

주파수 변조 분광학 연구

Study on Frequency Modulation Spectroscopy

서 호 성

한국표준연구소 레이저연구실

류 갑 열

서강 대학교 물리학과

최근 레이저 분광학에 있어서 고감도 분광법으로 알려져 있는 주파수 변조 분광법 (frequency modulation spectroscopy)과 레이저 광 주파수 안정화 응용에 대한 원리와 특징을 살펴본다. 또 super-cavity을 이용한 단일모드 He-Ne 레이저를 사용하여 FM 분광신호를 검출하고 그 신호특성에 대하여 기술하였다.

1. 서 론

1960년 처음 레이저가 개발되자, 각국 Metrology 에 종사하는 연구진 들에게 큰 관심을 불러 일으켰다. 특히, 간섭계측을 중요시하던 길이표준 및 길이 측정 분야의 연구 그룹들은 레이저의 직진성, 고휘도 및 가간섭성에 매료되었다. 당시 길이의 표준으로 사용하고 있던 ^{86}Kr -표준선의 복사선폭 $\Delta \sigma \approx 1.3 \text{ m}^{-1}$ ($\sim 1 \text{ GHz}$)의 값을 가지고 있었으므로 가간섭 길이 또한 1 m 를 넘지 못했다.[1,2] 이에 비하여 He-Ne 레이저의 발진 선폭은 이론적으로 1 mHz로 계산되나[3] 실제로는 큰 열잡음 때문에 발진 주파수가 흔들려서 기계적, 온도적, 음향적으로 안정된 분위기에 두고 두 레이저의 beat 주파수를 측정할 경우, 단기주파수 변동은 20 Hz 정도임이 알려졌다.[4] 그러나 보통의 경우에는 이 값보다 10^3 배 이상 큰 값으로 나타난다. ($\delta \nu \approx 0.001 \text{ m}^{-1}$, 수십 kHz) 더구나 공진기의 열팽창에 의한

길이 변화나 굴절률의 변화 때문에 레이저의 발진 주파수의 중심 주파수의 변동이 생기고 이때문에 정확한 간섭 광원으로 사용할 수 없었다. 그러므로 레이저 주파수 변동을 양자잡음 한계까지 줄이기 위하여 다른 안정화된 주파수 기준과 변동하고 있는 레이저 주파수와 비교하여 오차신호를 검출하고 이 오차신호가 최소화 되도록 전기적 귀환회로를 이용하여 공진기의 광학적 길이를 자동제어 해야된다. 현재 광주파수 표준으로는, 옥소분자($^{127}\text{I}_2$)의 초미세 구조의 포화 흡수선을 기준으로하여 레이저의 주파수를 안정화한 레이저를 사용하고있다.[5] 이들 광주파수 표준의 주파수 안정화 레이저는 Doppler-free 분광법 중 하나인 포화 흡수 분광법을 이용하여 안정화하고 있다. 그러나, 이들 레이저의 주파수 안정도는 Square root Allan variance로 $10^{-12} \sim 10^{-13}$ 이 그 한계이며[6] 안정화

레이저의 주파수 폭도 넓고(수MHz), 변조지수가 크기(수천이상)때문에 레이저 선평이 확대된다.[7] 이와 같은 문제점을 보완하여 최근 레이저의 주파수 변동폭을 1 Hz 이하 까지 내리는 것이 가능하였다.(이를 위상 안정화 레이저라 한다.[8]) FM 측대파법(optical heterodyne 법 이라고 부르기도 함)에 의해 그것이 가능하게 되었다. 이 FM 측대파법의 원리는 처음 micro-wave의 주파수 안정화나 NMR의 연구에 사용되었으나[9] 광주파수 영역에 사용된것은 1981년 Bjorklund 와 Levenson 에 의해 고감도 분광법으로써 사용되었던 것이 처음이다.[10] 이와 동시에 Drever 등에 의해 파장가변 레이저를 고 피네스(Finesse) 파브리페롯(Fabry-Perot) 에탈론(etalon)을 기준으로 한 주파수 안정화 기술이 개발되었는데[11] 이 방법은 레이저주파수 변동을 검출기의 shot noise 수준까지 줄일 수 있는 우수한 방법이다.[12] 이 FM 측대파법을 사용한 주파수 안정화 색소 레이저는 초고분해 분광연구나[13] 차세대의 광주파수 표준기 개발[14]등에 응용되고 같은방법으로 안정화된 Ar⁺ 레이저는 중력파 검출 연구[15] 반도체 레이저의 2차 고조파 발생과 파장 안정화 연구[16] 등 많은 분야에 그 활용이 넓혀지고있다. 본 논문에서는 FM 측대파법에 대한 해설과 함께 FM분광 특성의 연구 결과를 기술하였다.

