

레이저 다이오드의 코팅된 단면의 반사율 측정에 사용되는 문턱전류비에 관한 연구

이 상무*, 김 부근
 숭실대학교 전자공학과*

A study on the threshold current ratio method using the measurement of coated facet reflectivity of a laser diode

Sangmoo Lee*, Boo-Gyoun Kim
 Soong Sil University

We propose the improved threshold current ratio method to determine the reflectivity of coated facets. The carrier recombination time used in the improved threshold current ratio method depends on the value of facet reflectivities. However, the carrier recombination time used in the conventional threshold current ratio method is constant regardless of facet reflectivities. The difference between the results of the two methods increases as the reflectivity of a coated facet decreases.

I. 서론

반도체 레이저 다이오드는 광통신, 광정보처리 및 광 계산 등 광을 이용한 응용 연구에 가장 많이 사용되는 능동소자이다. 또한 레이저 다이오드 단면에 코팅을 해줌으로써 단면 반사율을 변화시키면 반도체 광증폭기 등과 같은 여러가지 소자를 개발할 수 있으며, 그 응용 범위가 크게 확장되게 된다.

따라서 레이저 다이오드의 단면 반사율 측정 및 측정을 위한 이론적 연구는 레이저 다이오드의 특성을 이해하고 이를 응용하는데 있어서 매우 중요한 연구라 할 수 있다.

코팅된 반도체 레이저 다이오드의 단면 반사율 측정 방법에는 여러가지 방법이 사용되고 있다[1]. 그 중에서 간단하면서도 정확한 단면 반사율을 측정할 수 있는 방법으로 코팅 전과 코팅 후의 문턱전류(threshold current)의 비로 반사율을 측정하는 문턱전류비(threshold current ratio) 방법이 있다.

기존의 문턱전류비 방법은 코팅 전과 코팅 후의 문턱 전류를 계산하는데 있어서 문턱전류 주입시의 캐리어 재결합시간(carrier recombination time)이 코팅 전과 후에 관계없이 일정하다고 가정하였다. 그러나 캐리어 재결합 시간은 캐리어의 농도에 따라 달라진다. 그리고 단면 반

사율이 달라지게 되면 레이저 다이오드에서 발생하는 손실이 달라지게 되며, 따라서 문턱전류의 값이 변하게 되며, 그 결과 문턱 캐리어 농도(threshold carrier density)가 변하게 된다. 그러므로 레이저 다이오드 단면에 코팅을 하게 되면 문턱전류가 달라져 문턱전류를 계산할 때 사용하는 캐리어 재결합시간도 달라지게 된다.

우리는 문턱전류의 비를 계산하는데 있어서 캐리어 재결합시간을 코팅 전과 후에 단면 반사율에 따라 다르게 설정하는 새로운 문턱전류비 방법을 제안한다. 제안된 문턱전류비 방법에 의하여 계산된 결과와 기존의 문턱전류비 방법에 의하여 계산된 결과는 코팅된 단면의 반사율이 작을수록 커짐을 볼 수 있었다.

2. 향상된 문턱전류비 방법

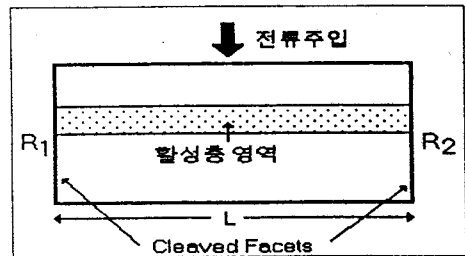


그림 1. 레이저 다이오드의 개념도

그림 1과 같이 길이 L 을 가지며 단면 1과 2의 반사율이 각각 R₁ 와 R₂ 인 레이저 다이오드에 주입되는 전류를 증가시키면 활성층영역의 캐리어 농도가 증가하여 레이저 다이오드의 이득이 증가한다. 레이저 다이오드에서 발생하는 이득과 손실이 같아지게 되는 주입전류의 값을 문턱전류라고 하며 그 때의 활성층 영역의 캐리어 농도를 문턱 캐리어농도라 한다. 문턱 캐리어농도 n_{th} 는 (1) 식과 같이 표현된다.

