

## DWDM 광통신용 50GHz 내장형 파장안정화 모듈 제작

최광성, 박홍우, 박준희, 최병석, 이종현, 윤호경, 엄용성, 문중태  
한국전자통신연구원 광통신소자연구부 집적광모듈팀

Fabrication of 50GHz internal wavelength locker module for DWDM applications

Kwang-Seung Choi, Heung-Woo Park, Jun-Hee Park, Byung-Seok Choi,  
Jong-Hyun Lee, Ho-Kyung Yun, Yong-Sung Eom, Jong-Tae Moon

Integrated Optical Module Team, Electronics and Telecommunications Research Institute

### Abstract

Tunable laser diode module with 50GHz-spacing internal wavelength locker was developed. Angle tilting dependency on FSR and peak wavelength shift and the proper initial tilting angle was calculated. By tilting the etalon, the response of the internal wavelength locker module was tuned. As a result, the fabricated internal wavelength locker module showed good performance over 62 channels.

**Key Words :** tunable LD, DWDM, MEMS, etalon, Fabry-Perot interferometer, wavelength locker

### 1. 서 론

WDM(wavelength division multiplexing)용 광원 모듈에서 시스템의 구성을 단순화하여 경제성을 높이고 신뢰성을 확보할 수 있다는 측면에서 내장형 파장안정화 모듈의 필요성이 증가하고 있다 [1-2]. 지금까지 송신 레이저의 파장 안정화를 위한 방법으로 reference absorption gas, grating, fiber grating, Fabry-Perot(F-P or etalon) 필터를 포함하는 다양한 방법이 사용되어져 왔다. 이 중에서 수십 채널 이상의 DWDM(dense-WDM)을 위한 넓은 파장 영역을 수용할 수 있는 경제적이며 효과적인 수단은 F-P 필터를 사용하는 방법이다. LD(laser diode)의 파장을 ITU(international telecommunication union) grid 에 안정화 시키기 위한 tuning 방법에는 에탈론의 각도 tilting, 에탈론의 온도 변화를 통한 cavity length의 변화, 압전 구동을 통한 기계적인 cavity length 가변의 세 가지 방법이 있다. 기존의 방법에서는 주로 두 번째 방법인 에탈론을 포함한 파장안정화 모듈을 TEC(thermo-electric cooler) 위에 장착한 후 온도

변화를 통한 파장 가변 기술을 이용하였다 [3]. 이때, 파장 가변 정도는 대략  $0.1 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  로서 100 GHz FSR(free spectral range) 시스템에서는  $10^\circ\text{C}$  안팎에서 파장안정화 기능을 수행할 수 있었다. 그러나, 내장형 파장안정화 시스템에서 온도 변화를 통한 파장 tuning 기능을 수행하게 되면 LD의 동작 조건에 영향을 주게 되어 소자 구동 조건이 상당히 어려워지게 된다. 이에 본 논문에서는 시스템의 온도를 일정하게 유지하면서 에탈론을 tilting 함으로써 빔의 반사 잡음을 줄이고 파장안정화를 이룰 수 있는 모듈에 대해 보고한다.

### 2. Fabry-Perot Interferometer (etalon)

#### 2.1 Etalon

F-P 필터는 정밀한 파장 측정, 가스의 굴절률 측정, 파장 측정기의 보정(calibration) 등을 위한 가장 적절한 도구로서 널리 사용되고 있다. 간섭계의 성능을 결정하는 중요한 변수는 반사계수, 굴절률, 두 반사면 사이의 간격(cavity length), 빔의

입사 각도로써 두 거울 사이의 간격이 고정된 F-P 간섭계를 일반적으로 에탈론(etalon) 이라 부른다. 에탈론은 두 평판 거울 사이를 공기로 채운 air-spaced etalon과 solid plate의 양 면에 박막을 코팅한 솔리드 에탈론 (solid etalon)이 사용되며, 솔리드 에탈론의 경우 작은 크기로 고정밀 두께 제어와 두 거울면 사이의 우수한 평형성을 얻을 수 있어 많이 사용되고 있다.

