdV/dI-I 특성의 저전류쪽에서의 slope로부터  $R_p$ 값을, (12)식을 이용하여 레이저 다이오드의  $nV_T$ 값을 구함으로써 병렬 저항성 누설경로를 분석할 수 있다. 그림 2 (a)에서 처럼 저항일 때에는 IdV/dI-I 특성곡선이 원점에서 출발하는데 비해, 다



(a)



(b)

그림 2. (a)  $100\Omega$ 의 저항성 저전류 누설경로와 (b) 다이오드성 저전류 누설경로(역포화전류= $10^{-9}A$ , 이상계수 2.2, 직렬저항= $50\Omega$ )가 레이저 다이오드의 정특성에 미치는 영향. I(dV/dI)-I곡선이 최대가 되는 전류값  $I_p$  이하에서는 두 경우 다 캐리어농도의 증가율이 낮아 그림 1보다 threshold 전류값이 증가했으며, 차이점은 I(dV/dI) 값의 I=0에서의 절편이 (a)의 경우에는 0이나 (b)의 경우에는 0이 아니다. 그 기울기는 누설경로의 저항값이 된다

Fig. 2. Effects of low current (a) resistive leakage and (b) diode leakage path on laser diode static characteristics.

이오드성 누설경로에 대해서는 그림 2 (b)에서 보는 것처럼  $I=0$ 일때  $IdV/dI$ 값이  $n_p V_T$ 가 되고 그 기울기가  $R_{sp}$ 가 되는 점만이 다르다. 여기서  $n_p$ 는 누설경로의 이상계수,  $R_{sp}$ 는 누설경로의 직렬저항이다.

그림 2는 저전류 누설 경로가 있을 때 계산된 레이저 다이오드의 정특성을 보여주고 있다. 여기서 주목할 만한 변수는  $IdV/dI$ 가 최대가 되는 전류  $I_p$  값으로  $I < I_p$ 일 때에는 캐리어 농도  $N$ 이 거의 증가하지 않기 때문에 threshold 전류는 누설경로가 없을 때보다 최소한  $I_p$  이상 커지게 되며 따라서  $I_p \approx V_p/R_p$  값이 다이오드성이든 저항성이든 관계없이 저전류 영역에서의 누설 전류를 나타내는 척도이다. 또 한가지 특기할 만한 사실은 이 저전류 누설 경로는 레이저 다이오드의 미분변환효율  $dL/dI$ 값에는 거의 영향을 못주고 단지 threshold 전류만을 증가시킨다는 점이다. 이는 레이저 동작이 이루어지면서 접합양단의 전압, 즉 누설경로 양단의 전압이 고정되어 누설전류가 고정되기 때문이다. 이와같이 전류 누설 메카니즘이 threshold 전류를 분기점으로 하여 달라진다.

레이저 다이오드의 최대 광출력과 변환효율  $dL/dI$ 값을 결정하는 변수로는 레이저 다이오드 자체의 고유한 특성 변수외에 고전류영역에서의 누설전류가 있으며 여기에는 레이저 다이오드의 구조에 따라 다이오드성, 트랜지스터성 및 thyristor성의 누설 경로가 있다. 보통 레이저 다이오드에서는 온도와 이 누설전류가 광출력과 변환효율에 가장 큰 영향을 준다. 이 누설 전류의 경로를 정확히 알아내기는 쉬운 일이 아니지만 누설전류의 양은 온도변화에 따른 양자효율의 변화를 안다면 L-I 특성 또는  $dV/dI-I$ ,  $IdV/dI-I$ 특성 곡선으로부터 유추해 낼 수 있다. 가장 쉬운 접근 방법은 병렬 누설 경로의 영향이 커지면 레이저 다이오드 양단의 등가적인 저항값이 감소하는 것처럼 보일 것이므로  $dV/dI$ 값의 감소량 또는  $IdV/dI-I$  곡선의 기울기 감소 등으로부터 유추해 내는 것이다. 병렬 누설 경로에 의한  $IdV/dI$ 값의 변화는 (7)식을 이용한  $nV_T$ 값의 측정에 큰 오차를 줄 수 있으며 원래 값보다 이상계수를 크게 보이도록 하므로 주의해야 한다.

