

반도체 외부 공진기 링 레이저의 종 모드 간격 변화를 이용한 고반사율을 갖는 Etalon Coating Reflectivity의 정밀 측정

엄진섭* · 안상호

강원대학교 전자공학과

(1999년 7월 29일 받음, 1999년 11월 17일 수정본 받음)

본 논문에서는 외부 공진기 반도체 링 레이저 내부에 에탈론을 삽입함으로써 외부 공진기 링 레이저의 종모드 간격이 현저히 변화하는 사실을 관측하고 이에 대한 이론적 분석을 수행하였다. 외부공진기 링 레이저의 종 모드 간격은 에탈론의 단면 반사율에 의존하여 변화하였으며, 공진모드의 분석을 통해 이에 대한 정량적인 해석을 보였다. 또한 이러한 효과가 에탈론이나 FP 필터의 단면 반사율의 정밀한 측정에 응용될 수 있다는 것을 실험을 통해 증명하였다. 제안된 방법은 특히 높은 반사율에 대해서도 정밀한 측정결과를 얻을 수 있으며 측정이 쉽고 매우 빠르게 이루어진다.

I. 서 론

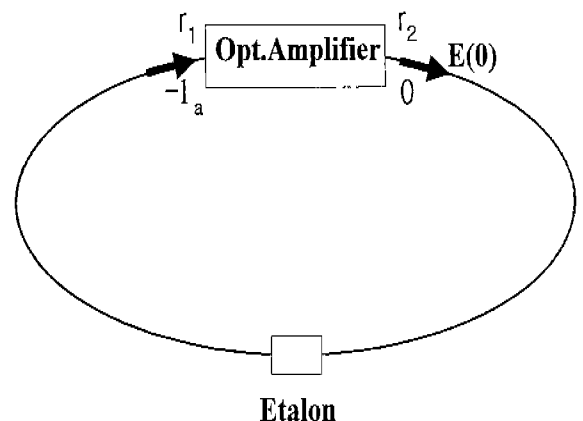
공진기 형태의 구조로 이용되는 FP 필터(Fabry-Perot filter)나 에탈론(etalon) 등의 단면 반사계수는 필터특성을 결정하는데 있어 대부분의 경우 중요한 변수로 작용한다. 따라서 이에 대한 정확한 값을 얻는 것은 이들을 활용하는 다양한 실험 결과의 분석과 결과 예측에 큰 영향을 미칠 수 있다. 이러한 단면 반사계수를 측정하기 위한 일반적인 측정방법으로는 주로 주사 방식이 사용되는데, 이 방식에서는 FP 필터와 에탈론 등에 입사되는 빛의 파장을 변화시키거나 공진기 간격을 변화시킴으로써 얻어진 투과특성을 측정함으로써 단면 반사계수를 알 수 있다. 그러나 이러한 스캐닝 방식은 엄밀한 광학적 정렬을 요구함으로써 측정이 다소 까다로우며, 투과 광출력에 있어서의 손실을 감수해야만 하므로 높은 반사율 측정에 있어서는 정밀도가 떨어진다. 이 논문에서는 이에 대해 지금까지 발표된 적이 없는 새로운 방법을 제안하였으며, 이를 이용하여 99% 이상의 높은 반사율을 가지는 에탈론에 대해 정밀한 측정결과를 얻을 수 있었다. 단순히 공진기 내부에 에탈론을 삽입한 후 RF 스펙트럼 분석기를 통해 측정된 종 모드 간격의 변화를 관찰함으로써 에탈론의 단면 반사율을 쉽게 알 수 있다. 실험에서는 높은 이득을 얻기 위하여 외부 공진기와 결합된 SOA(Semiconductor Optical Amplifier)를 사용하였으며, 측정에 있어 투과된 광의 세기를 이용하는 것이 아니라 모드 간격의 변화를 이용하기 때문에 특히 정밀한 반사도(> 99%)의 측정에 적합하다. 또한 제안된 방법에서는 단지 외부 공진기 링 레이저를 구성하고, 공진기 내부에 에탈론을 삽입하는 것으로서 측정이 매우 빠르고 쉽게 이루어진다.