F-P 필터는 다중 반사 빔 간의 위상차에 의해 투과광의 간섭 무늬를 얻기 위한 도구로써 공동 (cavity) 양단의 반사율(reflectance)이 같은 경우에 평판 내부에서 다중 반사와 굴절을 일으킨다. 각 계면에서의 반사, 투과 계수를 각각  $r_1(n_f \rightarrow n_1$  일 때),  $t_1(n_1 \rightarrow n_f$  일 때),  $r_2(n_2 \rightarrow n_f$  일 때),  $t_2(n_f \rightarrow n_2$  일 때)로 나타낼 때, 먼저 F-P의 transmittance를 살펴보면 F-P 공동 내부에서 연속적인 반사 빔들 사이의 위상차를  $\delta$ 로 하고,  $E_0 e^{i\omega t}$  로 표현되는 입사 평면광에 대하여 연속적으로 반사 굴절된 후 투과되어 나오는 빔들 중에서 N 번째 빔을  $E_N$  이라 하면 모든 투과광의 합  $E_T$  는 다음 식으로 표현된다.

$$\delta = 2n_f d \cos(\theta_f) = \frac{4\pi v n_f d \cos(\theta_f)}{C}$$

$$E_N = [t_1 t_2 (r_1 r_2)^{(N-1)} E_0] e^{i(\omega t - (N-1)\delta)}$$

$$E_T = \sum_{N=1}^{\infty} E_N = t_1 t_2 E_0 e^{i\omega t} \sum_{N=1}^{\infty} (r_1 r_2)^{(N-1)} e^{-i(N-1)\delta} = \frac{t_1 t_2 E_0 e^{i\omega t}}{1 - r_1 r_2 e^{-i\delta}}$$

C는 빛의 속도이며

$$I_T = |E_T|^2 = E_T E_T^*, \quad I_i = |E_i|^2 = E_i E_i^* = E_0^2 \text{의 관계식에 의해}$$

$$I_T = \frac{|t_1 t_2|^2}{(1 - r_1 r_2 e^{-i\delta})(1 - r_1 r_2 e^{i\delta})} I_i = \frac{|t_1 t_2|^2}{1 + (r_1 r_2)^2 - 2r_1 r_2 \cos \delta} I_i$$

$$= \frac{|t_1 t_2|^2}{(1 - r_1 r_2)^2 + 4r_1 r_2 \sin^2(\delta/2)} I_i$$

여기서,  $\cos \delta = 1 - 2\sin^2(\delta/2)$  이다.

$$T = \frac{I_T}{I_i} = \frac{T_{\max}}{1 + (2F/\pi)^2 \sin^2(\pi v/\nu_F)} \quad (\text{eq. 1})$$

$$\text{여기서, } T_{\max} = \frac{|t_1 t_2|^2}{(1 - r_1 r_2)^2}, \quad F = [\pi(r_1 r_2)^{1/2} / (1 - r_1 r_2)],$$

$$\nu_F = \frac{C}{2n_f d \cos(\theta_f)} \text{ 이다.}$$

수식 (1)로 부터 평면광의 입사 조건 하에서 transmittance가 빔의 입사각, 에탈론의 두께, 굴절율, 공동 양단에서의 투과/반사 계수의 함수임을 알 수 있다.

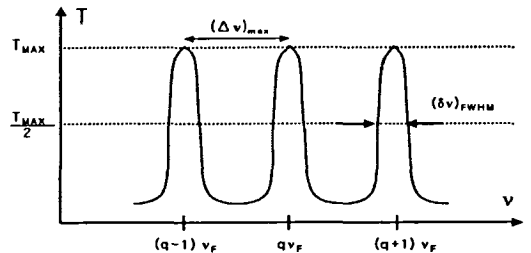


그림 1. Schematic of resonant frequency spacing and resonant spectral width which determine the spectral response of Fabry-Perot