그림 3은 고전류 다이오드성 누설경로가 있을 때 계산된 레이저 다이오드의 정특성 곡선들을 보여주고 있다. 재미있는 사실은  $IdV/dI-I$ 와 L-I,  $dV/dI-I$ ,  $dL/dI-I$ 곡선 사이의 평행성으로 기울기 또는 값의 감소가 누설전류의 양을 나타내므로 당연한 결과이다. 이 고전류 누설 경로가 커지면 threshold 전류의 증가와 변환 효율의 감소는 물론 레이저 동작 자체를 불가능하게 할 수도 있다. 트랜지스터 및 thyristor 성

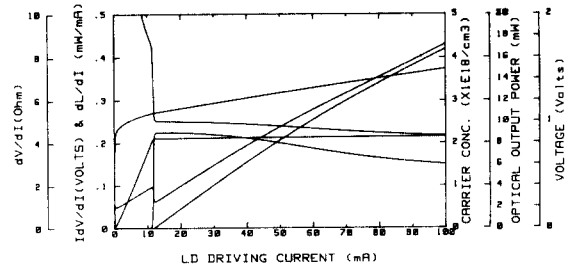


그림 3. 다이오드성 고전류 누설전류가 레이저 다이오드의 정특성에 미치는 영향. I ( $dV/dI$ )-I와 L-I곡선, ( $dV/dI$ )-I와  $dL/dI$ 곡선 사이의 평행성이 보인다

Fig. 3. Influence of a high current diode leakage path on laser diode static characteristics.

누설전류의 영향과 계산방법 및 결과에 대한 상세한 기술은 후속 논문에 발표할 예정이다.

threshold 전류  $I_{th}$ 를 전후한  $dV/dI$  및  $IdV/dI$ 값의 감소량도 관심의 대상이다. 저항성 저전류 누설 경로만 있을 때에는 다음과 같이 된다.

$$\Delta \left( \frac{dV}{dI} \right) = \frac{R_D R_P}{R_D + R_P} = \frac{nV_T R_P}{nV_T + I_{tho} R_P} \quad (13)$$

$$\Delta \left( I \frac{dV}{dI} \right) = I_{th} \Delta \left( \frac{dV}{dI} \right) \approx \left[ 1 + \frac{I_{PL}}{I_{tho}} \right] nV_T \quad (nV_T \ll I_{tho} R_P \text{ 일 때}) \quad (14)$$

여기서  $I_{PL} = V/R_p$ 로 저항  $R_p$ 를 통해 흐르는 누설 전류이며  $I_{tho}$ 는  $R_p$ 가 무한대일 때, 즉 누설경로가 없을 때의 threshold 전류이다. (13)식으로부터  $\Delta(dV/dI)$  값은  $I_{tho}$ 가 작을 수록,  $R_p$  값이 클 수록  $nV_T/I_{tho} = R_{D0}$ 가 되어 커지는 반면  $\Delta(IdV/dI)$  값은 역으로  $R_p$ 가 작을 수록 커짐을 알 수 있으며 (14)식으로부터 커지는 비율은  $I_{th}/I_{tho} = 1 + I_{PL}/I_{tho}$ 로 주어져  $\Delta(IdV/dI)/nV_T$ 가 병렬 누설 저항을 통한 threshold 전류의 증가비를 나타낸다는 실용적으로 중요한 결론에 도달하게 된다. 이는 (13), (14)식에 함축되어있는 바와 같이 직렬 저항을 뺀 다이오드와 그 다이오드에 병렬로 연결된 모든 전기 소자들의 동저항이 레이저 동작과 함께 0으로 되기 때문이며, 따라서 위의 결론은 다이오드성 누설 경로에 대해서도 적용된다. 반면에 고전류 영역에서의 누설경로는  $\Delta(dV/dI)$  및  $\Delta(IdV/dI)$  값 모두를 감소시키게 되는데 그 이유는 이 누설 경

로의 동저항값이 저전류 누설 경로와는 달리 레이저 동작에 관계없이 threshold 전류 부근에서 변화가 거의 없고 threshold 전류에서 급격히 변화하는 레이저 및 저전류 누설경로로 인한 동저항의 영향을 줄이기 때문이다. 이 경우의  $\Delta(dV/dI)$  값은 threshold 에서 고전류 누설경로의 동저항을  $R_{pth}$ 라 하면

$$\Delta \left( \frac{dV}{dI} \right) = \frac{R_{D0}}{|1+(R_s+R_{D0})/R_{pth}|(1+R_s/R_{pth})} \quad (15)$$

가 되어 병렬 누설경로가 없을 때의 값  $R_{D0}$ 보다 작아지게 된다. 보통 레이저 다이오드에서 고전류 누설 전류는 수배  $I_{th}$  이상의 전류에서 중요하므로  $\Delta(dV/dI)$  및  $\Delta(IdV/dI)$  값은 (13), (14)식으로 주어진다. 이상에서 논의된 바와 같이  $\Delta(dV/dI)$ ,  $\Delta(IdV/dI)$  값에도 레이저 다이오드의 누설경로에 대한 중요한 정보들이 숨어 있다. 그림 2와 그림 3에서도 이러한 사실을 발견할 수 있다.