II. 본 론

먼저, 실험에 대한 이론적인 내용을 살펴보기로 한다. 그림 1은 공진기 내부에 도입된 에탈론 또는 FP 필터와 상호 작용을 하는 외부 공진기 레이저의 공진 모드를 분석하기 위한 개략적인 그림이며, 매우 낮은 단면 반사도(< 10⁻⁴)를 가지는 SOA를 사용하여 진행파형(traveling wave)타입의 링 레이저 구성을 도식화한 것이다. 공진기내를 한바퀴 왕복(round-trip)하는 전계(electric field)의 주기성을 나타내는 공진조건¹⁾은 다음과 같이 주어진다.

$$\Pi(1 - \alpha_1)^{1/2} e^{-j\frac{\omega}{c}(L-d)} * e^{-j\frac{\omega}{c}n_a l_a} * T(\omega) = 1 \quad (1)$$

α_1 는 공진기를 구성하는 i 번째 광부품에 의해 유발되는 손실이며, 지수항 $\exp(-j\omega(L-d)/c)$ 와 $\exp(-j\omega n_a l_a/c)$ 는 각각 외부 공진기와 SOA 내에서의 위상변화를 나타낸다. L , d , n_a , l_a 는 각각 외부공진기 길이, 에탈론 두께, SOA 도파로의 유효굴절



Etalon

그림 1. 이론적 분석을 위한 외부 공진기 반도체 링 레이저의 도식화된 모델.

*이 연구는 '97년도 강원대학교 기성회 교수해의 연구 지원에 의하여 이루어졌음

을, SOA의 길이를 나타내며, ω 는 광 주파수 그리고 g 는 SOA의 손수이득이다. $T(\omega)$ 는 다음과 같이 주어지는 광파(optical field)에 대한 에탈론의 전달함수^[2,3]이다.

$$T(\omega) = \frac{e^{-j\frac{\omega}{c}nd}}{1-R} (1-R-A) = \frac{e^{-j\frac{\theta}{2}}}{1-Re^{-j\theta}} (1-R-A) \quad (2)$$

여기서 $\theta = 2\omega nd/c$ 이고, R, n, d 는 각각 에탈론의 단면 반사율과 굴절율, 그리고 두께를 나타내며, A 는 반사 코팅에 의해 유발되는 미세한 광 손실^[3]을 나타낸다. 식(2)로부터 에탈론의 공진은 θ 가 2π 의 정수배가 되는 경우에 일어나는 것을 알 수 있다. 레이저의 공진은 식(1)의 좌변의 위상항이 2π 의 정수배가 될 때 발생하므로 공진 주파수는 다음과 같은 식을 통해 얻을 수 있다.

$$\tan^{-1} \left[\frac{R \sin \theta}{1 - R \cos \theta} \right] + \frac{\omega L_{eff}}{c} = 2\pi m \quad (3)$$

여기서 c 는 진공중의 빛의 속도이며, 실효 공진기 길이 L_{eff} 는 $L + n_a l_a + (n-1)d$ 로 주어지고 m 은 정수이다. 만약 레이저의 발진 주파수가 에탈론의 공진 주파수에 충분히 가깝다면 θ 는 거의 2π 의 정수배에 해당하는 값을 가지게 된다. 이때에 식(3)의 좌변의 첫 항을 Taylor series의 첫 항만으로 근사화시키면 다음과 같은 식을 얻게 된다.

$$\frac{R \sin \theta}{1 - R \cos \theta} + \frac{\omega L_{eff}}{c} = 2\pi m \quad (4)$$

θ 가 2π 의 정수배에 매우 가깝다는 조건으로부터 $\theta = 2\pi m' + \Delta\theta$ 라 하면 ($|\Delta\theta| \ll 1$), $\sin \theta = \sin \Delta\theta = \Delta\theta$ 를 얻게 된다. 이를 식(4)에 적용하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻게 된다.

$$\frac{R \theta}{1 - R \cos \theta} + \frac{\omega L_{eff}}{c} = 2\pi \left(m + \frac{R}{1-R} m' \right) \quad (5)$$

그런데 에탈론과 외부 공진기 반도체 링 레이저의 공진모드들을 함께 고려할 때 에탈론의 고정된 m' 정수값(에탈론의 두께와 피이크들 중의 어느 하나에 해당됨)에 대하여 m 의 정수값들(외부 공진기 반도체 링 레이저의 공진 모드들에 해당함)은 연속적인 값을 가질 수 있다. 이로부터 외부 공진기 반도체 링 레이저의 종 모드 간격 $\Delta\omega$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\omega = \frac{2\pi c}{L_{eff} + \frac{R}{1-R} \cdot 2nd} \quad (6)$$

이때의 $\Delta\omega$ 는 에탈론이 없을 때의 모드간격 $2\pi c/L_{eff}$ 와는 다른 값을 알 수 있다. 만약 R 이 1에 근접하면 종 모드간격은 현저히 줄어들 수 있다는 사실에 주목하자. 식(6)은 높은 반사율을 가지는 에탈론의 단면 반사율 측정에 사용되었다. 에탈론의 최대 광 투과는 R 이 거의 1에 가까울 때 극적으로 감소할 것이다. 식(2)로부터 실제 최대 광 투과 $|T_{max}|^2$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$|T_{max}|^2 = \left(1 - \frac{A}{1-R} \right)^2 \quad (7)$$

