

반도체 레이저의 열적 특성 평가

Thermal property evaluation
of semiconductor laser

박경현*, 김무환, 이용택

* 한국전자통신연구소 광전자연구실

** 포항공과대학 기계공학과

<ABSTRACT>

Temperature distribution of laser diode chip mounted on ideal heat sink was calculated by numerical analysis. In numerical analysis, infinite difference method and Gauss-Seidel iteration was adopted on the basis of two dimensional heat conduction phenomena. As a result, temperature increase of active medium of laser diode driven at 60mA was calculated to be 1.47°C.

1. 서론

광통신의 광원으로 주로 사용되는 장파장대의 InGaAsP/InP 반도체 레이저의 동작특성은 온도에 매우 민감하게 영향을 받는다. 즉, 활성영역의 온도가 증가함에 따라 발진임계전류값이 증가하고, 외부양자효율이 감소하며, 발진파장이 장파장 쪽으로 이동하여 결과적으로 반도체 레이저의 안정된 동작을 힘들게 할 뿐만 아니라 신뢰도에도 영향을 주어 수명을 단축시킨다. [1, 2]

본 논문에서는 반도체 레이저의 열적 특성 평가를 위한 초기 단계로서 반도체 레이저 내부의 온도 분포를 계산하고 이를 실험적으로 입증하고자 한다. 먼저 2장에서는 이차원적인 전도 열전달 현상으로 반도체 레이저 내부의 온도 분포를 해석하고, 이를 유한차분법(finite difference method) 및 Gauss-Seidel iteration 방법을 이용한 수치해석으로 반도체 레이저 내부의 온도 분포를 계산한 결과를 기술하고 3장에서는 반도체 레이저의 발진파장 이동을 측정하여 활성층의 온도를 추적하는 방법에 대해 기술하고자 한다.

2. 반도체 레이저 내부의 온도 분포 계산

반도체 레이저 내부의 온도 분포를 계산하기 위해서는 그림 1, 표 1과 같이 주어지는 다층 구조(multilayer structure)에서의 전도 방정식을 풀어야 한다. 이러한 해를 구하기 위해서 다음과 같은 가정을 하면, 2차원 정상 상태의 전도 방정식의 해를 구하는 문제로 귀결된다.

- 1) 열의 발생은 활성층에서만 전영역에 걸쳐서 일정하게 발생한다.
- 2) 각 층에서의 열전도도는 일정하다.
- 3) 반도체 레이저의 측면과 윗면에서의 열전달은 무시한다.
- 4) heat sink는 이상적인 것으로 가정하여 일정한 온도로 유지된다.
- 5) Z축으로는 온도 구배가 없는 것으로 간주한다.

즉, 기본적인 방정식은

$$K\nabla^2 T = -Q_v \quad (1)$$

로써 K는 열전도도, T는 온도, 그리고 Q는 열발생량을 표시한다. 이러한 방정식의 해는 변수 분리법 및 위의 가정을 이용하면 i층 내의 점 (x, y)의 온도 $T_i(x, y)$ 는 다음과 같이 주어진다. [3]

$$\begin{aligned} T_i(x, y) = & \alpha_{i,0} + \beta_{i,0}(y-y_{i,1}) \\ & + \sum [\alpha_{i,n} \cosh[k_n(y-y_i)] \\ & + \beta_{i,n} \sinh[k_n(y-y_i)]] \cos(k_n x) \quad (2) \\ K_n = & 2n\pi/B \end{aligned}$$

여기서 α 및 β 값은 경계면에서 온도 및 열전달량의 연속 조건을 사용하여 구하였다. 식 (2)를 계산하는데 있어서 수치 해

석적 방법을 도입함으로써 각 층의 두께나 물질치의 변화 혹은 전체적인 dimension의 변화 등을 쉽게 적용할 수 있을 뿐만 아니라 3차원적인 계산으로 확장시킬 수 있는 장점이 있다.