1mA 이하의 낮은 전류 영역에서의 아주 작은 누설 경로를 찾기 위해서는  $dV/dI$ - $\log I$ ,  $IdV/dI$ - $\log I$  관계를 보는 것이 유용하다. 이 영역에서는 (7)식의  $IR_s$  항이 무시할 수 있을 정도로 작아지므로  $IdV/dI = nV_T$ 가 되어  $IdV/dI$  곡선은 이상계수  $n$ , 보다 엄밀하게는  $V$ - $\ln I$  곡선의 기울기를 나타내게 된다. 이때는 주로 레이저 다이오드의 가장자리나 매립형 레이저의 활성층과 매립층 계면을 통한 아주 작은 저항성 누설 전류가 나타나며 이 누설 전류도  $IdV/dI$ - $\log I$  곡선상의 최대값으로부터 (12)식을 이용해 구할 수 있다. 다만 생성-재결합 전류에 의한 최대값인 저 저항성 누설 경로에 의한 최대값인 지를 알아 낼 필요가 있으며, 이를 위해서는  $dV/dI$ - $\log I$  특성을 살펴 보면 된다. 그것은  $dV/dI$  값이 일정하면 저항성 누설 경로에 의한 최대값이기 때문이다. 생성-재결합 전류는  $1.3\mu\text{m}$  In-GaAsP 레이저에서는 0.1-1mA 이하에서 우세하여  $n$  값이 약 2.2 정도이며 이 이상에서는  $n=1.5$  정도가 된다.

L-I 특성상의 비선형성 즉 kink는 레이저 모드의 전이가 원인이 되어 나타나는 것이 보통이며, 이 경우는 모드 천이에 따른 레이저 내부의 광이득 변화가 캐리어 농도, 즉 quasi-Fermi 준위의 변화를 초래하여 접합전압의 변동과  $dV/dI$ ,  $IdV/dI$ 의 변화를 야기시킨다. 따라서 kink의 위치도  $dV/dI$ -I,  $IdV/dI$ -I 곡선에서 알아낼 수 있으며  $I_{th}$  이상의 전류에서 이들 곡선의 갑작스런 변화 가운데 돌출은 주로 kink와 연관되며 갑작스러운 감소는 누설경로의 turn-on과 관련된다.

이 외에도 캐리어의 유한한 확산계수에 의한 spa-

tial hole burning<sup>8</sup>과 유한한 밴드내 완화시간에 의한 spectral hole burning 등에 근거한 비선형 이득계수도  $dV/dI$ ,  $IdV/dI$  값에 영향을 주므로, 이론적으로는 이러한 변수들을 측정할 수 있으나 그 영향이 작아 누설 전류의 영향에 가려져서 실제로는 측정할 수 없는 것이 보통이다. 그러므로 비선형 이득계수  $\epsilon$ 의 영향을 컴퓨터 계산에서는 고려하였지만 (9)~(15)까지의 수식 전개에서는 고려하지 않았다.

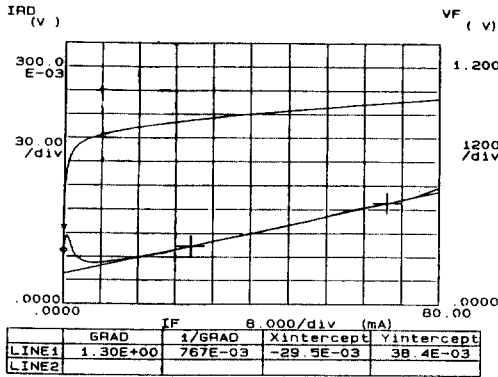
### III. 레이저 다이오드의 비이상적 전류-전압 특성과 전광 변환 특성과의 관계