2 FM 분광법의 원리

그림 1은 주파수 변조 분광학의 대표적인 실험장치를 나타낸 개략도이다. 단일모드 레이저 주파수를 위상변조기를 이용하여 위상변조하여 전기장 E₁(t)와 E₂(t)를 얻는다. 위상변조된 전기장 E₂(t)는 표본의 강도흡수 및 위상 특성(그림 2는 주파수영역에서 표본의 흡수 및 위상 특성과 위상 변조된 field E₂(t)를 나타내었다)에 따라 E₃(t)로 바뀌고 이 전기장 E₃(t)

를 고속응답 광검출기가 전류신호 s(t)로 변환한 후 위상민감 검출(phase sensitive detection)을 한다. 위상민감 검출을 위해서는 phase shifter와 DBM(double balance mixer) 및 적분기로 장치를 구성하고 mixer의 기준신호는 위상변조를 위한 RF 신호를 그대로 사용한다. 위상 변조된 전기장 E₂(t)를 Bessel 함

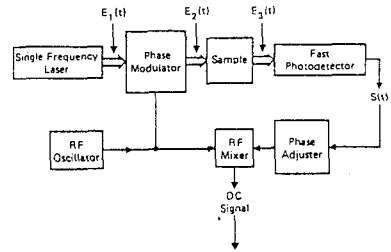


그림 1 A typical experimental arrangement for FM spectroscopy

수 전개하여, 위상 변조할 때에 변조지수 M을 < 1 이 되도록 하면, 위상변조된 E₂(t)는 2차 이상의 고차 측대파를 무시할 수 있다.

$$E_2(t) \approx E_0 \left\{ -\frac{M}{2} \exp[i(\omega_c - \omega_m)t] + \exp[i\omega_c t] + \frac{M}{2} \exp[i(\omega_c + \omega_m)t] \right\} \quad (1)$$

여기서 ω_c 는 레이저 광주파수 ω_m 은 변조주파수를 나타낸다. 또 E₀는 변조가 되기전의 전기장의 세기를 나타낸다. 한편, 이 광이 그림 2와 같이 좁은 흡수특성을 갖는 표본을 통과하면 투과된 전기장 E₃(t)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

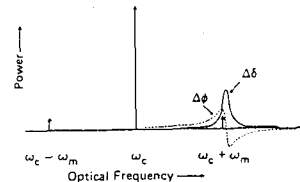


그림 2 Frequency domain illustration of FM spectroscopy

$$E_3(t) \approx E_0 \left\{ -T_{-1} \frac{M}{2} \exp[i(\omega_c - \omega_m)t] + T_0 \exp(i\omega_c t) + T_1 \frac{M}{2} \exp[i(\omega_c + \omega_m)t] \right\} \quad (2)$$

여기서 표본의 투과특성을 T_j 라 하면

$$T_j = \exp(-\delta_j - i\varphi_j) \quad (3)$$

표시할 수 있고 j 는 0, ± 1 로 나타낼 수 있다. 이것은 각각 ω_c , $\omega_c \pm \omega_m$ 에 대한 기호를 나타낸다. 식(3)에서 δ_j 는 표본의 진폭감쇠를 나타내고, φ_j 는 위상지연을 나타낸다. 이 투과 전기장이 광검출기에 검출될때의 광 강도 $I_3(t)$ 는

$$I_3 = c |E_3(t)|^2 / 8\pi \quad (4)$$

로 주어지고 $M^2, |\delta_0 - \delta_{01}|, |\delta_0 - \delta_{-11}|, |\varphi_0 - \varphi_{-11}|$, 및 $|\varphi_0 - \varphi_{-1}|$ 은 모두 < 1 라고 가정해서 I_3 를 계산하면

$$I_3(t) \approx \frac{CE_0^2}{8\pi} \exp(-2\delta_0) [1 + (\delta_{-1} - \delta_1) M \cos \omega_m t + (\varphi_1 + \varphi_{-1} - 2\varphi_0) M \sin \omega_m t] \quad (5)$$

가 된다. 만일, $(\delta_{-1} - \delta_1) \approx 0$, $(\varphi_1 + \varphi_{-1} - 2\varphi_0) \approx 0$ 이면 (5)식의 $I_3(t)$ 는 변조주파수 ω_m 의 rf 신호와의 비트 신호를 갖는다. 즉, 그림 1과 같이 synchronous detection 법에 의하여 진폭 $(\delta_{-1} - \delta_1)M$ 과 $(\varphi_1 + \varphi_{-1} - 2\varphi_0)M$ 을 측정할 수 있다. 이때, $\omega_m < \Delta\Omega/2$ 일 때에는 (여기서, $\Delta\Omega$ 를 표본의 흡수곡선의 full width half maximum (FWHM)) quadrature 신호 진폭은 표본 흡수곡선의 미분에 비례하고 in-phase 신호 진폭은 $(\varphi_1 - \varphi_0) - (\varphi_0 - \varphi_{-1})$ 로 표현되므로 분산곡선의 2차 미분에 비례하게 된다. 그러나 $\omega_m > \Delta\Omega/2$ 경우에는 quadrature 신호는 +1차 측대파에 의한 흡수곡선과 -1차 측대파에 의한 흡수곡선의 차이가 된다. 레이저 주파수를 시간축으로 주사해 보면 quadrature 신호와 in-phase 신호는 각각 흡수곡선의 차이 $(\delta_{-1} - \delta_1)$ 와 위상 편이들의 차이 $(\varphi_1 + \varphi_{-1} - 2\varphi_0)$ 로 시분해 됨을 알 수 있다. 주파수 변조 분광 신호의 모양을 살펴 보기 위해서 표본의 흡수곡선이