위 식에서  $T = T_{\max}$ 의 조건은  $\nu = q\nu_F$ ,  $q=1,2,3,\dots$ 일 때이므로, resonance frequency spacing은  $\nu_F$  (FSR)임을 알 수 있다.  $T = T_{\max}/2$ 의 조건에서 resonance peak의 반치폭(FWHM: full width half maximum), 즉 resonance spectral width를 구할 수 있다. F-P 간섭계의 spectral response 특성을 결정 짓는 두 가지 파라미터는 그림 1에서 보듯이 바로 resonance frequency spacing 과 resonance spectral width이다. 관계식을 요약하면 다음과 같다.

$$(\Delta\nu)_{\max} = \nu_F = \frac{C}{2n_f d \cos(\theta_f)} \quad (\text{eq. 2})$$

$$(\delta\nu)_{FWHM} = \frac{2\nu_F}{\pi} \sin^{-1}\left(\frac{\pi}{2F}\right) \quad (\text{eq. 3})$$

여기서 F 는 finesse 라고 불리는 파라미터로써 F-P 에탈론 공동 내부의 반사율에 의해 결정되며, 그 물리적 의미는 거울 손실이 작을수록 resonant spectral width는 작아진다는 것이다. 즉, finesse 가 클수록 resonance peak는 예리해지고 wavelength 선택성은 커진다. 또한, 위의 식에서 F-P 필터의 두께와 굴절율이 작을수록 resonance

frequency spacing 은 커지고 spectral width는 작아짐을 알 수 있다. 또한, 입사 빔의 각이 커짐에 따라서도 같은 현상이 발생한다.

반사계수와 투과계수 또한 입사각에 의존하는 파라미터이므로 이에 대한 고려가 있어야 한다. Fresno 식에 의해  $n_f$ 인 매질에서  $n_o$ 인 매질로 수직면에 각  $\theta_i$ 를 가지고 입사하는 빔에 대하여 반사, 투과 계수는 각각 다음과 같이 입사각에 의존한다.

TE mode :

$$r_2 = E_r / E_i = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{(n_o/n_f)^2 - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{(n_o/n_f)^2 - \sin^2 \theta_i}}$$

$$t_2 = E_t / E_i = \frac{2 \cos \theta_i}{\cos \theta_i + \sqrt{(n_o/n_f)^2 - \sin^2 \theta_i}}$$

TM mode :

$$r_2 = E_r / E_i = \frac{(n_o/n_f)^2 \cos \theta_i - \sqrt{(n_o/n_f)^2 - \sin^2 \theta_i}}{(n_o/n_f)^2 \cos \theta_i + \sqrt{(n_o/n_f)^2 - \sin^2 \theta_i}}$$

$$t_2 = E_t / E_i = \frac{2(n_o/n_f) \cos \theta_i}{(n_o/n_f)^2 \cos \theta_i + \sqrt{(n_o/n_f)^2 - \sin^2 \theta_i}}$$

이상의 수식으로부터 결국 F-P 필터의 transmittance는 굴절율, 두께와 빔의 입사각에 대한 정보만 있으면 파장에 따른 spectral response 특성을 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있다. 특별히 에탈론 양면의 반사계수가 같게 설계된 이상적인 에탈론의 경우,  $R \equiv r^2 = (r_1)^2 = (r_2)^2$  이고,  $R+T=1$ 의 조건에 의하여  $t_1 t_2 = 1 - r^2$  이므로 식 (1)에서 finesse 와  $T_{max}$ 를  $R$ 로 나타내면,  $T_{max}=1$ ,  $F=[\pi\sqrt{R}/(1-R)]$ 로 표현된다. 이로부터 에탈론의 두께, 굴절율과 빔의 입사각이 일정한 경우에 resonance spectral width는 완전히 에탈론 거울면의 반사계수에 의해 결정됨을 알 수 있다. 그림 2에 이상적인 에탈론 코팅 박막의 반사율 변화에 따른 투과광의 파장의존 특성 그래프를 나타내었다. 반사율이 커짐에 따라 투과광의 폭이 작아지며 더욱 예리해지는 것을 알 수 있다. 파장안정화기에 사용할 에탈론의 반사계수를 정함으로써 파장안정화 locking range 와 locking 안정성이 변하게

된다. 일반적으로 파장 안정화기에 사용되는 반사계수는 40~50% 가 많이 사용된다.