#### 1. 이중이종구조(Double Heterostructure) 레이저 다이오드의 전류-전압 특성

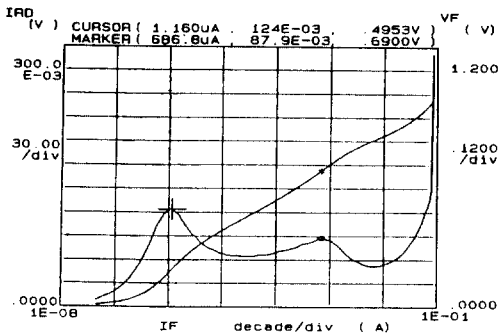
주입 전류를 활성영역으로 모으기 위한 전류차단용의 반도체 층이 없는 이중이종구조 레이저 다이오드에서는 전류를 활성영역으로 모으기 위해  $\text{SiO}_2$  층과 같은 절연막을 쓰는 것이 보통이며 이러한 구조의 레이저 다이오드는 threshold 전류가 매우 높다. 측정에 쓰인 레이저 다이오드는  $50\mu\text{m}$  넓이의 활성영역을 갖는  $1.3\mu\text{m}$  InGaAsP/InP 레이저 다이오드로 threshold 전류는 100mA 이상이다. 여기에서는 레이저 동작이 이루어지기 전의 전류-전압특성에 대해서만 살펴 보기로 한다.

그림 4의 (a), (b)는 이중이종구조 레이저 다이오드의  $IdV/dI$ ,  $V$ -I 특성과  $IdV/dI$ - $\log I$ ,  $V$ - $\log I$  특성을 각각 보여 주고 있다. 그림 4-(a)의 기울기와 절편에서 직렬 저항  $R_s=1.3\Omega$ ,  $nV_T=38.4\text{mV}$  즉  $n=1.48$ 을 얻는다. 그런데 8mA 이하에서는  $IdV/dI$  곡선이 직선성에서 벗어나 약 0.7mA에서 극대값을 가짐을 알 수 있다. 이를 좀 더 자세히 보기 위해 (b)를 보면 극대값이 두 군데에서 나타남을 알 수 있다. 그림으로는 보이지 않았지만  $dV/dI$ - $\log I$  곡선을 그려 보면  $1\mu\text{A}$  이하에서  $dV/dI$ 가 일정하므로  $1\mu\text{A}$  근처에서의 극대값은 저항성 누설 전류에 의한 것임을 알 수 있으며 그 저항의 크기는 (12)식으로부터 약  $0.15\text{M}\Omega$  임을 알 수 있다. 이 누설 전류는 레이저 다이오드 칩의 벽면을 따르는 누설 전류 향으로 칩을 자를 때 조심하면 없어진다. 또  $IdV/dI$  특성이 고전류 영역에서도 비선형성을 보이는 경우가 있는데 이는  $R_s$  값이 일정하지 않기 때문이며 따라서 Ohmic 접촉공정에 문제가 있음을 암시하는 것이다.

다음으로  $V$ - $\log I$  곡선의 기울기 변화가 생기는 전류 0.7mA, 전압 0.69V 근처에도 극대값이 보인다. 이 극대값은 current crowding<sup>11</sup> 때문으로 해석되어 온 것이지만 모든 레이저 다이오드에서 다 나타나지 않



(a)



(b)

그림 4. 1.3 $\mu\text{m}$  InGaAsP/InP 이중이종구조 레이저 다이오드의 (a) V-I, I(dV/dI)-I 특성 및 (b) V-logI, I(dV/dI)-logI 특성, 그림의 IRD가 I(dV/dI)를 표시한다

Fig. 4. (a) V-I, I(dV/dI)-I and (b) V-logI, I(dV/dI)-logI characteristics of a 1.3 $\mu\text{m}$  InGaAsP/InP double heterostructure laser. IRD in this figure denotes I(dV/dI).

는 것으로 보아 이 해석의 정확성이 의문시 된다. 그림 5는 생성-재결합 전류를 제외하고는 이상적인 전류-전압 특성을 갖는 레이저 다이오드 칩에 기계적 충격을 가했을 때 IdV/dI-logI 및 V-logI 특성 변화를 보여준다. 이 결과에 의하면 기계적 충격에 의해 저전류 영역에서 재결합 전류가 증가함으로써 1mA 근처에서 V-logI 곡선상의 변곡점이 더 두드러지면서 IdV/dI-logI 특성상에 새로운 극대값이 생기게 되었다. 따라서 이 극대값의 원인중의 하나는 기계적 충격을 포함한 여러 원인에 의한 결정결함이 야기시킨 생성-재결합전류의 증가임이 명백해졌다. 더 심한 충