$$n_{th} = n_0 + (\alpha_m + \alpha_i) / (\alpha l) \tag{1}$$

여기서 n_0 는 transparency carrier density, α_m

은 $\frac{1}{2L} \ln(\frac{1}{R_1 R_2})$ 로 정의되는 단면 반사 손실,

Γ 는 confinement factor, α_i 는 레이저 다이오드 내부에서 발생하는 손실이고 a 는 이득계수를 나타낸다.

문턱(threshold) 근처에서 방출되는 광파워 중 유도방출 광파워는 무시될 수 있으므로 문턱전류밀도 J_{th} 는 다음과 같이 표현된다[2].

$$J_{th} = qd n_{th} / \tau_e(n_{th}) \quad (2)$$

여기서 $\tau_e(n) = (A_{nr} + Bn + Cn^2)^{-1}$ 로서 캐리어 재결합시간이고 d 는 활성층 영역의 두께를 나타낸다. 또한 A_{nr} 은 nonradiative recombination rate, B 는 radiative 재결합 계수이고, C 는 Auger 재결합 계수이다.

식 (1)을 식 (2)에 넣으면 문턱전류밀도는 다음과 같이 표현된다.

$$J_{th} = \frac{qdn_0}{\tau_e} + \frac{qd}{\tau_e a \Gamma} [\alpha_i + \frac{1}{2L} \ln(\frac{1}{R_1 R_2})] \quad (3)$$

코팅 전과 후의 문턱캐리어 농도 n_{th} 가 같다고 가정하면 코팅된 단면 2의 반사율 R_2 를 가질 때의 문턱전류 I_{th} 와 코팅하기 전의 단면 2의 반사율 R_2^0 를 가질 때의 문턱전류 I_{th}^0 의 비는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{I_{th}}{I_{th}^0} = \frac{[k(\alpha_i + \frac{\ln(\frac{1}{R_1 R_2})}{2L}) + dJ_0]}{[k(\alpha_i + \frac{\ln(\frac{1}{R_1 R_2^0})}{2L}) + dJ_0]} \quad (4)$$

여기서 $J_0 = \frac{qn_0}{\tau_e}$ 로서 transparency current density 이고 $k = \frac{qd}{\tau_e a \Gamma}$ 로서 정의된다

식 (4)의 문턱전류비를 구성하는 계수인 k 와 J_0 는 모두 τ_e 의 함수임을 알 수 있다. 식 (1)과 (2)로부터 단면 반사율이 달라지면 단면반사 손실이 달라져 문턱 캐리어농도가 달라지게 되며, 문턱에서의 캐리어 재결합시간 τ_e 가 달라지게 된다. 따라서 문턱전류비를 구성하는 계수 k 와 J_0 는 단면 반사율에 의해 변함을 알 수 있다. 따라서 이 점을 고려하면 식(4)의 문턱전류비는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{J_{th}}{J_{th}^0} = \frac{[k(\alpha + \frac{\ln(\frac{1}{R_1 R_2})}{2L}) + dJ_0]}{[k_0(\alpha + \frac{\ln(\frac{1}{R_1 R_2^0})}{2L}) + dJ_0]} \quad (5)$$

여기서 k 와 J_0 는 코팅된 단면 2의 반사율 R_2 를 가질 때의 계수이며, k_0 와 J_0 는 코팅 하기전 단면 2의 반사율 R_2^0 를 가질 때의 k 와 J_0 에 대응되는 계수이다.

식 (4)와 식 (5)로 각각 표현되는 문턱전류비의 결과를 비교하기 위하여 1.3 μm buried-heterostructure 레이저 다이오드의 파라메타값들을 사용하였고 그 값은 표 1과 같다[2].

