

PLL을 이용한 헬륨-네온 레이저의 오프셋 주파수 안정화

Offset Frequency Stabilization of He-Ne Lasers Using Phase Locked Loop

윤 동 현, 서 호 성, 유 준*
(Dong Hyun Yun, Ho Sung Suh, and Joon Lyou)

Abstract : This paper presents experimental results of the frequency offset locking of He-Ne lasers and the stability analysis. The master laser is free running, and the slave laser is a single-mode operating laser. The frequency difference of two lasers is stabilized to 200 MHz which can be synchronized using PLL servo. The measured beat frequency between two lasers was $200.004 \text{ MHz} \pm 0.15 \text{ MHz}$. The square root of Allan variance as a measure of stability in time domain is also measured. The long-term stability of the beat was worse than short-term stability. With a gate time $\tau = 1000 \text{ s}$, the square root of Allan variance was about 1 kHz. The results of the square root of Allan variance of the stabilized beat signal was a gate time of $\tau = 1000 \text{ s}$, the square root of Allan variance was about 1.5 kHz. The long-term stability was improved by more than several hundred times compared with that without the stabilization.

Keywords : He-Ne laser, frequency stabilization, phase locked loop

I. 서론

측정으로 얻은 값이 정확한가 아닌가를 판정할 기준이 되는 것이 측정 표준이다. 길이의 단위 미터가 광속도로 정의되면서 미터의 현시 방법으로 포화 흡수선에 주파수가 안정화된 레이저와 그 중심 주파수 및 진공 파장값이 추천되었다.[1] 미터의 정의에 따라 길이를 광원으로 한 간섭계를 구성하여 길이를 정확히 측정하려면 주파수 안정화 레이저를 측정하여야 한다. 길이의 표준기로 사용하고 있는 고안정도의 요오드 안정화 헬륨-네온 레이저[2]는 50~100 μW 의 낮은 출력과 6 MHz의 주파수 변조 등의 원인으로 인해 간섭측정이나 기타의 측정에 사용하기에 부족한 점이 있다. 이는 요오드 안정화 레이저의 주파수를 안정화 시키는 메카니즘 상에서 발생되는데, 요오드 분자의 포화흡수 신호를 3차 하모닉스를 이용하여 안정화 하므로 3차 하모닉 신호를 얻기 위하여 한쪽 반사경에 압전소자를 부착하여 정현파 미소 진동을 가하여 레이저 주파수를 변조하는 과정에서 발생된다. 또 6 MHz 정도의 값으로 주파수 변조된 레이저 광은 초고정밀 길이계측이나 그 주파수를 절대측정하기 위해서는 같은 정도의 안정도를 갖는 무변조된 레이저가 필요하다. 두 대의 요오드 안정화 레이저의 주파수 안정도를 평가하거나 주파수 오프셋 값을 측정하고자 할 때는 그 중 한대의 레이저를 오프셋 안정화 하여 사용할 경우에는 같은 레이저 주파수 간의 맥놀이 주파수 측정시 신호잡음비가 개선되어 측정이 용이하다. 또한 출력이 낮은 요오드 안정화 레이저를 출력이 높은 단일모드 레이저로 주파수 오프셋 안정화 할 경우 출력이 높은 단일모드 안정화 레이저로서 활용할 수가

있다. 오프셋 레이저 잠금 방법은 이와 같은 출력 및 안정도의 단점을 보완하여 무변조로 높은 출력의 안정된 레이저 광을 얻을 수 있다. 한대의 헬륨-네온 레이저를 주 레이저(master laser)로 하고 단일 모드 레이저의 다른 한 대의 레이저를 부 레이저(slave laser)로 하여 주 레이저의 주파수와 차 사이인 맥놀이 주파수를 전기적 기준 발진기로부터 나온 기준 주파수와 위상 비교하여 안정화 시킨 방법을 “주파수 오프셋 안정화 레이저”라고 한다[3]. 두 레이저의 주파수 오프셋 잠금(frequency offset locking)기술은 발진 스펙트럼 선폭의 축소화(주파수의 단기 안정화)를 실현하는 방법으로써, 고 분해 분광 또는 간섭계측의 광원의 개발이라는 관점에서 대단히 중요하다. 또 수 MHz 부터 수십 GHz 까지 오프셋된 주파수 잠금이 가능하다. 이에 따라 상업적인 응용, 원자나 분자 물리 및 레이저 분광학에 폭넓게 응용되고 있다. 본 논문에서는 헬륨-네온 레이저의 근본적인 문제점인 변조 특성과 낮은 출력 문제를 위상동기루프를 이용하여 주파수 안정화를 실현하기 위해 요오드 안정화 된 헬륨-네온 레이저의 오프셋 주파수 안정화 실험에 앞서 우선 단일 모드로 발진하는 두 헬륨-네온 레이저 중 자유발진 하는 하나를 주 레이저로 하고 다른 하나를 부 레이저로 하여 주 레이저 보다 주파수의 오프셋이 200 MHz가 되도록 오프셋 주파수를 설정하고 부 레이저가 이것을 추종하도록 PLL을 이용한 자유발진 레이저의 주파수 안정화 연구를 수행하였다.