수치적 방법으로 유한 차분법을 사용하였고 X축 방향으로의 격자점(node)은 입력 자료로 조정이 용이하도록 구성하였으며, Y축 방향으로의 격자점은 각 층의 경계면과 중간점에 위치하도록 고정하였다. Iteration 방법은 Gauss-Seidel 방법을 취하였고 각 점에서 새로이 계산된 온도와 이전에 계산된 온도의 차이의 절대값을 새로이 계산된 온도로 나눈 값이 요구되는 한계값(여기서는 0.00001) 이하가 될때 정상 상태의 계산이 끝나는 것으로 간주하였다.

3. 실험 결과

반도체 레이저의 활성층의 온도 추적을 위한 방법으로는 전류-전압 특성을 이용하는 전기적인 방법과^[4] 발진 파장의 이동을 추적하는 광학적인 방법이 있다. 여기서는 반도체 레이저에 열로 환원되는 dissipation power 공급을 증가시키면서 발진 파장의 이동을 추적하여 활성층의 온도상승을 측정하는 방법에 대해 기술하고자 한다.

Fcby-Perot 형 반도체 레이저에 있어서 온도에 따른 발진 파장 변화식은 다음과 같이 주어진다.^[5]

$$d\lambda/dT = (2\eta_{eq}/m)dL/dT + 2L/m((\partial\eta_{eq}/\partial T) + (\partial\eta_{eq}/\partial\lambda)d\lambda/dT) \quad (3)$$

여기서 전과상수 $\beta = 2\pi\eta_{eq}/\lambda$ 로 주어지며 $2\beta L = 2m\pi$ 를 만족한다. 식 (3)에서 첫째 항은 온도에 따른 레이저 공진기 길이의 팽창을 나타내는 것으로 그 값이 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ 이므로 무시할 수 있다. 따라서 (3) 식은 온도에 따른 동가 굴절률 변화 항과 최대 이득을 갖는 bandgap energy 변화 항으로 구성된다.

(3) 식에 의해서 주어지는 온도에 따른 발진파장의 이동은 반도체 레이저의 구조 및 특히 재료에 의해서 결정되는데 InP계 반도체 레이저는 전형적으로 $5 \sim 6 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 값을 갖는다. 본 실험에 사용된 $1.3\mu\text{m}$ 장파장 InGaAsP/InP Ridge Waveguide 레이저의 경우 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 하였다.

실험은 반도체 레이저에 주파수 1kHz, 진폭 60mA의 pulse 전류를 공급하면서 pulse duty를 2.5%, 10%, 25%, 50% 및 100%(cw)로 증가시킴으로써 반도체 레이저에 공급되는 전력을 증가시켰다. 때 반도체 레이저 내에서 열로 손실되는 전력은

$$P_{dissipation} = VI - P_{laser} \quad (4)$$

로 주어진다. 여기서 V는 반도체 레이저 전체의 전압 강하로서 1.3V이고 P_{laser} 는 레이저 광출력이다. 광출력 측정 결과 반도체 레이저내에서 열로 손실되는 전력은 duty 2.5%일 때 6.4 mW, 10%일 때 16mW, 45%일 때 32mW, 100%일 때 66.1 mW로 나타났다. 발진파장의 이동은 분해능이 0.5Å인 분광기를 사용하여 구동 pulse의 duty가 2.5%인 경우를 기준으로 duty를 증가함에 따른 동일 발진 모드의 파장 이동을 추적함으로써 구했다. Pulse duty 2.5%에서는 열 발생에 따른 활성층에서의 온도 상승이 없고, 그림 1에서의 반도체 레이저 아래의 heat sink는 이상적인 것으로 가정할 경우에 대한 실험 결과와 온도 분포 계산 결과를 그림 2에 보였다. 그림으로부터 실험치는 낮은 duty의 pulse 동작의 경우는 계산치와 잘 일치하고 있으나 열 발생이 큰(duty 50% 이상인) 경우는 계산치보다 높은 값을 보이고 있다. 이것은 위의 가정중 heat sink가 이상적이지 못하여 열 저항 및 열 누적이 있으며 heat sink와 반도체 레이저 사이의 soldering도 현실적으로는 void 등에 의한 큰 열 저항이 존재한다는 것을 계산에 고려하지 않았기 때문인 것으로 생각된다.