R 이 1에 가까울수록 최대 광 투과 $|T_{max}|^2$ 은 거의 0에 근접하게 되는데, 이러한 상황은 레이저의 발진을 위해서 더 높은 한계이득 g_{th} 를 요구하게 된다. 이때 요구되어지는 한계이득이 현재의 기술수준으로 가능한 것인지를 알아보기 위해 식(1)의 좌변의 크기가 1과 같다는 조건을 이용하여 한계이득을 계산해보면 다음과 같다.

$$g_{th} = \frac{1}{l_a} \sum_i \ln \left(\frac{1}{1-\alpha_i} \right) + \frac{1}{l_a} \ln \left(\frac{1}{|T_{max}|^2} \right) \quad (8)$$

$|T_{max}|^2$ 이 0.001일 때(고반사 코팅)를 고려해 보면, 전형적인 스케닝 방식으로는 정확한 반사를 측정에 매우 어려움을 겪게 될 수 있다. 그러나 식(8)에 따르면 레이저의 발진을 위해 추가적으로 요구되는 이득은 69 cm^{-1} ($l_a = 1000 \mu\text{m}$) 정도인데, 이는 현재의 기술수준으로 쉽게 얻을 수 있다.

이 논문에서는 단면 반사율 R 의 함수로써 모드 간격을 고려한 식(6)의 타당성을 증명하였다. 측정을 위해 사용된 레이저는 그림 2와 같으며 진행파형(traveling wave) 타입의 외부 공진기 반도체 링 레이저이다. 외부 공진기의 길이는 약 40 cm인 반면 에탈론 두께는 약 1 mm이다. 실험에 사용된 SOA는 매우 낮은 반사율($< 10^{-4}$)을 가지는 경사진 단면을 가지고 있으며, 길이는 약 1000 μm 이고 발진 파장은 1.3 μm 이다. 외부 공진기내의 회절격자는 공진기 모드가 에탈론의 최대 광 투과 주파수와 일치할 수 있도록 조정하기 위하여 PZT 컨트롤러 위에 장착되었다. 실험에 사용된 에탈론은 단면 코팅 반사율이 각각 99%와 97.5%(허용오차 $\pm 0.5\%$)인 것을 사용하였다. 광 검출기에서의 최대전류가 발생하는 것은 레이저 모드가 에탈론의 공진 모드와 일치할 때이다. 따라서 광 검출기에서 검출된 전류는 에탈론의 최대 광 투과 주파수로부터 떨어

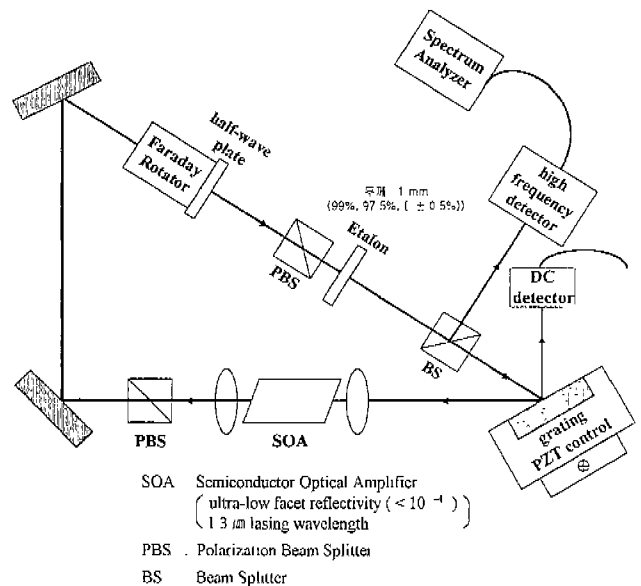


그림 2. 실험 구성도.

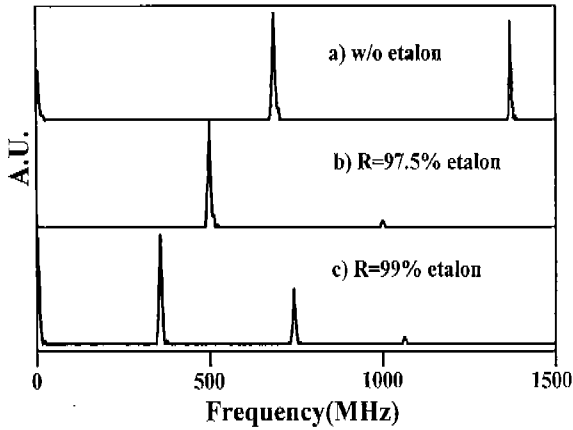


그림 3. 에탈론 단면반사율에 따른 측정된 종 모드간격.

