

論文94-31A-5-15

레이저 다이오드의 내부손실 및 내부 양자효율 측정법에 대한 재고찰

(A Reexamination of the Method of Measuring Internal Loss and Quantum Efficiency in Laser Diodes)

韓英洙*, 都萬熙**, 金相培***, 鄭相九***

(Young Su Han, Man Hee Do, Sang Bae Kim and Sang Koo Chung)

要約

외부 양자효율의 공진기 길이 의존성을 이용한 레이저 다이오드의 일반적인 내부손실 및 내부 양자효율 측정 방법에 대해 재고찰하였다. 통례적으로 내부 양자효율로 해석되어 온 η_i 는 내부 미분양자효율 η_{id} 로 바뀌어야 하며 종래의 방법에서 묵시적으로 이루어졌던 η_{id} 가 일정하다는 가정은 공진기 길이가 짧은 소자에서는 타당하지 않음을 보였다. 따라서 내부손실의 정확한 측정을 위해서는 공진기 길이가 긴 소자의 데이터를 이용해야 한다. 또 활성층 두께에 따라 내부손실과 거울면손실이 달라지므로 손실측정에 쓰이는 레이저 다이오드의 활성층 두께는 일정해야 한다.

Abstract

We examine the conventional method of measuring the internal optical loss using the dependence of the reciprocal external quantum efficiency on the cavity length in laser diodes. It is shown that the implicit assumption of constant internal differential quantum efficiency η_{id} , which has been customarily misinterpreted as internal quantum efficiency η_i , is not valid for devices with short cavity length. Therefore, for reliable measurements long cavity data should be used.

1. 서론

통례적으로 레이저 다이오드의 내부손실(internal loss)과 내부 양자효율(internal quantum effi-

ciency)은 외부 미분양자효율(external differential quantum efficiency) η_{ext} 의 공진기 길이(cavity length) L 에 대한 의존성으로부터 측정해 왔다. 측정에 사용되어 온 외부 미분양자효율 η_{ext} 의 공진기 길이 의존성은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{\eta_{ext}} &= \frac{1}{\eta_i} \frac{\ln \frac{1}{R} + \alpha_i L}{\ln \frac{1}{R}} \\ &= \frac{1}{\eta_i} \frac{\alpha_m + \alpha_i}{\alpha_m} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, η_i 는 내부 양자효율, R 은 거울면 반사계수 (facet reflectivity), α_i 는 내부손실이며 α_m 은 거울

* 準會員, 亞洲大學校 電子工學科

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

** 準會員, 韓國電氣通信公社 研究開發團

*** 正會員, 亞洲大學校 電子工學科

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

※ 이 논문은 1992년 통신학술 연구과제로서 채신부,

한국통신의 후원으로 이루어졌음.

接受日字 : 1993年 5月 26日

면 손실(mirror loss)이다. α_i 와 η_i 는 (1)식의 $1/\eta_{ext}-L$ 직선의 기울기와 연장선의 $L = 0$ 에서의 교점으로부터 계산된다. 그러나 이 방법으로 구한 η_i 값은 1에 가까우며, 이 값은 InGaAsP 레이저의 전형적인 η_i 값인 0.3^[1] 과는 매우 큰 차이를 보인다. 더우기 (1)식의 예측과는 달리 실험적으로 구한 $1/\eta_{ext}-L$ 관계는 비선형성을 보이며^[2] 이러한 경향은 공진기 길이가 짧을 때 더욱 뚜렷하다. 이렇듯 비선형적인 데이터를 무리하게 선형관계에 맞추게 되면 η_i 및 α_i 값에 큰 오차가 발생하게 된다. 이와 같은 모순점을 해결하는 것이 이 연구의 목표이다. 먼저 II장에서는 (1)식의 내부 양자효율 η_i 는 새롭게 정의된 내부 미분양자효율(internal differential quantum efficiency) η_{id} 로 바뀌어야 함을 보였다. 또 η_i 와 η_{id} 가 모두 일정한 값이 아닌 공진기 길이에 따라 변하는 값으로 그 변화율은 공진기 길이가 짧을 때 크게 나타남을 계산결과를 통해 보였으며, 내부손실과 거울면 손실이 활성층 두께에 의존하므로 손실측정에서는 활성층 두께를 일정하게 해야함을 언급하였다. 마지막으로 III장에서는 II장의 결과를 토대로 결론을 맺었다.