4. 결론

이차원적인 전도 열전달 현상으로 반도체 레이저 내부의 온도 분포를 해석하고 이를 해석적 방법으로 계산하였다. 계산 결과 60mA로 구동시킨 레이저의 활성층의 온도 상승은 $1.47 \text{ }^\circ\text{C}$ 였으며 pulse duty를 바꾸면서 계산한 결과 활성층 온도 상승은 dissipation power에 비례하였다.

발진 파장 이동을 추적하여 활성층 온도 상승을 구하는 실험 결과, 실험치는 낮은 dissipation power 영역에서는 계산치와 잘 맞고 있으나 발열량이 큰 영역에서는 높게 측정되었다. 이는 computer 계산시 heat sink를 이상적이고 반도체 레이저와 heat sink 사이가 완전한 bonding으로 이루어져 있다는 가정을 하였기 때문인 것으로 생각된다.

References

1. T. P. Pearsall, *GaInAsP Alloy Semiconductor*, John Wiley & Sons, Chichester, 1982
2. Mitsuhiro Yano et al., "High Temperature Characteristics of Stripe Geometry InGaAsP/InP Double Heterostructure

Lasers", *IEEE J. Quant. Electron.*, **QE-17**, 619(1981)

3. G. Y. Lee, *Effect of Nonuniformity in Temperature Distribution on the Performance of a Stripe Geometry Double Heterostructure Laser*, Ph.D. Thesis, Iowa State University, (1982)

4. T. Szirany, "Thermal Impedance Measurement of Laser Diode Chips Using Electrical Method Only", *Int. J. Electronics*, **63**, 153(1987)

5. 末松安晴, "半導体 레이저 빛集積回路", 오ム社, 昭和 59年

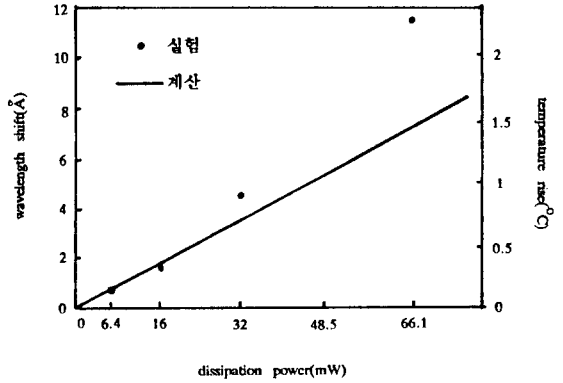


그림 2. 열발생량에 따른 발진 파장 이동

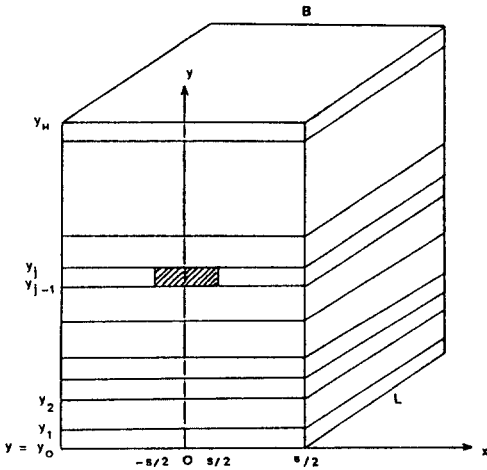


그림 1. 계산에 사용된 반도체 레이저의 다층 구조

표 1. 계산에 사용된 반도체 레이저의 다층 구조 두께 및 전도도

Layer No	Description	Typical Thickness (um)	Thermal Conductivity (W/cm ² K)
1	Bonding	10.0	0.87
2	Solder contact	0.1	3.18
3	p-contact	0.1	0.80
4	p-contact	0.1	0.22
5	Capping	2.0	0.45
6	P-inactive	1.0	0.14
7	Active	0.12	0.45
8	N-inactive	2.0	0.14
9	substrate	100.0	0.45
10	n-contact	0.2	1.50