Lorentzian이라고 가정하면 흡수곡선 $\delta(\omega)$ 와 분산곡선 $\varphi(\omega)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta(\omega) = \delta_{peak} \frac{1}{R^2(\omega) + 1} \quad (6)$$

$$\varphi(\omega) = \varphi_{peak} \frac{R(\omega)}{R^2(\omega) + 1} \quad (7)$$

여기서 $R(\omega)$ 는 규격화된 주파수를 나타낸 것인데

$$R(\omega) = \frac{\omega - \Omega}{(\Delta\Omega/2)} \quad (8)$$

이다. 이론적인 FM 분광신호를 계산해 보기 위하여 표본을 피네스가 40,000, $\Delta\Omega = 150$ kHz, FSR = 6 GHz 인 super-cavity로 가정하여 cavity에 반사된 광을 이용한 주파수 변조 신호를 보기로 한다. $\omega_m/\Delta\Omega = 10$ 으로 가정하고 (6), (7) 및 (8) 식을 이용하여 두 주파수 변조분광신호인 $\sin\omega_m t$ 와 $\cos\omega_m t$ 의 계수를 계산한다. 여기서는 $\omega_m = 1.5$ MHz, $\Delta\Omega = 150$ kHz, $M = 0.73$ 으로 하여 계산한 것을 그림3에 각각 나타내었다.

그림 3의 a)는 변조지수(Modulation index) $M = 0.73$, 변조주파수 1.5 MHz로 레이저 광을 위상변조를 하여 $\Delta\Omega = 150$ kHz인 super-cavity를 투과할 때 simulation 된 레이저스펙트럼을 나타내었다. b)는 super-cavity에서 반사한 광의 스펙트럼을 나타내었다. c)는 in-phase 주파수 변조분광신호를 나타내었고 d)는 quadrature 주파수 변조분광신호를 각각 나타내었다. 주파수 변조분광신호의 벡터진폭으로 나타나는 계수(Modulus)를 e)에 나타내었고 두 주파수 변조분광신호를 각각 x축과 y축으로 하여 Lissajous figure를 그린 것 즉, 주파수 변조 신호의 벡터궤적을 (f)에 나타내었다. 여기서 in-phase 주파수 변조분광신호 진폭을 $Y(\omega)$, quadrature 주파수 변조분광신호 진폭을 $X(\omega)$ 라고 하면 벡터진폭 계수는 $r = (X^2 + Y^2)^{1/2}$ 으로 주어지고 Lissajous figure는 극좌표로 $Y(\omega)$ 표현된 주파수 변조분광신호벡터 $r = r(\theta)$ 가 된다. 여기서 θ 는 $\tan^{-1} [Y(\omega)/X(\omega)]$ 로 표현 된다.

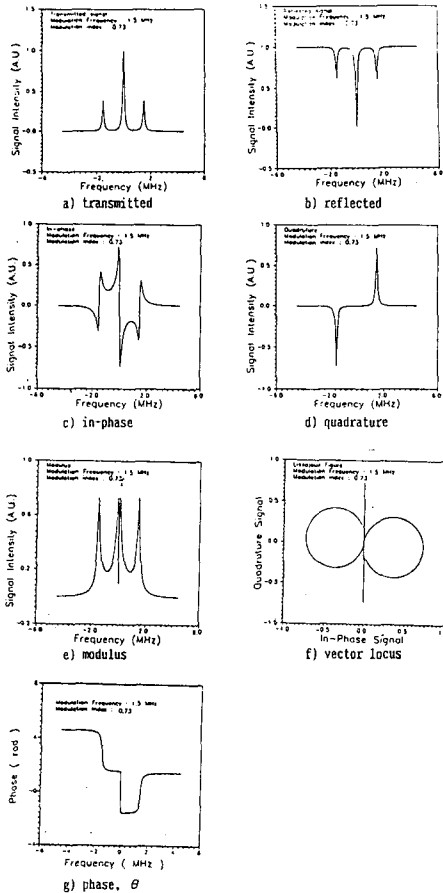


그림 3 Theoretically calculated FM signals

θ 로 $X(\omega)$ 표현되는 곡선을 계산한 것은 g)에 나타나 있다. g)에서는 $0 \sim 2\pi$ 에 모든 부분에 θ 가 존재하므로 주파수 변조 신호의 벡터궤적(그림 3의 (f))은 1, 2, 3, 4 상한 모두 존재함을 뜻한다. 한편 in-phase 와 quadrature의 두 주파수 변조 신호로부터 FM변조신호의 크기인 Modulus(ref.3 의 그림3(e)) 측정법에 대해서는 Bjorklund가 기술하고 있으나 아직 측정한 예가 없다. modulus 측정을 위해서는 signal tracking mode 가 가능한 rf-spectrum analyzer를 이용하거나 signal multiplier에 의해 측정이 가능하나 tracking 속도에 제한을 받거나 또 다른 signal processor가 필요하기 때문에 번거로우므로 두 FM신호를 이용한 Lissajous figure를 측정하므로써 modulus