파라메타	부호	값
Cavity length	L	250 μm
활성층영역 두께	d	0.2 μm
Confinement factor	Γ	0.3
내부 손실	α_i	40 cm^{-1}
이득 상수	a	$2.5 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$
Transparency carrier density	n_0	$1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
Nonradiative 재결합비율	A_{nr}	$1 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$
Radiative 재결합계수	B	$1 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$
Auger 캐리어 계수	C	$3 \times 10^{-29} \text{ cm}^6/\text{s}$

표 1. 1.3 μm buried-heterostructure 레이저 다이오드의 파라메타 값

그림 2는 단면 1의 반사율 R_1 이 0.32 일 때 단면 반사율 R_2 를 변화시키며 식 (4)와 (5)의 결과를 도시한 그림이다. k 와 J_0 가 R_2 의 함수인 식 (5)의 결과와 k 와 J_0 가 R_2 에 관계없이 일정한 식 (4)의 결과의 차이는 R_2 가 작아질 수록 커짐을 볼 수 있다. 예를 들어 문턱전류의 비가 2인 경우 기존의 식-식 (4)-에 의하면 단면 2의 반사율이 10^{-4} 이나, 우리가 제안한 식-식 (5)-에 의하면 단면 2의 반사율은 0.02 정도로서 매우 큰 차이가 발생함을 볼 수 있었다.

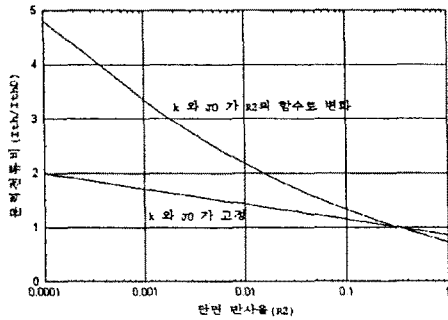


그림 2. k 와 J_0 를 고정했을 때와 k 와 J_0 를 반사율의 함수로서 고려했을 때의 단면 R_2 의 함수로서 도시한 문턱전류비

3. 결론

레이저 다이오드의 코팅된 단면 반사율을 결정하는 방법 중 비교적 간단하면서도 정확한 결과를 얻을 수 있는 문턱전류비의 방법에 대하여 연구하였다. 기존의 문턱전류비 방법은 코팅 전과 후의 문턱전류를 계산하는데 있어서 문턱 캐리어농도를 같다고 놓고 계산하였다. 그러나 레이저 다이오드의 단면을 코팅하게 되면 반사율이 달라져 단면반사 손실이 달라지게 되며, 그 결과 문턱 캐리어농도 달라지게 된다.

따라서 우리는 기존의 문턱전류비 방법에 이 점을 고려한 향상된 문턱전류비 방법을 제안하였다. $1.3 \mu\text{m}$ buried-heterostructure 레이저 다이오드의 파라메타 값들을 사용하여 기존의 문턱전류비 방법의 결과와 향상된 문턱전류비 방법의 결과를 비교하였다. 코팅된 단면반사율이 작아질수록 두방법의 결과의 차이는 커짐을 볼 수 있었다. 예를 들어 문턱전류의 비가 2인 경우 기존의 문턱전류비 방법에 의하면 단면 2의 반사율이 10^{-4} 이나 우리가 제안한 향상된 문턱전류비 방법에 의하면 단면 2의 반사율은 0.02 정도로서 매우 큰 차이가 발생함을 볼 수 있었다.

제안된 문턱전류비 방법의 유효성을 검증하기 위하여 현재 실험을 진행중이다.

4. 참고문헌

1. H. Ukita, K. Mise and Y. Katagiri, "Simple Measurement of the Reflectivity of Antireflection-Coated Laser Diode Facets", Japanese J. Appl. Phys., Vol. 27, No. 6, 1988, pp. L1128-L1130
2. G. P. Agrawal, N. K. Dutta, "Semiconductor Lasers", New York : Van Nostrand Reinhold, 1993, pp. 57