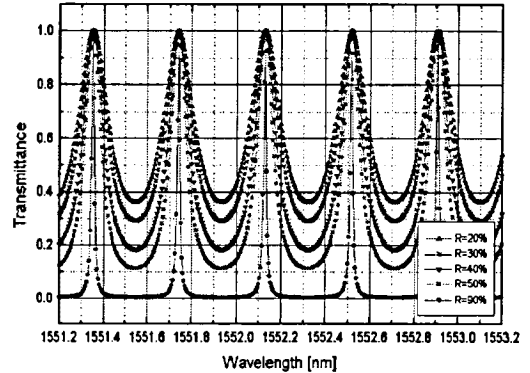


그림 2. Transmission plots of ideal Fabry-Perot resonators with various reflectances

### 2.2 Etalon tilting

파장안정화기에서 레이저로부터 방출된 빔은 그림 3에 보인 바와 같이 collimating 렌즈에 의해 평행광으로 바뀌게 되고 beam splitter를 거친 후 에탈론을 통과하게 된다. 이 때 본 논문에서 사용한 collimating 렌즈의 초점거리와 렌즈, beam splitter의 크기 및 간격 등을 고려하여 계산하면 collimating 렌즈로부터 에탈론 표면까지의 거리는 3.6 mm 이다. 에탈론을 빔에 대해 수직으로 놓았을 경우에는 에탈론으로부터 반사된 빔이 레이저 다이오드로 반사되어 반사 손실이 발생한다. 이를 방지하기 위하여 에탈론을 tilting 하게 되며 광학 시뮬레이션에 의하면 4° 이상으로 tilting 하면 반사 손실이 거의 없는 것으로 계산되었다. 그러나, 본 논문에서는 그림 5에 나타난 바와 같은 결과로부터 초기 tilting 각도를 8°로 정하였다.

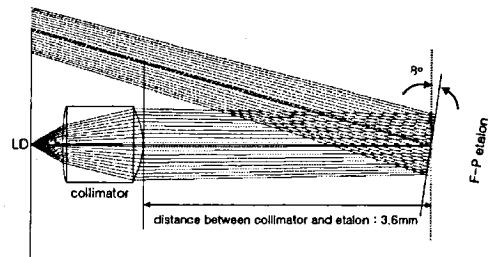


그림 3. Beam pass simulation for return noise estimation

그림 4는 수직입사 조건에서 50GHz FSR을 갖는 에탈론을 tilting 하였을 경우의 FSR 변화 정도를 보여주는 계산 결과이다. 에탈론을 tilting 함으로써 FSR 이 변하게 되며 수직 입사 조건에서 50GHz FSR을 갖는 에탈론을 8°로 tilting 하여 사용하게 되면 FSR 이 현저히 바뀌게 되어 중심 파장에서 ITU grid 에 맞도록 정렬하여도 사용 가능한 채널의 수가 현저히 감소한다. 이를 보정하기 위해서는 8°로 tilting 하였을 때 FSR 이 50GHz 가 되도록 에탈론을 제작하여야 하며 이렇게 계산한 결과는 49.51~49.52GHz 이다.

