

레이저 반사경의 비등방평광성과 주파수 당김효과에 의한 발전 주파수 편이 측정

MEASUREMENTS OF FREQUENCY SHIFT DUE TO POLARIZATION
ANISOTROPY AND FREQUENCY PULLING EFFECT

서호성 윤태현 최종윤
원종욱 정명세
(한국표준연구소)

요 약

633 nm He-Ne 레이저의 반사경의 비등방성에 의한 발전 주파수 편이 및 레이저 매질의 분산특성때문에 기인하는 레이저주파수 당김효과를 측정하였다. 내부 반사경형 레이저 공진기에서 발전하는 중모드사이의 맥놀이 신호를 RF-스펙트럼 분석기로 분석함으로써 90 kHz의 주파수 당김효과, 200 kHz의 레이저 반사경에 의한 주파수 편이양자를 측정하였다.

서 론

최근 개발된 초고분해능 레이저 분광학이나 레이저 냉각 기술은 광주파수 계측분야 특히 광주파수 표준 연구에 큰 변화를 주고 있다. 이들 연구를 위해서 파장가변 색소레이저는 필수적인 도구로 사용되고 있다. 색소레이저의 발전선폭을 줄이거나 [2] 광주파수와 마이크로파의 연결연구[3], 광주파수차 측정연구[4] 등에 고안정기준공진기가 사용되고 있다.

본 연구는 기준 공진기의 주파수특성을 살펴보기 위해서 상용 He-Ne 레이저를 사용하여 반사경의 비등방 편광성에 의한 주파수 편이 및 레이저 매질의 분산특성 때문에 나타나는 발전주파수당김 효과를 아울러 조사 하였다.

비등방 편광성과 주파수당김효과

43 cm 정도의 공진기 길이를 갖는 내부반사경형 He-Ne 레이저 (파장 633 nm)는 보통 3개 또는 4개의 중모드 발전을 하게 된다. 또 이들 중모드들은 인접하여 서로 수직되는 편광 방향을 갖게 되어 공진기 길이가 변하더라도 이 편광방향은 변하지 않는다. 만일 반사경이 비등방 편광성 (polarization anisotropy)를 갖는다고 하면 레이저발전모드가 반사경 위상지연이 달라진다. 이 때문에 레이저 발전모드의 편광방향에 따라 발전 주파수 편이가 생길 수 있다. 또 발전 모드가 매질의 이득곡선의 중심에서 발전할 하지 않을 경우에 매질의 분산특성때문에 주파수 당김효과가 나타나게 되고 이 주파수 당김효과가 나타나게 되고 이 주파수 당김효과는 매질의 susceptibility의 실수부 $\chi'(\nu)$ 에 비례하게 된다.[5] 만일 수동 공진기에서 3개의 중모드 발전주파수를 ν_{q-1} , ν_q , ν_{q+1} [$\nu_{q+i} = (c/2nL) \cdot (q+i)$]라고 하면, 레이저 매질이 등 분산공진기에서의 발전 주파수는 각각 ν_{q-1} , ν_q , ν_{q+1} 가 되고 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\nu_{q+1} \approx \nu_{q+1} [1 - \chi'(\nu_{q+1}/2n)], \quad (i = -1, 0, +1) \quad (1)$$

레이저 반사경 위상지연에 의한 주파수편이 $\Delta\nu$ 를 모드의 편광방향과 함께 고려하면 (1)식은 다음과 같이 된다.

$$\nu'_{q+i}(\pm) \approx \nu_{q+i} [1 - \chi'(\nu_{q+i}/2n)] + \Delta\nu \quad (2)$$

$$\nu'_{q+i}(11) \approx \nu_{q+i} [1 - \chi'(\nu_{q+i}/2n)] - \Delta\nu \quad (3)$$

여기서 (±)와 (11)는 각 모드의 편광방향을 나타낸다. 그러면 이들 사이의 맥놀이가 주파수는 다음과 같이 표현 될수 있다.

$$\Delta\nu_{q1}(\pm, 11) = \nu'_{q1}(\pm) - \nu'_{q1}(11) \\ = (c/2nL) - 2\Delta\nu - \nu_q [\chi'(\nu_q) - \chi'(\nu_{q-1})/2n] \quad (4)$$

$$\Delta\nu_{q1}(11, \pm) = \nu'_{q+1}(11) - \nu'_{q1}(\pm) \\ = (c/2nL) + 2\Delta\nu - \nu_q [\chi'(\nu_{q+1}) - \chi'(\nu_q)/2n] \quad (5)$$

그러면 (4)식과 (5)식의 차 는

$$\Delta = \Delta\nu_{q+1}(11, \pm) - \Delta\nu_{q1}(\pm, 11) \\ = 4\Delta\nu - \nu_q [\chi'(\nu_{q+1}) - \chi'(\nu_q)/2n] \quad (6)$$

이 된다.