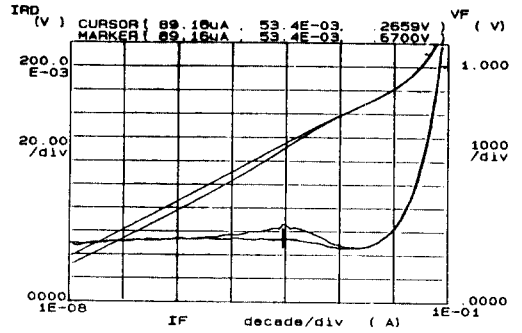


그림 5. 1.3 $\mu\text{m}$  InGaAsP/InP 이중이종구조 레이저 다이오드의 V-logI, I(dV/dI)-logI 특성의 기계적 충격에 따른 변화. V-logI 특성에서는 아래곡선, I(dV/dI)-logI 특성에서는 위의 곡선이 기계적 충격을 받은 후의 특성이다

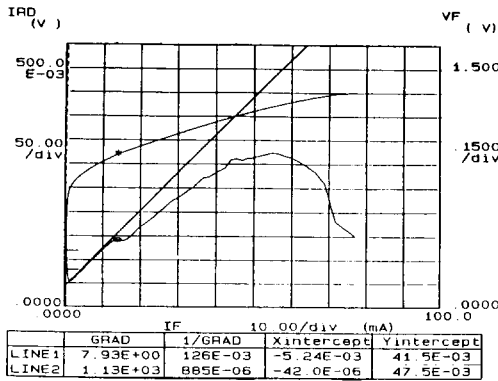
Fig. 5. Effects of mechanical damage on V-logI, and I(dV/dI)-logI characteristics of another 1.3 $\mu\text{m}$  InGaAsP/InP laser diode.

격을 가하면 위의 변화가 더 심하게 나타난다. 따라서 IdV/dI-logI 곡선상의 극값은 없어져야 하며 조심스럽게 다른 레이저 다이오드에서는 위의 현상들은 관찰할 수 없다. 이상에서 언급된 병렬저항과 기계적 충격의 영향은 레이저 다이오드의 특성에 큰 영향을 미치지 못하지만 수명에는 큰 영향을 줄 수 있다.<sup>9)</sup> 그림 4, 그림 5 모두에서 IdV/dI값은 1mA 근처에서 낮아지며 그 이상에서는 직렬 저항의 영향으로 급격히 증가한다. 이 낮아지기 시작하는 점이 생성-재결합전류의 영향이 무시할 수 있는 정도로 작아져서 이상계수가 1.5정도로 되는 부분이며 threshold 전류가 이 값보다 작아질 수 없음을 의미한다.

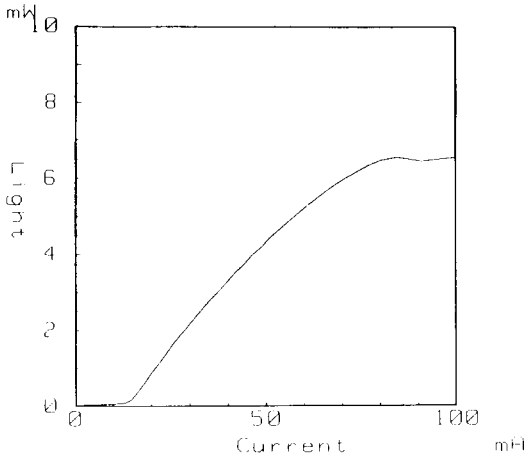
## 2. 매립형 레이저 다이오드의 전류-전압특성과 전광변환특성과의 관계

threshold 전류 낮추기, 효율 높이기 및 단일 모드 동작 등을 위해서는 굴절율의 차이에 의해 레이저 빛이 도파되는 굴절을 도파형의 레이저 다이오드가 필수적이며 이에 따라 매립형 레이저 다이오드는 가장 널리 쓰이는 형태의 레이저 다이오드이다. 두번에 걸친 결정성장 공정을 통해 제작되는 이러한 형태의 레이저 다이오드 특성은 주로 전류가 활성층으로만 흐르도록 하는 전류 차단층의 전기적 특성으로 결정된다. 따라서 이 전류차단층의 성능 평가에도 전류-전압특성 측정이 매우 유용한 역할을 한다.