II. 이론적 배경 및 계산결과

먼저 외부 미분양자효율 η_{ext} 을 다시 유도해 보기로 한다. 한쪽 거울면으로부터의 광출력(optical output power) P_{out} 은 다음과 같다.

$$P_{out} = \frac{hv}{2q} \frac{\alpha_m}{\alpha_m + \alpha_i} (I_r - I_{th,r}) \tag{2}$$

$$= \frac{hv}{2q} \frac{\alpha_m}{\alpha_m + \alpha_i} (\eta_i(I) \cdot I - \eta_i(I_{th}) \cdot I_{th})$$

여기서 h 는 플랑크(Planck) 상수, ν 는 광 주파수(optical frequency), q 는 전자의 전하량, I_r 은 전체 전류 I 의 발광성 전류성분(radiative current)이며, $I_{th,r}$ 은 발진임계전류(threshold current) I_{th} 의 발광성 전류성분이다. 따라서 총 재결합율중에서 발광성 재결합율의 비를 나타내는 내부 양자효율 η_i 는 전류 I 의 함수로 다음과 같이 주어진다.

$$\eta_i(I) \equiv \frac{I_r}{I} \tag{3}$$

그리고, 외부 미분양자효율 η_{ext} 은 다음과 같이 정의되며

$$\eta_{ext}(I) \equiv \frac{2q}{hv} \cdot \frac{dP_{out}}{dI} \tag{4}$$

(2)식과 (4)식을 써서 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_{ext} = \frac{dI_r}{dI} \cdot \frac{\alpha_m}{\alpha_m + \alpha_i} \tag{5}$$

$$= \eta_{id} \cdot \frac{\alpha_m}{\alpha_m + \alpha_i}$$

여기서 새로운 변수인 내부 미분양자효율(internal differential quantum efficiency) η_{id} 는 다음과 같이 정의한다.

$$\eta_{id} \equiv \frac{dI_r}{dI} \tag{6}$$

따라서 η_{id} 는 (3)식과 같이 정의된 η_i 와는 일반적으로 다르며 Asada 등에^[3] 의해 지적된 바와 같이 η_i 와 구별되어야 한다. 레이저 다이오드의 비발광성 전류와 누설전류는 보통 발진임계전류 부근에서 캐리어 농도(carrier concentration)와 접합전압(junction voltage)이 고정됨에 따라 포화되는 경향이 있다. 이러한 이유 때문에 앞에서 지적한 바와 같이 내부 양자효율 η_i 의 전형적인 값이 0.3으로 매우 낮음에도 불구하고 (6)식과 같이 정의된 내부 미분양자효율 η_{id} 는 1에 매우 가까워진다.

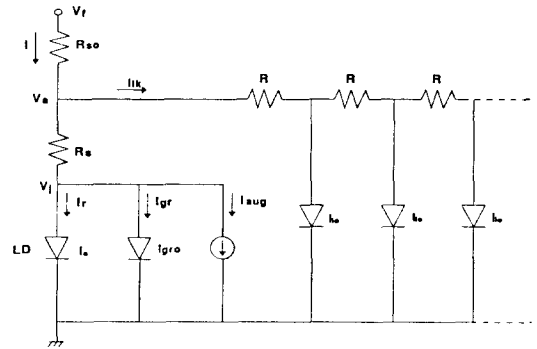


그림 1. 누설전류 해석을 위한 1.3μm InGaAsP/InP RWG 레이저 다이오드의 등가회로 모델

Fig. 1. Equivalent circuit model of a 1.3μm InGaAsP/InP ridge waveguide laser for leakage current analysis.