진 정도를 판단하는 근거가 된다. 편광에 부관한 빛살가르개에 의해 50:50으로 분리된 다른 한쪽의 출력 광은 고속의 광검출기에 집광된다. 광 검출기는 RF 스펙트럼 분석기와 연결되며 간섭 주파수(beat frequency) 측정을 통해 종 모드의 모드간격을 보여 준다. 에탈론의 최적화 각도 조정은 RF 간섭 주파수가 최소가 되도록 조정함으로써 쉽게 맞추어질 수 있다.

그림 3(a)는 에탈론이 없을 때의 간섭 주파수를 보여주고 있다. 이때의 종모드 간격은 699 MHz였으며 계산된 L_{eff} 는 42.9 cm였다. 그림 3(b)는 97.5%의 반사율을 가지는 에탈론을 삽입한 후에 측정된 간섭 주파수를 보여주고 있으며, 이때는 모드 간격이 500 MHz로 감소하였다. 99%의 에탈론을 삽입한 후 측정한 결과, 모드 간격이 359 MHz로 훨씬 더 줄어들었다. 그림 4는 계산된 L_{eff} 가 42.9 cm이고 에탈론 두께가 1 mm일 때 모드 간격대비 $\log(1-R)^{-1}$ 을 보인 것이다. 그림에 표시된 점은 제조업체에 의해 표시된 에탈론의 반사율이며, 그래프는 측정된 모드간격을 통해 계산된 값을 나타낸다. 실험의 초점은 제조업체에 의해 명시된 에탈론의 단면 반사율이 얼마나 정확한 값인가 하는 것이다. 실험결과 명시된 규격과 비교적 잘 맞아 떨어짐을 알 수 있었다. 이 실험은 에탈론 등의 단면 코팅 반사율을 정밀하게 측정할 수 있는 새로운 방법으로 이용될 수 있으며, 실험에 사용된 에탈론의 실제 측정된 반사율

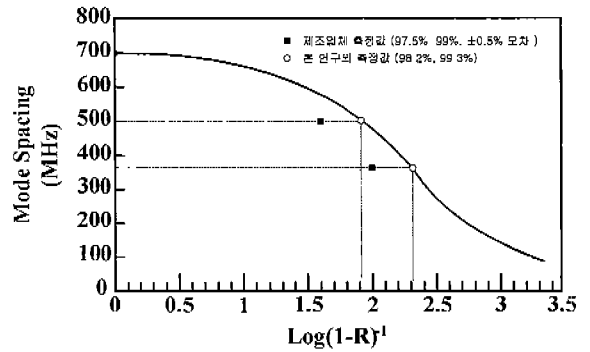


그림 4. 종 모드간격 대비 $\log(1-R)^{-1}$.

은 각각 0.982와 0.993인 것으로 나타났다.

III. 결 론

이 논문에서는 외부 공진기 반도체 링 레이저의 종 모드 간격이 높은 단면 반사율을 가지는 에탈론의 삽입으로 현저히 줄어들 수 있다는 사실을 보였다. 또한 이러한 효과가 에탈론이나 FP 필터 등의 단면 반사율의 정밀한 측정에 이용될 수 있음을 실험적으로 증명하였다. 제안된 방식은 전형적인 스캐닝 방식에 비해 측정 과정이 매우 쉽고 빠르게 이루어질 수 있으며, 높은 반사율에 대하여 정밀한 측정결과를 얻을 수 있다.

참고문헌

- [1] B. Tromborg, H. Olesen, X. Pan and S. Saito, *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-23**, 1875-1889 (1987).
- [2] C. H. Lange and C. B. Su, *Appl. Phys. Lett.* **55**(17), 1704-1706 (1989).
- [3] M. Born and E. Wolf, *Principle of Optics* (Pergamon, Oxford, 1965), p. 328.
- [4] E. T. Peng and C. B. Su, *Opt. Lett.* **17**(1), 55-57 (1992).
- [5] Rideout, R. Holmstrom, J. LaCourse, E. Maland and W. Powazinik, *Electron. Lett.* **26**(1), 36-38 (1990).

Effective measurement of high facet reflectivity using the variation of longitudinal modes spacing of semiconductor external cavity ring lasers

Jinseob Eom and Sangho Ahn

Department of Electronics, Kangwon National University, Kangwon, 200-701, Korea

(Received July 29, 1999. Revised manuscript received November 17, 1999)

It is observed that the mode spacing of an external cavity semiconductor laser can be altered dramatically by the insertion of an intracavity etalon. The mode spacing is decreased as a function of etalon's reflectivity and this effect is quantitatively explained by an analysis of resonant modes. We also show that this effect provides a precise and convenient alternative for determining the coating reflectivity of a high reflectivity etalon.