즉 2개의 맥놀이 신호 ((4), (5)식은 각각 그 주파수)는 $4\Delta\nu$ 만큼 떨어져 있는 DC-term과 $[\chi'(\nu_{q+1}) - \chi'(\nu_q)/2n]$ 만큼 떨어져 있는 진동 term 공진기 길이가 변화에 따라 χ' 는 변할수 있으므로 나누어 생각할 수 있다.

즉, $\chi'(\nu)$ 는 기함수이므로 주파수 평균한 $\chi'(\nu)$ 나 $[\chi'(\nu_{q+1}) - \chi'(\nu_{q-1})]$ 는 0이되므로 2차 맥놀이 신호 주파수 ν 의 주파수 평균값은 $4\Delta\nu$ 가 됨을 알 수 있으며, 진동 term $\nu_q [\chi'(\nu_{q+1}) - \chi'(\nu_{q-1})/2n]$ 은 $\nu_{q+1} - \nu_{q-1} = 2(c/2nL)$ 이므로 $\chi'(\nu)$ 가 $2 \cdot (c/2nL)$ 떨어져 있는 두 함수가 over-lap된 것으로 간주될 수 있다.

2차 맥놀이 신호주파수 ν 의 DC term $4\Delta\nu$ 는 반사경의 비등방 편광성때문에 생긴 위상지연의 차에 기인하므로 수직, 수평편광된 발전모드의 반사위상차 δ 는

$$\delta = [2(\Delta\nu)/\text{FSR}] \times (2\pi) \quad (7)$$

과 같이 된다. 여기서 FSR(Free Spectral Range)는 $(c/2nL)$ 로써 본실험에서 $L = 432$ mm이므로 347 MHz 정도의 값이다.

실 험

Fig. 1은 측정장치도표 나타낸 그림이다. 상용 He-Ne레이저 (Melles Griot 05-LHR)의 광스펙트럼이 그림속에 보이는데 3개의 종모드열에 TEM₀₁ mode가 추가로 더 발전하고 있음을 알 수 있다.

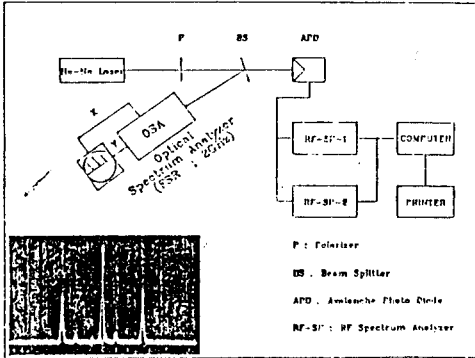


Fig. 1 Experimental setup for the measurement of the laser power spectrum.

Fig. 2는 RF-스펙트럼 분석기(HP8566B)이 나타낸 레이저 출력스펙트럼이다. 874 MHz의 신호는 v_{q+1} 과 v_{q-1} 모드 간의 맥놀이 신호이고 437 MHz의 신호가 인접하는 모드간의 맥놀이 신호이고 이외에 신호는 횡모드 때문에 생기는 맥놀이 신호로 판단된다.

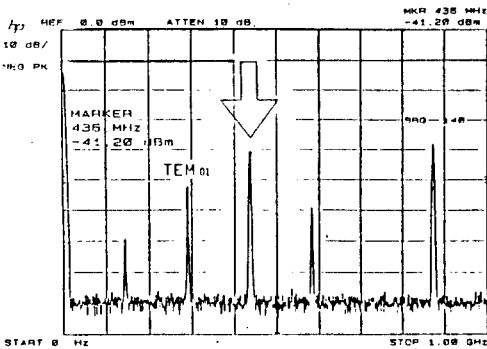


Fig. 2 Laser power spectrum of an internal mirror He-Ne laser of 43.2 cm cavity length on a RF-spectrum analyzer.

Fig. 2에 나타난 437 MHz 맥놀이 신호를 확대해 본 스펙트럼을 Fig. 3에 나타내었다. 즉, 2개의 신호로 분리되어 있는 것을 알 수 있다.

이 두개의 맥놀이 신호주파수는 레이저공진기 길이가 열변형에 의해 팽창(또는 수축)할 경우에 변위하게 되고 이 두신호사이의 2차 맥놀이 신호를 나타낸 그림을 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4에 나타난 2차 맥놀이 신호도 공진기의 길이 변화에 따라 변화하는데 그 변화되는 주파수를 측정한 그림을 Fig. 5에 나타내었다.

측정법은 다음과 같다. Fig. 4의 2차 맥놀이 신호에 RF-스펙트럼분석기의 signal tracking mode를 이용하여 자동신호추적을 한후 컴퓨터로 그 중심주파수를 받아서 plotter에 기록하였다. Fig. 5에서 우리는 2개의 다른 형의 곡선이 연속적으로 반복되고 있음을 볼수

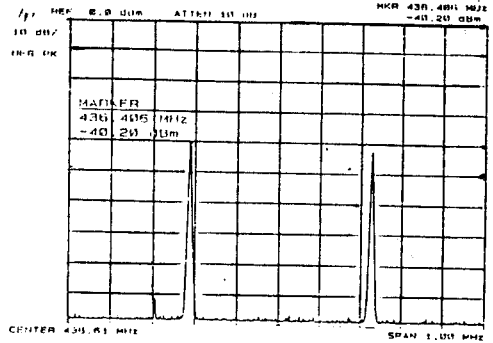


Fig. 3 The expanded spectrum of the beat signal near 437 MHz.