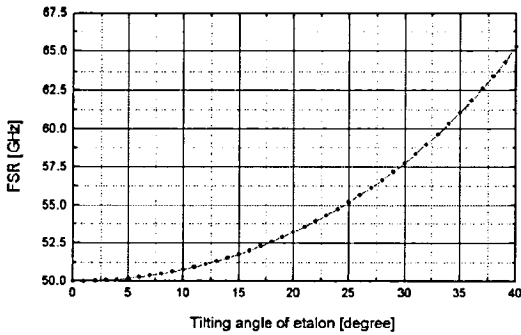


그림 4. Plot of 50GHz etalon's FSR variation with etalon tilting angle

그림 5는 에탈론을 초기각도 8°로 tilting 하였을 경우 FSR 이 50GHz 가 되도록 설계한 에탈론에 있어서 초기 tilting 각도로부터 미세하게 각도 튜닝할 수 있는 정도를 보여주는 그래프이다. 초기 각도 8°로 tilting 한 에탈론에 있어서 0.1° 단위로 tilting 할 경우 0.1° 씩 증가시킬 경우 파장은 장파장 쪽으로 약간 변이하며 반대로 0.1° 씩 감소시킬 경우 단파장쪽으로 등간격으로 변이한다. 또한, 0.01° 단위로 tilting 할 경우에는 0.1° 단위로 tilting 할 경우와 반대로 0.01° 씩 증가시킬 경우에는 단파장 쪽으로 변이하며 0.01° 씩 감소시킬 경우에는 장파장쪽으로 변이한다. 이와 같은 결과는 초기 tilting 각도를 8°로 하였을 때에만 얻어지는 결과이다. 초기 각도를 8°가 아닌 5°~10°로 하였을 경우에는 이와 같은 경향성이 FSR 값을 넘어서게 되어 단위 각도 tilting 에 대한 파장 변화 규칙이 복잡해진다. 이런 이유로 본 논문에서는 에탈론의 초기 tilting 각도를 8°로 정하여 사용하였다.

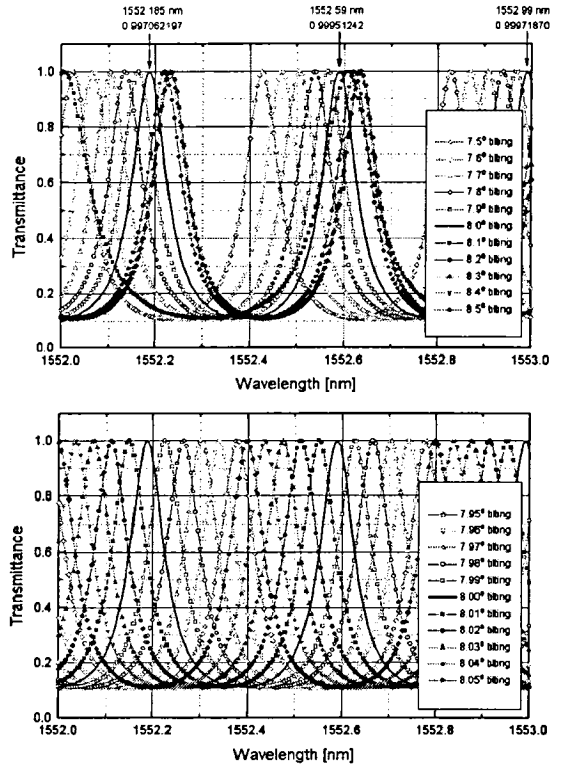


그림 5. Plots of peak wavelength shifts with etalon tilting (initial tilting angle : 8°)

### 3. 파장안정화기의 제작

본 연구에서 개발한 파장 안정화기의 개략도를 그림 6에 나타내었다. 14핀 버터플라이 패키지 형태로 제작하였으며, LD(SG-DBR, sampled grating distributed bragg reflector)의 후면으로부터 나오는 빔은 collimating lens에 의해 평행광으로 바뀌게 되고 beam splitter를 거친 후 에탈론을 통과하게 된다. 이때 모니터링 photodiode (m\_PD)와 에탈론 photodiode ( $\lambda$ \_PD) 신호의 비 ( $R_R(\text{responsivity ratio}) \equiv I_{\lambda\_PD} / I_{m\_PD}$ )를 이용하여 파장을 모니터링 하게 된다. 이상적으로 제작된 파장안정화기에 있어 m\_PD와  $\lambda$ \_PD는 그림 7에 보인 바와 같은 경향의 출력을 나타낸다. m\_PD는 LD의 후면으로 방출되는 광출력의 크기를 나타내며 LD의 출력이 이상적으로 일정할 경우 상수 값을 갖는다. 또한,  $\lambda$ \_PD는 에탈론 투과 특성에 따라 주기적인 사인함수의 특성을 나타내며 에탈론