양자효율의 공진기 길이 의존성을 이해하기 위해서는 먼저 누설전류분석이 이루어져야 한다. 그림 1은 활성층(active later)과 p형 InP clad층 사이에 InGaAsP($\lambda_c=1.1 \mu m$) etching stop층이 있는 1.3 m InGaAsP/InP ridge waveguide 레이저 다이오드의 등가회로 모델로 etching stop층과 pn 접합의 횡방향 누설경로는 저항-다이오드 사다리 회로로 모

델링했다. 또 발광성 재결합전류 I_r 와 광출력 P_{out} 은 비율방정식(rate equation)의 정상상태 해로부터 계산했다. 이상적인 레이저 다이오드의 접합전압 V_j 는 캐리어 농도로부터 구했으며 이때 Fermi-Dirac적분은 Nilsson의 근사식을¹⁴ 이용했고 생성-재결합 전류(generation - recombination current)는 이상 계수가 3인 병렬 다이오드로 모델링했다. 그리고 Auger재결합은 캐리어 농도의 세제곱에 비례하는 병렬 전류원으로 모델링했으며 이때 비례계수가 Auger 재결합계수이다. 등가회로 및 등가회로 변수값에 대한 자세한 사항은 참고문헌 [5] 에 기술되어 있다.

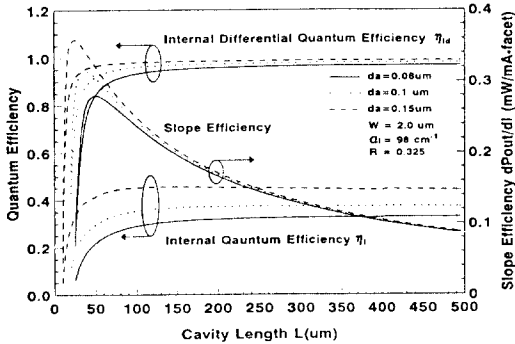


그림 2. 활성층 두께가 0.08, 0.1, 0.15 μ m일 때 계산된 내부 양자효율 η_i , slope efficiency dP_{out}/dl 와 새롭게 정의된 내부 미분양자효율 η_{id} 의 공진기 길이에 따른 변화

Fig. 2. Calculated cavity length dependence of the newly defined internal differential quantum efficiency η_{id} the internal quantum efficiency η_i and the slope efficiency dP_{out}/dl for three different values for the active layer thickness da.

그림 2는 전형적인 활성층 두께인 0.08, 0.1, 0.15 μ m에서 내부 미분양자효율 η_{id} , 내부 양자효율 η_i , slope efficiency dP_{out}/dl 의 공진기 길이에 따른 변화로 발진임계전류보다 약간 높은 전류에서 전형적인 변수들을 사용하여 계산하였다. 활성층 두께에 대한 거울면 손실과 내부손실의 변화는 단지 비교를 쉽게 하기 위해 고려하지 않았다. 그림에서 (1)식으로부터 얻은 내부 양자효율 η_i 는 이미 지적인 바와 같이 1 보다 매우 작은 0.3¹⁴ 정도인데 반하여 내부 미분양자효율 η_{id} 는 공진기 길이가 매우 짧은 경우를 제외 하고는 1에 거의 가까운 값을 가짐을 알 수 있다.