정보 뿐 만 아니라 아울러 위상 정보도 알 수 있다. 그림 4와 5는 modulus 와 Lissajous 가 동등한 것임을 설명한 그림이다. 레이저 주파수가 그림 4의 a)의 좌측 F에서 출발해서 F→A'→A→A''→E→B→F→C→G→D''→D→D'→F로 이동해 갈때 그림 5의 modulus와 Lissajous 상의 이에 상응하는 point를 그림에 각각 나타내었다. 이것으로부터 Lissajous 상의 각 point를 $r(\theta)$ 라고 하면 이 $|r(\theta)|$ 는 modulus의 상응점의 높이가 되고 θ 는 modulus 상에는 나타나지 않는

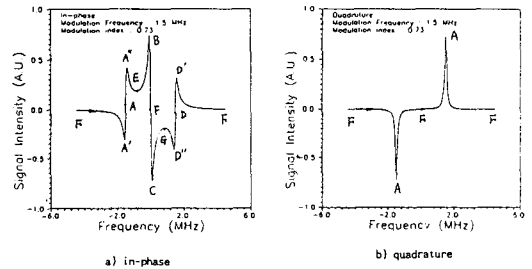


그림 4 Two FM signals

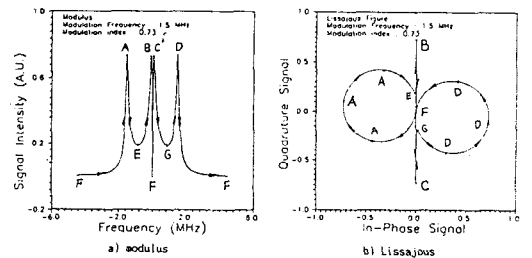


그림 5 Modulus and Lissajous of FM signals

phase가 되어 in-phase 신호크기($I=Y(\omega)$)와 quadrature($Q=X(\omega)$) 신호크기 비로부터

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{I}{Q} \right)$$

값이 됨을 알 수 있다. 그러므로 modulus보다 Lissajous로부터 우리는 두 주파수 변조 신호사이의 phase(θ)에 관한 정보도 얻을 수 있음을 나타내 준다. 또, 이 phase와 Lissajous 모양에 의해 super cavity의 투과곡선의 형태를 알 수 있다. 한편, 두 주파수 변조 신호의 Lissajous figure는 lock-in amplifier의 기준신호의 위상에 따라 같은 각도로 회

전함을 볼 수 있다. 이와같은 방법으로 계산된 Lissajous figure는 그림 6에 나타내었다. 그림 6 a) b) c) d) e) 각각 기준신호의 위상지연 0° , 22.5° , 45° , 67.5° , 90° 일때 Lissajous figure 이다.

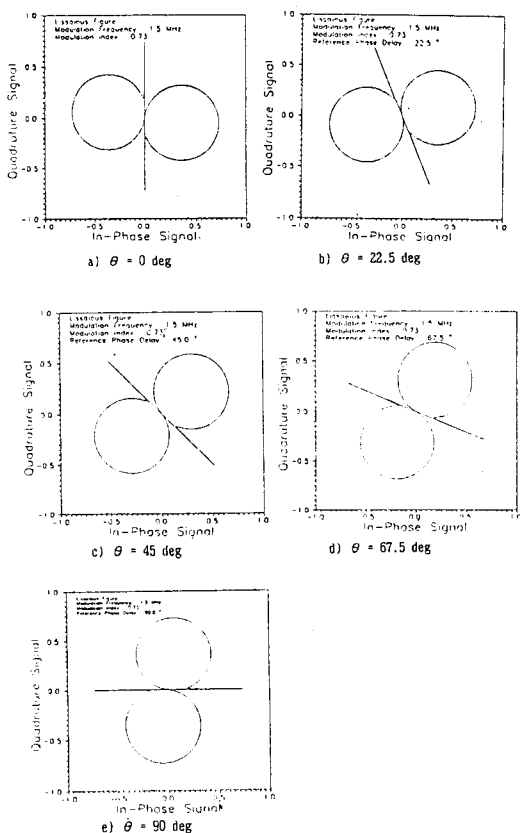


그림 6 Measured vector locus of FM signal

3. FM 분광 신호의 S/N 비

일반적으로 저주파 변조인 경우에 신호중에 잡음은 주로 레이저 진폭에 기인한다. 레이저 잡음은 고주파영역에서는 작아져서 수 MHz 이상에서는 아주 작아진다. 분광 광원으로 사용되고 있는 색소 레이저에는 색소 제트의 표면변동이나 압력변동에 기인하는 고주파잡음, 펄핑 광원인 아르곤이온 레이저의 방전 플라즈마 진동에 의한 잡음이나 이 레이저의 공진기내부

종모드 및 횡모드 beat에 의한 고유 잡음이 있다. 이 색소 레이저의 경우 2 MHz 이상에서는 검출기의 shot 잡음에 도달하게 되는 데, 이와같은 색소 레이저 잡음의 예를 그림 7에 나타내었다.