그림 6은 1.55 $\mu\text{m}$  InGaAsP/InP 매립형 레이저 다



(a)



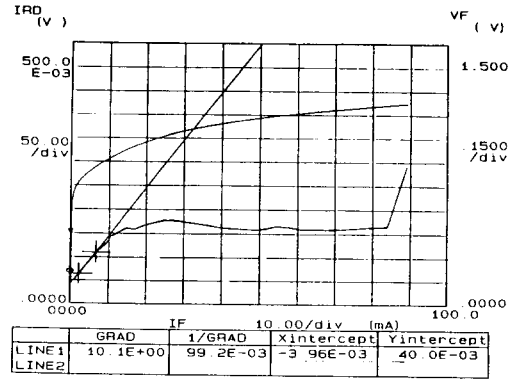
(b)

그림 6. 1.55 $\mu$ m InGaAsP/InP 매립형 레이저 다이오드의 (a) V-I 및 I(dV/dI)-I 특성과 (b) 10% duty, 1KHz 펄스 동작을 시키면서 측정된 L-I 특성사이의 상관관계. (a)에는 다이오드 성 병렬 누설전류에 의한 I(dV/dI)의 극대값이 1mA 근처에 나타나고 50mA 이상에서 I(dV/dI)-I 곡선의 하강이 눈에 띄며 이때문에 (b)에서는 광출력이 포화되게 된다

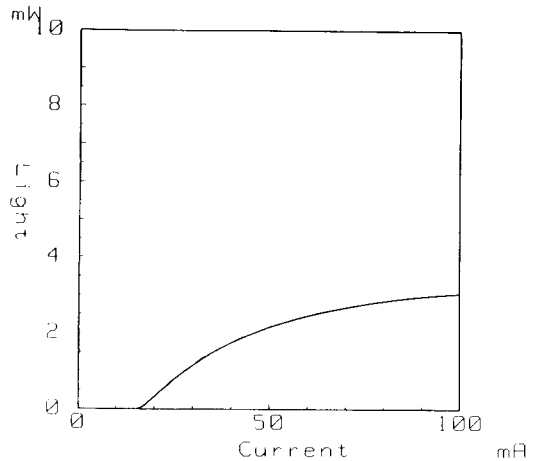
Fig. 6. Correlation between (a) V-I and I(dV/dI)-I characteristics under CW operation and (b) L-I characteristics under 10% duty 1KHz pulsed operation. A low current parallel leakage path and the turn-on of a high current leakage path can be clearly seen.

이오드의 전기적 특성과 광출력-주입전력 특성을 보여 주고 있다. 먼저 눈에 띄는 것은 1mA 근처에서 IdV/dI-I 곡선의 극대값이 나타나는 것으로 절편이 47.5mV, 기울기 1.13K $\Omega$  으로부터 이상계수 1.8, 직렬저항 1.13K $\Omega$  의 다이오드성 병렬 누설경로의 영향임을 알 수 있다. 이 누설경로에 의한 threshold 전류의 증가도 실험적으로 확인되었다.<sup>12)</sup> 또 IdV/dI-I 곡

선의 함몰부가 15mA에서 나타나며 이는 레이저 발전에 의한 캐리어 농도의 고정에 의한 것으로 (b)의 광출력-주입전류 특성에서의 threshold 전류와 일치한다. 또 IdV/dI-I 곡선은 threshold 전류 이하에서는 7.93 $\Omega$ 의 직렬저항으로 인한 기울기를 가지나 threshold 전류직전부터 기울기가 지속적으로 감소함을 알



(a)



(b)

그림 7. 1.55 $\mu$ m InGaAsP/InP 매립형 레이저 다이오드의 (a) V-I 및 I(dV/dI)-I 특성과 (b) L-I 특성. 그림 6과는 달리 저전류병렬 누설경로와 갑작스러운 turn-on 현상은 없다. 반면에 고전류 누설경로의 영향이 threshold 전류 이하에서부터 나타나기 시작한다

Fig. 7. Same figure as fig.6 for another 1.55 $\mu$ m buried heterostructure laser without a low current leakage path and an abrupt turn-on, but the high current leakage path has considerable effects even below the threshold.