양면에 코팅된 박막의 반사율이 증가함에 따라 투과 폭이 좁아지는 경향을 나타낸다. 그림 6에서 알 수 있는 바와 같이, m\_PD의 출력과 λ\_PD 출력의 교점은 한 주기 내에 2 곳이 존재하게 된다. 이 중 한 점 만을 사용하게 되며 그림 7에는 positive slope locking의 예를 보이고 있다. 파장 안정화기의 최종 출력 신호인 R\_R 값은 m\_PD와 λ\_PD 출력의 비(ratio)로서 원하는 파장대역 범위에서 상수 값을 나타내야 한다.

그림 8에는 본 연구에서 제작한 파장안정화 모듈의 R\_R 측정값을 나타내었다. 3.1 THz 범위에 대해 파장안정화기의 특성을 측정하였으며 이는 50 GHz 응용에 있어 62 채널에 해당하는 주파수 범위로서 상당히 넓은 구간이다. 이 영역에서 제작된 파장안정화기는 상당히 균일한 R\_R 값을 나타내었으나 주파수가 증가하는 부분에서 약간의 오차가 존재함이 관찰되었다. 이는 에탈론 tilting 오차에 기인한 FSR 변화에 그 원인이 있다고 생각된다.

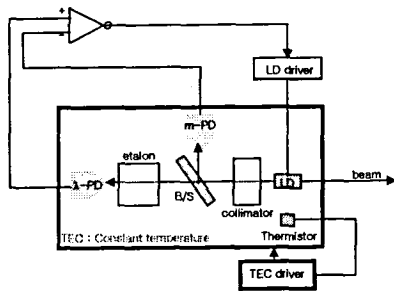


그림 6. Schematic diagram of the wavelength-locker system

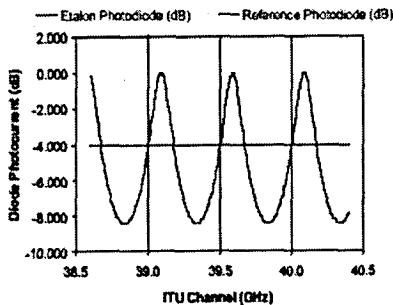


그림 7. Output signals of two PDs of the wavelength locker system

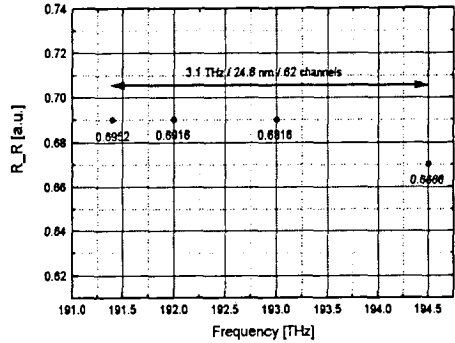


그림 8. Measured R\_R data of the fabricated wavelength locker

#### 4. 결론

시스템의 온도를 일정하게 유지하면서 에탈론을 tilting 함으로써 빔의 반사 잡음을 줄이고 파장안정화를 이룰 수 있는 모듈을 설계하고 제작하였다. 반사 잡음을 줄이기 위해 파장안정화 모듈을 초기 각도 8°로 회전시킨 상태에서 약 0.01° 단위로 tilting 으으로써 0.05 nm 정도의 파장 변화 감도를 얻을 수 있음을 확인하였다. 제작된 파장안정화기는 50GHz 간격의 62 채널에 대해 안정된 파장안정화 특성을 나타내었다.

#### 참고문헌

- [1] Tatsuno, K. et al., OFC Conference and Exhibit, vol. 2, 2001, pp. TuB5-T1-4
- [2] Park, K.J., OFC Conference, vol. 2, 2000, pp. 73-75
- [3] Y.C.Chung et al., IEEE Photonics Technology Letters, vol. 5, no. 2, 1993, pp. 186-189