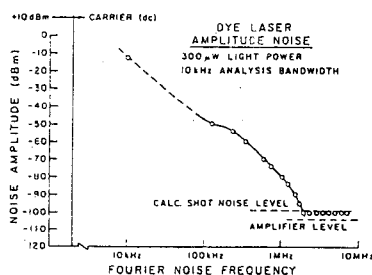


그림 7. Noise spectrum of the dye laser

1 kHz의 저주파에서의 잡음은 shot 잡음의 80 dB 이상이다. 그러므로 고감도 검출을 위해서는 수 MHz 이상의 FM 측대파법을 사용하는 것이 유리하다. 검출기를 photodiode를 사용할 경우를 고려해 보면 다음과 같이 기술 할 수 있다. photodiode에 검출되는 광전류에 관한 식(5)에서 $\cos \omega_m t$ 성분에 의해 생성되는 전류의 rms power 는, $\Delta \delta$ 를 Background noise 와 신호 흡수의 변화분이라 하면

$$\overline{i_n^2} = \frac{1}{2} g^2 e^2 \eta^2 \left(\frac{P_0}{h\nu_c} \right)^2 \Delta \delta^2 M^2 \quad (9)$$

으로 주어진다. 여기서 레이저 출력은 $P_0 = ACE_0^2 / 8\pi$ 이고 η 는 detector의 양자 효율, g 는 gain 이다. 단일 모드 레이저의 대표적인 noise 특성인 $1/f$ noise가 rf-주파수에서는 noise power가 약해지고 검출기의 thermal noise 와 shot noise에 의해 생성되는 noise current가 rms noise power를 생성하게 된다. 이때

rms noise power $\overline{i_n^2}$ 는

$$\overline{i_n^2} = \overline{i_{sn}^2} + \overline{i_{th}^2} \quad (10)$$

가 되고 shot noise power $\overline{i_{sn}^2}$, thermal noise power $\overline{i_{th}^2}$ 는 각각

$$\overline{i_{sn}^2} = 2 e g \bar{i} \Delta f = 2 g^2 e^2 \eta \frac{P_0}{h\nu_c} \Delta f \quad (11)$$

$$\overline{i_{th}^2} = \frac{4\kappa T}{R} \Delta f \quad (12)$$

가 된다. 여기서 Δf 는 detector 및 증폭기의 band width이고 κ Boltzman 상수이며, T는 절대온도이고, R은 detector system의 input impedance 이다. 이값을 이용하여 S/N 비를 계산해보면

$$\begin{aligned} \frac{S}{N} &= \frac{\overline{i_s^2}}{\overline{i_n^2}} \\ &= \frac{(1/2) g^2 e^2 \eta^2 (P_0/h\omega_c)^2 \Delta \delta^2 M^2}{2 g^2 e^2 \eta (P_0/h\omega_c) \Delta f + (4\kappa T/R) \Delta f} \quad (13) \end{aligned}$$

이 된다. (13)식에서 laser power P_0 가 커지거나 Modulation index M 이 커지거나 Δf 가 작아짐에 따라서 S/N가 커지는 것을 알 수 있다. 만일 $P_0 \geq P_{0(min)} = 2\kappa T h \omega_c / \eta g^2 e^2 R$ 경우에는 shot noise 를 무시하고 계산할 수 있다. 보통의 photomultiplier의 경우에 대하여 계산해보면 $h\omega_c = 3 \times 10^{-19} J$, $\eta = 0.1$, $g = 10^5$, $R = 50 \Omega$, $T = 300 K$ 일때 $P_{0(min)} = 2 \times 10^{-12} W$ 가 된다. photodiode 의 경우에는 η 와 g 가 1 에 가까우므로 $P_{0(min)} = 2 \times 10^{-3} W$ 가 된다. 이와 같이 $P_0 \geq P_{0(min)}$ 경우에 S/N 비는

$$\frac{S}{N} = \frac{\eta (P_0/h\omega_c) \Delta \delta^2 M^2}{4 \Delta f} \quad (14)$$

가 된다. 최소 흡수량 $\Delta \delta$ 을 S/N비가 1 일때로 가정하면,

$$\Delta \delta_{min} = 2 [\eta M^2 (P_0/h\omega_c) \tau]^{-1/2} \quad (15)$$

여기서 $\tau = 1/\Delta f$ 로 적분시간을 나타낸다. 만일 $\eta = 1$, $P = 5 mW$, $M = 0.1$ 로 가정하면 $\tau = 1 s$ 일때 $\Delta \delta_{min} = 1.5 \times 10^{-7}$ 가 되고, $\tau = 10^{-7} s$ 일때 $\Delta \delta_{min} = 0.0005$ 가 된다. 이상과 같이 FM 측대파법을 사용하면 고감도의 고속 신호검출이 가능하다.