수 있으며 특히 60mA부터는 음으로 되는데 이는  $dV/dI$  값의 감소, 즉 고전류 누설경로 turn-on의 영향이며 threshold 전류 이전부터 지속적으로 누설전류가 증가하고 있음을 보여준다. 이는 threshold 전류에서  $\Delta(I dV/dI)$  값이  $nV_T = 47.5mV$ 보다 작은 사실과도 일치하며 이에따라 광출력이 포화되는 현상이 그림 6(b)에 나타나게 된다. 그림 6(b)의 광출력 특성에도 지속적인 기울기의 변화가 보이며 80mA에서는 광출력의 포화현상이 나타나는데  $IdV/dI$  특성에서 음의 기울기를 갖는 전류와 광출력의 포화가 일어나는 전류가 다른 이유는  $IdV/dI$  특성은 연속동작하에서, 광출력은 10% duty, 1KHz 펄스동작에서 측정하였기 때문에 생긴 레이저 다이오드칩 온도의 차이 때문이다.

그림 7은 다른  $1.55\mu m$  InGaAsP/InP 매립형 레이저 다이오드의 전기적, 광학적 특성사이의 상관관계를 보여 주며 저전류 영역에서는 log scale로 보아도 비이상성은 보이지 않지만 그림 6에 비해 고전류 병렬 누설경로의 영향이 더 낮은 전류에서부터 나타나서 16mA에서의 레이저발진에 의한  $I(dV/dI)$  곡선의 함몰이 눈에 띄지 않을 정도로 되며 이 영향으로 레이저 광출력은 거의 증가하지 못하고 3.2mW 정도에서 포화되게 된다.

그림 8은 펄스동작하에서  $1.55\mu m$  매립형 레이저 다이오드의 V-I 및 L-I 특성을 동시에 측정한 것으로 V-I 특성과 L-I 특성의 상관관계를 극명하게 보여주고 있다. threshold 전류 부근에서 V-I 특성의 기울기 변화는 자세히 보면 알 수 있으며 고전류 영역에서 누설경로의 turn-on에 의한 V-I 특성상의 비가역적인

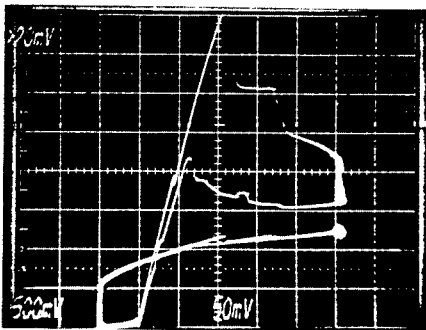


그림 8. 오실로스코프를 이용하여 펄스동작에서 측정한  $1.55\mu m$  매립형 레이저의 V-I 특성과 L-I 특성. 누설경로의 Turn-on에 의한 V-I 및 L-I 특성변화의 상관관계를 보여준다

Fig. 8. A comparative oscillogram of V-I and L-I characteristics of a  $1.55\mu m$  buried heterostructure laser simultaneously measured under pulsed operation.

변화들은 L-I 특성상의 변화와 정확히 일치한다. V-I 특성상의 비교적 작은 상대적인 변화가 L-I 특성에는 매우 큰 변화를 유발함을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

레이저 다이오드의 비이상적인 전기적 특성이 레이저 동작에 미치는 영향이 이론적, 실험적으로 탐구되었다. 레이저 다이오드는 전기적으로 펄핑을 하는 소자이며 발광성 및 비발광성 캐리어의 재결합이 모두 전류로 나타나고 캐리어 농도가 전압으로 나타나므로 전류-전압 특성 및 그 미분특성에는 레이저 다이오드의 동작 및 성능과 관련된 대부분의 정보가 담겨있다. 이 논문에서는 이런 사실에 착안하여 비이상적인 특성을 중심으로 하여 레이저 다이오드의 전기적 특성, 주로 미분특성으로부터 레이저 다이오드의 동작 특성을 유추해 내는 방법을 비율방정식과 회로해석 방법을 이용하여 이론적으로 제시하였으며 실험적으로 확인하였다.