그림 2에서 내부 미분양자효율 η_{id} 는 공진기 길이가

200 μ m보다 작을 때에는 공진기 길이가 긴 경우의 값과 크게 다르며 활성층 두께가 얇을 수록 그 차이가 더욱 큰 것을 볼 수 있다. 이것은 공진기 길이가 짧아지면서 접합전압의 증가로 인해 횡방향누설전류가 증가하기 때문이다. 공진기 길이가 짧아질 수록 거울면 손실이 증가하고 활성층 두께가 얇아질 수록 광집속계수(optical confinement factor)가 감소하기 때문에 레이저 다이오드가 발진하기 위해서는 더욱 큰 이득이 필요하며 이에 따라 캐리어 농도와 접합전압이 증가하게 된다. 이와 같은 누설전류의 증가와 내부 미분양자효율 감소의 영향은 공진기 길이에 따른 slope efficiency의 변화로도 확인할 수 있으며 공진기 길이가 200 μ m보다 작은 경우 slope efficiency는 η_{id} 가 1인 이상적인 경우의 곡선에서 더욱 크게 벗어남을 알 수 있다. 이 차이는 $1/\eta_{ext}$ -L 관계를 이용해 내부 미분양자효율 η_{id} 와 내부손실 α 를 측정할 때 큰 오차를 유발할 수 있으며 누설경로가 큰 레이저 다이오드, 또는 활성층 두께가 얇고 공진기 길이가 짧은 레이저에서 더욱 심하므로 이런 레이저에서 η_{id} 가 공진기 길이에 관계없이 일정하다는 가정은 타당하지 않다. 또 공진기 길이가 짧은 레이저 다이오드는 공진기 길이 변화에 따른 발진파장의 변화가 매우 크기 때문에 측정에 사용되는 광검출기의 응답특성이 파장 의존성을 갖게 되면 또 다른 측정오차를 발생시킬 수 있다.

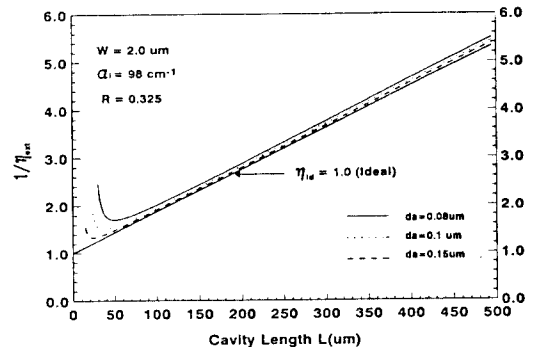


그림 3. 활성층 두께 0.08, 0.1, 0.15 μ m에서 계산된 $1/\eta_{ext}$ 의 공진기 길이에 따른 변화로 $\eta_{id} = 1$ 인 이상적인 관계와 함께 나타냈다

Fig. 3. Reciprocal external differential quantum efficiency $1/\eta_{ext}$ vs. cavity length L curves calculated for three different values of the active layer thickness. Also plotted is the ideal curve of unity η_{id} .

그림 3은 0.08, 0.1, 0.15 μm 의 3가지 활성층 두께에 대한 $1/\eta_{\text{ext}}-L$ 곡선으로 비교를 위해 내부 미분양자효율 η_{int} 가 1인 이상적인 경우의 관계를 함께 나타냈다. 예상한 것과 같이, 활성층 두께가 얇아지고 공진기 길이가 감소할 수록 이상적인 경우의 관계와 큰 차이가 남을 볼 수 있다. 이 결과는 레이저 다이오드의 내부손실 측정에는 공진기 길이가 큰 경우의 데이터를 이용해야 함을 명확히 보여주며 외삽법으로 구한 $L = 0$ 에서의 절편값도 내부 양자효율의 역수 $1/\eta_{\text{int}}$ 이 아닌 공진기 길이가 긴 경우의 내부 미분양자효율의 역수 $1/\eta_{\text{ext}}$ 로 해석되어야 함을 보여주고 있다. 또 공진기 길이가 증가함에 따라 내부 미분양자효율 η_{int} 가 작은 비율로 계속 증가하기 때문에 일반적인 η_{int} 측정방법은 η_{int} 를 약간 작게 평가하는 경향이 있다.