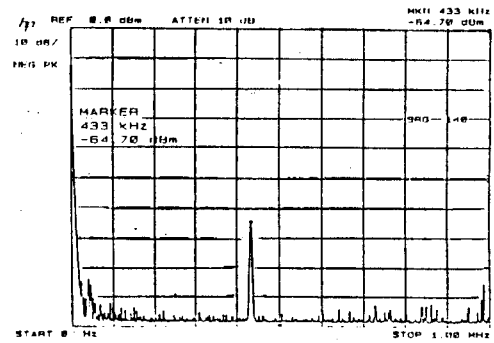


Fig. 4 The spectrum of the secondary beat between the two beat frequencies.

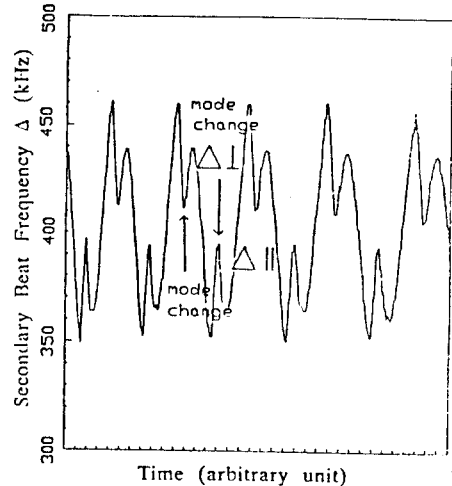


Fig. 5 The time variance of the secondary beat frequency.

있는데 각각 $\Delta(\pm) = \Delta v_{q+1}(11, \pm) - \Delta v_{q-1}(\pm, 11)$ 과 $\Delta(11) = \Delta v_{q+1}(\pm, 11) - \Delta v_{q-1}(11, \pm)$ 이 그것이다. 즉 $\frac{c}{2nL}$ 이 437 MHz가 변위에 따라 새로운 종모드가 생기게 되고 2차 맥놀이 주파수는 새로운 편광을 유지하는 모드간의 맥놀이 신호가 되므로 그림과 같이 2개의 다른 곡선형으로 나타내게 된다. 또 이 곡선은

레이저 매질의 분산곡선의 차함수로 나타나는 것을 알 수 있다. 실험에서 측정된 값 (Fig. 5)으로 부터, $\Delta\nu \approx 400$ kHz이며 최대주파수 당김효과는 100 kHz 정도임을 알 수 있다. (7)식을 이용하여 반사경의 위상지연의 차 δ 에 의한 값을 계산해 보면

$$\delta \approx 2.9 \times 10^{-3} \text{ rad. 가 됨을 알 수 있다.}$$

결 론

본 실험에서 우리는 레이저반사경의 비등방편광성 때문에 편광방향이 서로 수직인 모드의 발진주파수는 200 kHz 정도 차이가 나게 됨을 알게 되었고 되고 또 매질의 분산특성 때문에 생기는 주파수당김효과를 측정하였다. 낮은 이득을 갖는 매질에서의 분산특성 또는 주파수 당김 효과를 측정하려면 그 정밀도가 10^{10} 이상의 단일모드 고안정화 레이저가 필요하나 본 실험에서는 종모드 사이의 맥놀이 신호를 분석함으로써 쉽게 그것들을 측정할 수가 있었다. 또 2차 맥놀이 신호주파수의 변화곡선은 다중종모드 발진레이저의 주파수안정화를 위한 주파수분별곡선을 이용할 경우 무변조 안정화 레이저개발을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] J. Helmcke, A. Morinaga, J. Ishikawa, and F. Riehle, "Optical Frequency standards", *IEEE Trans. on Inst. and Meas.*, Vol. 38, NO.2, 524 (1989)
- [2] J. Hough, D. Hills, M. D. Rayman, L. S. Ma, L. Hollberg, and J. Hall, "Dye laser frequency stabilization using optical resonators", *Appl. Opt.*, Vol. 21, 1686 (1982)
- [3] R. G. DeVoe and R. G. Brewer, "Laser frequency division and stabilization", *Phys. Rev. A*, 37, 1082 (1988)
- [4] R. G. DeVoe, C. Fabre, K. Jungmann, J. Hoffnagle, and R. G. Brewer, "Precision optical frequency difference measurement", *Phys. Rev. A*, 37, 1802 (1988)
- [5] A. E. Sigman, *Lasers*, Oxford, Oxford University Press, 1986 Ch. 12, pp.466-472. or A. Yariv, *Optical Electronics*, New York, Holt-Saunders international Ed., 1985, Ch. 6, pp. 153-154