4. FM 분광법의 특징

FM 측대파법을 이용한 레이저 주파수 안정화법

이 사용되기 이 전에 PTB의 Helmcke등은 고 피네스 파브리 페롯 에탈론을 주파수 기준으로 하여 투과곡선의 경사의 중간지점에 색소 레이저의 주파수를 안정화하는 방법을 사용하였다.[17] 안정화된 색소 레이저 선포를 1 kHz 까지 축소화시킬 수 있었으나 공진기내의 광의 장이 축적되는 시간 즉 공진선포 (FWHM) $\delta \nu_c$ 에 의해 제어 대역폭 B가 제한되는 문제점 때문에 제어 대역폭을 넓게 하기 위해서는 $\delta \nu_c$ 를 넓게 할 필요가 있다. 또 이때 기준공진기는 완전한 공진부과 특성을 나타내고 대역폭이 넓어 짐으로 해서 shot noise 가 커져서 좁은 레이저 발진선포를 얻기 힘들다. shot noise에 의해 제한되는 레이저선포 $\delta \nu_c$ 은 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$\delta \nu = \delta \nu_c \left(\frac{h\nu B}{\rho T \eta} \right)^{1/2} \quad (16)$$

여기서 P는 공진기에 입사하는 레이저 출력, T는 공진할때 최대 부과율 이다. 예를 들어 보면 $\delta \nu_c = 2 MHz$, $P = 0.15 mW$, $T = 0.2$, $\eta = 1$, $\nu = 5 \times 10^{14}$, $B = 1 MHz$ 라고 가정하면 $\delta \nu$ 는 100 Hz가 된다. 이식은, 동일한 제어 대역폭을 가정할 경우에, 공진기의 선포가 좁을수록 레이저의 발진선포를 줄일 수 있음을 말해준다. FM 분광법을 이용한 안정화법은 공진기의 투과곡선의 꼭지점에 레이저 주파수를 안정화하는 법이다. 또 공진기에서 반사하는 레이저광을 이용하기 때문에 공진기의 축적 시간보다 빨리 변동하는 레이저의 위상비교를 행하므로써 고속 제어가 가능하다. 이 때문에 제어 대역폭을 공진 선포보다 넓게 하는 것이 가능하다. 앞에서 든 예와 같이 $\delta \nu = 1 kHz$ 로 하여 레이저 선포를 1 Hz 까지 얻을 수 있다. FM 분광법을 이용한 레이저 주파수 안정화법 (Pound-Drever 법)을 그림에 나타내었다.[2]

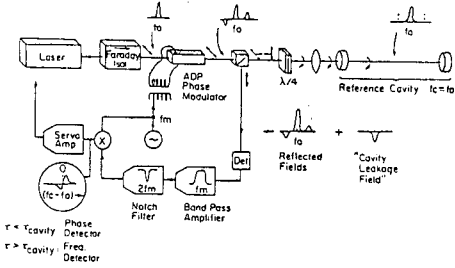


그림 8 Pound-Drever 안정화 법

레이저 광은 전기 광학 소자로 된 위상 변조기에서 위상 변조되고 편광 광속 분할기와 $\lambda/4$ 판을 통과하여 기준 공진기에 입사한다. 공진기에서 반사한 레이저 광은 $\lambda/4$ 판을 통과하여 편광 방향이 90도 회전하여 편광 광속 분할기에서 반사되어 고속 검출기에 입사되어 검출된다. 이때 위상변조 주파수와 같은 성분을 검출하면 그림3의 (c)와 같은 분산형 신호를 얻을 수 있다. 이 곡선을 레이저 주파수 분별곡선으로 이용하면, 공진곡선의 꼭지점에서 분별신호의 크기가 0 이므로 공진곡선 꼭지점에 레이저 주파수를 안정화할 수 있다. 또 반사광은 공진기의 입사 반사경으로부터 직접 반사된 장과 공진기 내에 축적된 광장이 누설되어 나오는 장과 합성이 된다. 축적 시간 보다 짧은 시간에 주파수 변동이 생길 경우에 변화된 직접 반사광의 위상은 그 때까지 공진기내에 축적된 평균 광장의 위상과 비교된다. 그러므로 이 위상차는 검출되는 순간적인 주파수 변동에 따라 나타나게 되고 이것을 이용하여 제어한다. 이것이 FM 분광법을 이용하여 주파수 안정화 할 때의 큰 장점이 된다. 또 다른 하나의 장점은 제어신호(주파수 분별곡선)의 모양인데 분산형인 경우 레이저의 주파수가 기준 공진기의 중심 주파수로 부터 변조 주파수 ω_m 까지 같은 부호의 신호를 갖고 있으며, 제어신호가 odd 함수 이므로 주파수 제어가능 폭이 $\nu \pm \omega_m/2\pi$ 인 넓은 폭을 갖고 있다는 것을 말한다. 즉 레이저 주파수가 free-running 상태에서 공진기 근방 $\pm \omega_m/2\pi$ 이내에서 만 있어도 안정화가 가능하다.

5. Super cavity를 이용한 FM분광 실험

최근 ring laser gyro의 고 반사율 레이저 반사경 제작기술이 상용화 되어 고피네스의 super cavity optical spectrum analyzer가 시판되어[18] 기존의 파브리-페롯 optical spectrum analyzer의 분해능보다 100배 이상을 향상시켰다.[19] 본 실험 상용의 super cavity 공진기론 이용하여 He-Ne laser를 사용한 FM분광실험을 검출하고 공진기의 투과 선평 측정 및 FM 신호특성을 조사하였다. 실험에 사용된 장치도를 그림 9에 나타내었다.