II. 오프셋 주파수 안정화 실험

그림 1은 헬륨-네온 레이저의 오프셋 주파수 안정화를 위한 실험장치도이다. 주 헬륨-네온 레이저와 부 단일 모드 헬륨-네온 레이저를 동축으로 광축을 일치시켜서 고속 광 검출 소자에 입사시켜서 이들 두 레이저 사이의 맥놀이 주파수를 측정하고 이 맥놀이 주파수가 200 MHz가 되도록 PLL-servo를 이용하여 레이저의 주파수를 안정화 한다.

* 책임저자(Corresponding Author) /

논문접수 : 2004. 4. 19., 채택확정 : 2004. 11. 30.

윤동현, 유준 : 충남대학교 전자공학부

(dol001@cnu.ac.kr/jlyou@cnu.ac.kr)

서호성 : 한국표준과학연구원(hssuh@kriss.re.kr)

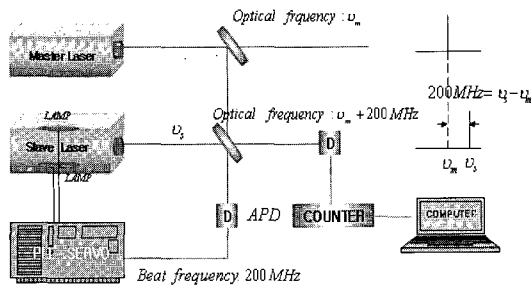


그림 1. 헬륨-네온 레이저의 오프셋 주파수 안정화를 위한 블록 다이어그램.

Fig. 1. Block diagram for offset frequency stabilization of He-Ne laser.

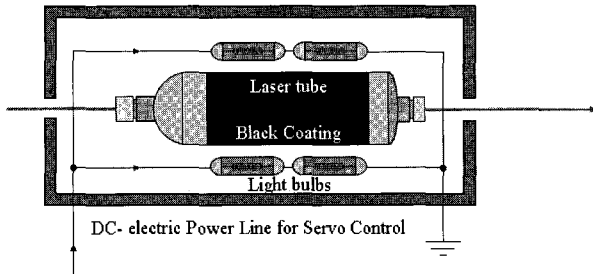


그림 2. 헬륨-네온 레이저의 튜브와 램프.

Fig. 2. Laser tube of light bulbs of slave He-Ne laser.

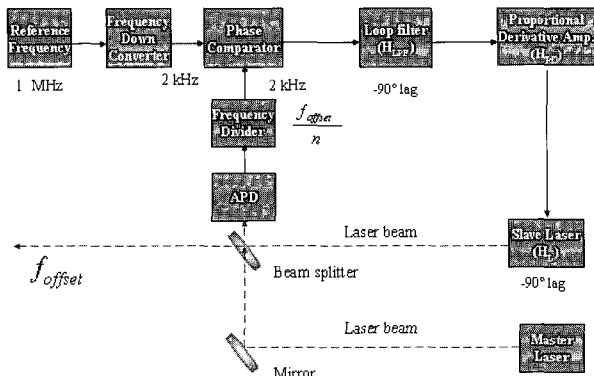


그림 3. PLL을 이용한 오프셋 주파수 안정화 루프.

Fig. 3. Offset frequency stabilization loop using PLL.

부 레이저의 공진기의 길이 제어는 제어응답속도를 개선하기 위해 필라멘트 발광에 의한 빛 복사 에너지로 공진기를 제어할 수 있는 소형 램프를 이용하여 공진기 길이를 제어하였다. 이때 램프의 필라멘트는 면적이 작기 때문에 외부 전압에 의한 반응 속도가 빠르고 빛 복사에 의한 에너지가 빛 속도로 전달이 되므로 제어 속도가 개선 될 수 있다. 그림 2는 공진기 길이 제어를 위한 헬륨-네온 레이저 튜브와 램프이다. 레이저 튜브에는 공진기 유리관 주위를 무광 흑색 페인트를 0.1 mm 정도 두께로 칠하여 광 에너지를 빛 속도로 흡수하도록 하였다. 사용한 램프는 12 V에서 동작하는 10 W 소형 램프를 2개 씩 양쪽에 모두 4개를 사용하였

으며 레이저 튜브와는 밀리 떨어지게 설치하였다. 또한 구동기의 램프의 밝기에 의해 흑색 복사되는 온도 변화에 따른 공진기 길이변화로 생기는 헬륨-네온 레이저 주파수 변화를 측정하였다. 주어진 공진기의 기본 주파수 공식은 (1)과 같다.

$$\nu_0 = \frac{c_0}{2nL_0} \cdot q \tag{1}$$

여기서, $c_0 = 3 \times 10^8$ m/sec (광속), $n=1$ (공진기 내부의 진공 굴절률), $q=$ 공진 종모드의 주양자수(정수), $L=$ 전체 공진기의 길이 [m]($L = (L_0 + \Delta l)$)의 변화에 따라 공진기의 출력 주파수는 변하게 된다.