다음으로 고려해야 할 것은 활성층 두께에 따른 내부손실과 거울면 손실의 변화의 영향으로, 내부손실은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha_i = \Gamma_a \alpha_a + \Gamma_{cl,p} \alpha_{cl,p} + \Gamma_{cl,n} \alpha_{cl,n} \quad (7)$$

여기서 Γ_a , $\Gamma_{cl,n}$ 은 각각 활성층, n-type InP buffer층의 광집속계수, $\Gamma_{cl,p}$ 는 etching stop층과 p-type InP clad층의 광집속계수이며 α_a 는 활성층 손실, $\alpha_{cl,n}$ 은 etching stop층과 p-type InP clad층의 손실, $\Gamma_{cl,n}$ 은 n-type InP buffer층의 손실로 $\alpha_a = 76 \text{ cm}^{-1}$ ¹⁷, $\alpha_{cl,p} = 13 \text{ cm}^{-1}$ ¹⁸, $\alpha_{cl,n} = 1.5 \text{ cm}^{-1}$ ¹⁹를 이용하였고 활성층 두께에 따른 거울면 손실의 변화는 고려하지 않았다. (7)식과 각 층에서의 흡수계수값으로부터 내부손실은 두께의 함수임을 알 수 있다. 그림 4는 활성층 두께에 따른 내부손실의 변화를 포함하여 활성층 두께가 $da=0.1\mu\text{m}$ 를 중심으로 $\pm 10\%$ 의 변동이 있을 때 공진기 길이에 따른 $1/\eta_{\text{ext}}$ 의 변화를 나타냈다. 그림에서 공진기 길이가 60 μm 보다 작은 범위에서는 광집속계수차이로 인한 누설전류증가율의 차이로 활성층 두께가 두꺼울 수록 $1/\eta_{\text{ext}}$ 이 감소하지만 공진기 길이가 60 μm 이상일 때에는 공진기 길이가 증가할 수록 내부손실의 영향이 증가하기 때문에 $1/\eta_{\text{ext}}$ 이 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림 4에서처럼 활성층 두께의 작은 변화에도 $1/\eta_{\text{ext}}$ 이 크게 변화하기 때문에, 활성층 두께에 통상 $\pm 10\%$ 변동이 있는 액상 에피층성장을 통해 제작된 레이저 다이오드의 경우에는 데이터의 분산이 심하게 나타나게 된다. 따라서 정확한 데이터를 얻기 위해서는 가능한 한 공진기 길이만 다른 같은 구조의 레이저 다이오드를 이용해 측정해야 한다.

이상의 논의는 ridge waveguide 레이저 다이오드

에 대한 계산결과를 토대로 한 것이지만, 누설전류의 공진기 길이 의존성은 정도의 차이는 있지만 공통적인 현상이므로 모든 형태의 레이저 다이오드에 적용 가능하다.

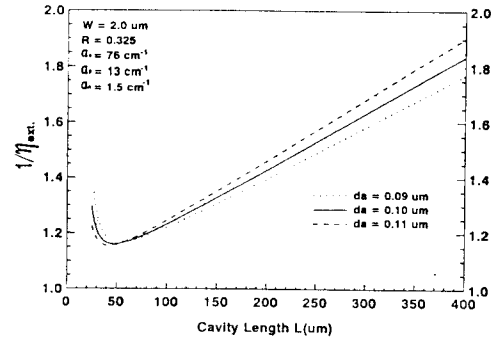


그림 4. 활성층 두께가 $d_a = 0.1\mu\text{m}$ 를 중심으로 $\pm 10\%$ 범위에서 변동할 때 $1/\eta_{\text{ext}}$ 의 공진기 길이에 따른 변화.

Fig. 4. Reciprocal external differential quantum efficiency $1/\eta_{\text{ext}}$ vs. cavity length L curves calculated when the active layer thickness varies within 10% from $d_a = 0.1\mu\text{m}$.