저전류에서의 다이오드성 또는 저항성 누설경로와 그 영향을  $IdV/dI-I$ ,  $dV/dI-I$ , 또는  $IdV/dI-\log I$ ,  $dV/dI-\log I$  특성에서 찾아 내는 방법이 제시되었으며 threshold 전류에서의 변화량  $\Delta(dV/dI)$ ,  $\Delta(IdV/dI)$  으로부터도 누설 전류의 양을 알아 낼 수 있음을 보였다. 그리고  $I(dV/dI)-I$ 에서의 극대값에 해당하는 전류는 이 누설경로에 의한 대략적인 threshold 전류 증가분을 나타냄을 보였다. 또 저전류영역에서의 생성 재결합전류는 기계적 충격으로 증가할 수 있으며 그 영향이  $IdV/dI$  특성에서 극대값으로 나타나고 threshold 전류는 최소한 이 극대값에 해당하는 전류보다는 크게됨을 기술하였다. 저전류 누설경로와는 달리 고전류 누설경로는 L-I 특성에 더 현저하게 나타나지만 I-V 특성과 L-I 특성은 직접적인 상관관계가 있기 때문에 이 누설 전류의 영향도 I-V 특성에서 유추해 낼 수 있음을 보였다. 또 이 고전류 누설 경로는  $\Delta(dV/dI)$ ,  $\Delta(IdV/dI)$  값을 감소시킴도 보였다. 이와 같이 전류-전압 특성 및 그 미분특성의 측정을 통해 간편하고 정확하게 레이저 다이오드의 성능을 평가할 수 있다.

#### 參 考 文 獻

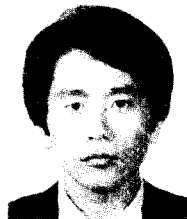
[1] H. C. Casey and M.B. Panish, Heterostructure Lasers, Part B, Academic Press, New York, pp. 224-226, 1978.  
 [2] G.P. Agrawal and N.K. Dutta, Long-wavelength Semiconductor Lasers, Van

- Nostrand Reinhold, New York, pp. 184-187, 1986.
- [3] T.L. Paoli, "Theoretical derivatives of the electrical characteristics of a junction laser operated in the vicinity of threshold," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-14, no. 1, pp. 62-68, Jan. 1978.
- [4] R.J. Nelson et al., "CW electrooptical properties of InGaAsP( $\lambda=1.3\mu\text{m}$ ) buried-heterostructure lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-17, no. 2, pp. 202-207, Jan. 1981.
- [5] 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.
- [6] T.M. Shen, "Effects of TE-TM mode kinks on the performance of semiconductor lasers in lightwave communication systems," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. LT-4, no. 9, pp. 1420-1424, Sep. 1986.
- [7] H. Ishikawa et al., "Lasing-induced change in the differential resistance of stripe geometry  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  DH lasers," *Jap. J. Appl. Phys.*, vol. 18, no. 2, pp. 333-341, Feb. 1979.
- [8] J.E. Dmochowski and L.J. Dobaczewski, "Influence of lateral modes on the first derivative of the I-V characteristic of buried or mesa stripe geometry injection lasers," *J. Appl. Phys.*, vol. 51, no. 9, pp. 4622-4625, Sep. 1980.
- [9] M. Fukuda and G. Iwane, "Correlation between degradation and device characteristic changes in InGaAsP/InP buried heterostructure lasers," *J. Appl. Phys.*, vol. 59, no. 4, pp. 1031-1037, Feb. 1986.
- [10] P.J. Anthony, "Fabrication and characterization of semiconductor lasers," ch. 9 of *Optoelectronic Technology and Lightwave Communication Systems* (C. Lin ed.), Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 235-238, 1989.
- [11] R.H. Saul et al., "Light-emitting-diode device design," ch. 5 of *Semiconductors and Semimetals*, vol. 22 (W.T. Tsang ed.), Part C, Academic Press, Orlando, p. 211, 1985.
- [12] 이용탁 외, 광통신기술개발사업 중 광자공학기술 개발 연구, 한국전자통신연구소 간행연구 보고서, p. 44, 1988년 12월

#### 감사의 글

이 논문의 컴퓨터 계산 및 정리에 도움을 준 아주대학교의 도만희씨, 연구에 많은 도움을 준 전자통신연구소의 박문호, 이종기씨, 현대전자의 류희관씨에게 깊은 감사를 드립니다.

#### 著 者 紹 介



金 相 培 (正會員)

1959年 2月 15日生. 1981年 2月  
아주대학교 전자공학과 졸업. 1983  
年 2月 한국과학기술원 전기및 전  
자공학과 석사. 1987年 8月 한국  
과학기술원 전기및 전자공학과 박사. 1987年 9月~1990年 8月 한국  
전자통신연구소 광전자연구실 선임연구원. 1990年 9  
月~현재 아주대학교 전자공학과 조교수. 주관심분야  
는 광전소자, 광전집적회로, 광통신 등임.