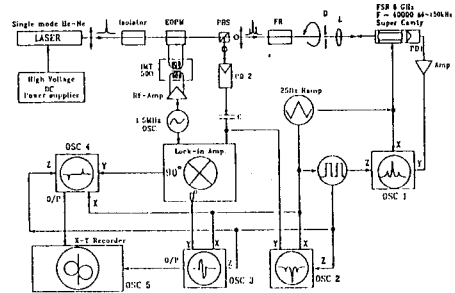


그림 9 Experimental Set-up

단일 모드 발진하는 He-Ne 레이저를 광원으로 하여 isolator에 입사시킨다. 수직 편광된 레이저 광은 Faraday rotator를 이용한 isolator를 통과하여 전기 광학 위상 변조기 (Electrooptic Phase Modulator, Gsanger社 LM-0202)를 통과하면, 위상 변조된다. 이때, rf 신호발생기(HP 8656B, 1.5 MHz)로부터 나온 rf 신호는 rf 증폭기 (rf-amplifier社, #110A)를 통하여 impedance matching용 resonance transformer(IMT, TDK社)의 고속 Ferrite core-K-6A를 이용하여 자체 제작)을 통하여 위상 변조기에 공급하였는데 이때 사용된 rf 출력은 0.2 Watt 정도이고 이는 변조지수M = 0.73에 해당하는 값이다. 위상 변조기를 통과한 수평 편광된 레이저 광은 편광 광속 분할기 PBS를 통과하여 FR (Faraday rotator)를 통과하면 원형 편광이 되고 다시, 조리개 ID를 통과하고 mode matching 렌즈 L을 통하여 피네스가 약 40,000, FSR (free spectral

range)가 6 GHz(이때 cavity의 분해능 $\Delta\Omega = 150$ kHz 이다)인 super-cavity로 입사되어 PD 1 에서 검출된다. 오실로스코프 1을 이용하여 그 투과된 스펙트럼을 관찰한다. 한편, cavity에서 반사된 원 편광된 레이저 광은 다시 FR를 통과하면 수직 선편광이 되어 편광 광속 분할기 PBS에서 반사되어 고속 광 검출기 PD 2 (여기서는 실리콘 avalanche photo diode 사용하였다)로 입사된다. 입사된 광신호는 검출기 PD 2 에서 전류신호로 바뀌어 콘덴서를 통과할 때 DC 신호는 cut-off 되고 ac 신호만 고속 lock-in amplifier (EG & G 5202)의 입력단과 오실로스코프 2에 입력된다. 또, lock-in amp.의 기준 신호로는 위상변조기에 사용된 rf 신호를 사용한다. Lock-in amp. 출력단에서는 기준 신호의 위상 지연에 의한 in-phase(0°) 신호와 quadrature 신호(90°)로 분리되어 오실로스코프를 이용하여 검출하였다. 또 이들 두 신호들 간의 Lissajous figure(주파수 변조 신호의 벡터궤적)를 보기 위해서 또 다른 1대의 오실로스코프 5를 이용하였다. 한편, 25 Hz ramp 신호발생기로 super-cavity의 길이를 주사하고, 또 이 ramp 신호는 오실로스코프 1, 2, 3, 4,의 x 축 신호로 입력한다. x 축에 cavity의 길이에 비례하는 ramp 신호 입력을 하였으므로 x 축은 주파수 축이 되어 모든 오실로스코프 신호는 spectrum을 관측할 수 있다. 이렇게 하여 측정된 각 spectrum을 그림 10에 나타내었다.

그림 10 a)는 위상변조된 레이저 광이 super cavity를 투과한 레이저 스펙트럼인데, carrier signal의 크기 (Bessel 1종 함수의 $J_0(M)$)와 1차 측파 신호의 크기 ($J_1, (M)$)의 비로 부터 변조지수 $M = 0.73$ 인 것을 안다. 또 변조 주파수(1.5 MHz)와 스펙트럼폭으로부터 super cavity의 분해능은 약 150 kHz 정도임을 알 수 있다. 또, b)는 super cavity에서 반사된 레이저 스펙트럼을 나타낸 것이다. a) 신호와 마찬가지로 같은 변조지수를 갖는 신호크기를 나타내나 극성이 반대이다. c)신호는 in-phase 주파수 변조

신호로서 레이저 주파수 안정화를 위한 주파수 분별곡선으로 이용가능한 분산형 신호이다. d)는 FM신호 중

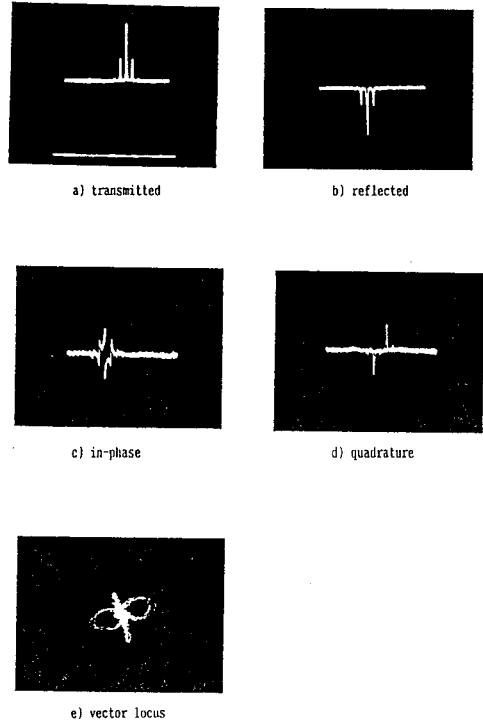


그림 10 Measured FM signals

흡수와 관련된 신호이므로 선폭을 계산함으로써 super-cavity의 투과선폭이 150 kHz 정도임을 알 수 있었다. e) 신호는 두 FM신호의 Lissajous figure로서 lock-in amp.의 기준 발진기의 위상지연에 따라 회전함을 실험적으로 확인하였는데 그림 11에 나타내었다. 그림 11 에서 기준신호의 위상각과 똑같은 각으로 Lissajous가 회전함을 보여주고 있는데 FM신호와 기준신호의 위상에 맞는 FM 신호를 찾는 데 유효한 데이터가 될 수 있다.