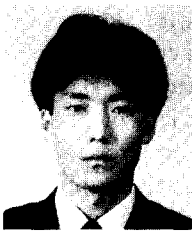
III. 결론

외부 양자효율의 공진기 길이 의존성 $1/\eta_{\text{ext}}-L$ 관계를 이용한 레이저 다이오드의 일반적인 내부손실 측정방법의 몇 가지 오류를 지적하였다. $1/\eta_{\text{ext}}-L$ 관계의 연장선의 $L = 0$ 에서의 교점은 내부손실의 역수 $1/\eta_{\text{int}}$ 가 아닌 새롭게 정의된 내부 미분양자효율의 역수 $1/\eta_{\text{ext}}$ 로 해석되어야 한다. 또 공진기 길이가 감소함에 따라 η_{int} 와 η_{ext} 가 모두 급격히 감소하며 이러한 경향은 활성층 두께가 얇은 소자에서 더욱 심하다. 따라서 Quantum-well 레이저 다이오드 등과 같이 활성층 두께가 매우 얇은 소자에서 내부손실과 양자효율을 정확히 측정하기 위해서는 공진기 길이가 긴 레이저의 데이터를 사용해야 한다. 또 종래의 측정방법은 내부 미분양자효율 η_{int} 를 약간 작게 평가하는 경향이 있다. 마지막으로, 내부손실 α 와 거울면 손실 α_m 이 활성층 두께에 따라 변하여 실험데이터가 흩어지게 되므로 정확한 측정을 위해서는 활성층 두께를 비롯한 레이저 다이오드의 구조를 일정하게 해야함을 보였다.

參 考 文 獻

- [1] Olshansky, R., Lacourse, J., Chow, T., and Powazinik, W., "Measurement of radiative, Auger, and nonradiative current in 1.3 μ m InGaAsP buried heterostructure lasers," *Appl. Phys. Lett.*, vol 50, no. 6, pp.310-312, Feb. 1987.
- [2] Zah, C. E., et.al., "Low-threshold 1.5 μ m compressive-strained multiple and single quantum well lasers," *IEEE. J. of Quantum Electron.*, vol.27, no.6, pp. 1440-1450, June 1991.
- [3] Asada, M. and Suematsu, Y., "The effects of loss and nonradiative recombination on the temperature dependece of threshold current in 1.5 1.6 μ m InGaAsP/InP lasers," *IEEE J. of Quantum Electron.*, vol. 19, no.6, pp.917-923, June 1983.
- [4] Blakemore, J. S., "Approximation for Fermi-Dirac integral, especially the fucntion $F_{1/2}(\eta)$ used to describe electron density in a semiconductor," *Solid State Electron.*, vol.25, no.11, pp. 1067-1076, 1982.
- [5] 도 만희 외, " 횡방향 p-n접합으로 누설전류를 줄인 1.3 m InGaAsP/InP Ridge waveguide 레이저 다이오드의 설계," 대한전자공학 회지, 제29권 A편 제 12호, pp. 1171-1181, 1992년 12월.
- [6] S. Kakimoto, et. al., "Threshold Current of 1.2 1.55 μ m p-substrate Buried Crescent Laser Diodes," *IEEE. J. of Quantum Electron.*, vol.28, no.7, pp. 1631-1635, July 1992.
- [7] S. Kakimoto, et. al., "Wavelength Dependence of Characteristics of 1.2 1.55 μ m InGaAsP/InP p-substrate Buried Crescent Laser Diodes," *IEEE. J. of Quantum Electron.*, vol.24, no.1, January 1988.
- [8] H. C. Casey, Jr. and P. L. Carter, "Variation of intervalence band absorption with hole concentration in the p-type InP," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 44, no. 1, pp.82-83, January. 1984.
- [9] V. Swaminathan and A. T. Macrander, "Materials Aspects of GaAs and InP Based Structures," Prentice Hall, pp. 279, 1991.

著 者 紹 介



韓 英 洙(正會員)
 1969年 11月 11日生. 1992年 2月
 아주대학교 전자공학과 졸업.
 1994年 2月 아주대학교 전자공학
 과 석사. 현재 (주)국제상사 전자
 사업본부 재직중. 주관심 분야는
 광전소자, 화합물 반도체 등임.

都 蔓 熙(正會員) 第 29卷 第 12號 參照
 현재 한국통신 연구개발단 재직중.

鄭 相 九(正會員) 第 29卷 第 12號 參照
 현재 아주대학교 전자공학과 교수

金 相 培(正會員) 第 29卷 第 12號 參照
 현재 아주대학교 전자공학과 조교수