참 고 문 헌

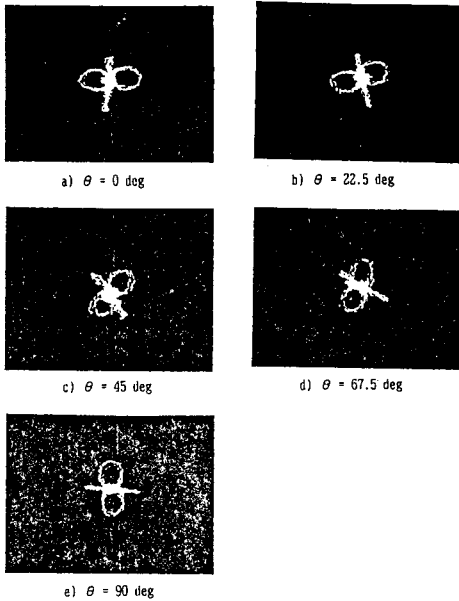


그림 11 Rotation of Lissajous of FM signals

6. 결 론 및 토 의

본 논문에서는 최근에 고 분해 레이저 분광학 연구나 레이저 주파수 안정화 및 광주파수 표준연구 등에 널리 사용되고 있는 고감도의 주파수 변조 분광법의 원리, 특징 및 레이저 주파수 안정화법의 응용에 관한 실험과 그 특징 등에 대해 소개하고 super-cavity를 이용한 본 연구실의 FM 분광실험 결과를 기술하였다. 150 kHz의 부과곡선폭을 갖는 기준 공진기를 FM 변조주파수 1.5 MHz, 변조지수 $M = 0.73$ 으로 단일모드 He-Ne laser를 이용하여 FM 분광신호를 검출하였다. 기존의 측정하기 곤란했던 FM-Modulus 측정을 대신하여 Lissajous를 측정하므로써 Modulus의 크기 정보 뿐만 아니라 위상정보도 얻을 수 있게 되었다. 기준 공진기를 열적 기계적 음향적으로 안정화한 분위기로 만든 환경하에 두고 분산형 FM신호를 레이저 주파수 분별곡선으로 사용하여 고속제어를 이용한 레이저 주파수를 안정화할 경우 위상 안정화 레이저의 실현도 가능할 것을 본다.

[1] COMITE CONSULTATIF POUR LA DEFINITION DU METRE 3e SESSION-1962(8-10 octobre) PARIS, PP 21-27
 [2] NBS SPECIAL PUBLICATION 420 "THE INTERNATIONAL BUREAU OF WEIGHTS AND LMEASURES 1875 - 1975" (1975) pp 88-92
 [3] K.Shimoda, 레이저연구, 15, 5-8(1987)
 [4] T.S.Jaseja, A.Javan and C.H.Townes, Phys. Rev. Lett, 10, 96, (1962)
 [5] 국제단위계 (제 5개정판 1985), KSRI-88-25-SP, 한국표준연구소 (1988)
 [6] 서호성등, 새물리 29, 712 (1989)
 [7] 광주파수 표준기급 옥소 안정화 He-Ne 레이저 개발, KSRI-89-3-IR, 과학기술처 (표준연구소) 발행 (1989) pp 179-189
 [8] J.L.Hall, Proceedings of the international Conference on Quantum electronics, SanFrancisco(1986), J.opt. Soc. Am. B, 3, Suppl. (1986) pp 80-81
 [9] R.V. Pound, Rev. Sci. Instrum, 17, 490 (1946).
 [10] G.C. Bjorklund and M.D. Levenson, Phys. Rev. A 24, 166(1981).
 [11] R.W.P. Drever, et. al., Appl. Phys. B 31, 97(1983).
 [12] G.C. Bjorklund, Opt. Lett. 5, 15(1980).
 [13] L.Hollberge and J.L.Hall, Laser Spectroscopy VI, Springer-Verlag, Berlin, (1983) pp229-232
 [14] J. Helmcke, et al., Appl. Phys. B 43, 85 (1987).
 [15] G.A. Kerr, et al., Appl. Phys. B 37, 11 (1985).
 [16] W.J.Kozlovsky and W.Length, CTHN2, "Stable diffraction-limited 429nm output from a frequency doubled GaAlAs diode", CLEO '90
 [17] J.Helmcke, etal, Appl. Opt. 21 (1982) 1686-1694
 [18] NRC catalog, pp L-2 (1989).
 [19] Burleigh Catalog, Fabry-Perot Interferometers and Etalons, FPIE 302, 583.