그림 3은 오프셋 레이저의 주파수 안정화를 위한 PLL의 제어 흐름도이다. 광 검출기(APD)는 주 레이저와 부 레이저 사이의 맥놀이 신호를 검출한다. 부 레이저 발진 주파수는 주 레이저보다 200 MHz 높은 주파수이다. 검출기로부터의 검출되는 200 MHz 근방의 맥놀이 신호는 2 kHz로 하향 조정된 후, 1 MHz의 기준 주파수가 하향 조정(down converter)된 2 kHz와 위상 비교기, phase comparator에서 위상 비교된다. 위상 잠금 루프와 위상 비교용 전용소자인 디지털 위상 주파수 비교기(MC4046)를 사용하여 오차 신호를 비교하였다. 저역 통과 필터(loop filter)는 지연 필터로 차단 주파수보다도 큰 주파수에서 -90° 위상 지연을 갖는 1차 시스템이고, 전압 제어 발진기(VCO)로서의 부 레이저도 루프 필터와 마찬가지로 지연 필터로 -90° 위상 지연을 갖는 1차 시스템이다. 비례-미분(PD) 제어기는 앞섬 보상기의 단순화된 형태로 루프 필터에서 지연된 위상을 비례미분 제어기를 통해 보상해 주는 역할을 하게 된다. 즉, 수 Hz 이상의 제어 대역을 갖는 시스템을 설계하기 위해서는 이와 같은 위상 지연의 합이 -180°에 근접하게 되므로 위상 여유가 0°에 가깝게 되어 시스템이 불안정하게 될 수가 있으므로 비례미분 제어기를 추가로 삽입하여 위상 보상을 하였다.

전압제어 발진기의 이득계수 K_0 와 공진기의 기본 주파수 ν_0 를 비교해 보면, 공진기의 기본 주파수가 온도 변화에 따른 길이(Δl) 변화로 출력 주파수 변화를 알 수 있다. 즉, 전압(V)변화에 따른 온도변화로 공진기의 길이 변화에 따라 기본 주파수가 출력되므로 부 레이저 공진기를 전압제어 발진기로 두어 PLL 제어에 응용하였다.

본 실험에서 전압제어 발진기로서의 부 레이저의 공진기의 길이가 온도에 따라 변화하므로, 온도변화를 알아보기 위해 온도 센서 AD 590[4]과 온도 컨트롤러(LDT-5910B)[5]를 사용하여 온도를 측정하였다. AD 590 온도 센서는 서미스터에 비해 매우 선형적이어서 많은 실험에 이용되고 있다. 레이저 튜브에 AD590 센서를 부착하고 온도 컨트롤러에 연결하여 온도 변화를 측정하였다. 온도 변화에 따라 공진기의 길이가 변화하므로 온도에 따른 공진기 길이변화량 ΔL 은 (2)와 같다.

$$\Delta L = L_0 \alpha \Delta t \tag{2}$$

여기서, $\alpha = 7.5 \times 10^{-7}$ (레이저 튜브의 팽창계수, Borosilica

glass), Δt =온도변화, L_0 =레이저 튜브 길이, ΔL =온도에 변화에 따른 레이저 튜브의 길이변화이다. (1)에서 공진기의 길이 L 의 변동 ΔL 에 따른 상대적 주파수 변동을 $\Delta \nu$ 은 다음 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\Delta \nu}{\nu_0} = -\frac{\Delta L}{L_0} \quad (3)$$

그러므로 (2)를 (3)에 대입하여 $\frac{\Delta \nu}{\Delta t}$ 값을 정리하면

$$\frac{\Delta \nu}{\Delta t} = -\nu_0 \alpha \quad (4)$$

가 된다. $\nu_0 = 4.7 \times 10^{14}$ Hz이고, $\alpha = 7.5 \times 10^{-7}$ 이므로 레이저 튜브의 단위 온도당 광주파수 변동 $\frac{\Delta \nu}{\Delta t} = 3.5 \times 10^8$ Hz/°C 즉, 0.35 GHz/°C가 됨을 알 수가 있다.

본 실험에서 사용된 온도 컨트롤러는 0.1 [°C]의 분해능으로 자유발진에서 측정된 온도와 PLL 서보에 의해 동기된 상태에서 측정된 온도를 측정하였다. 그림 4는 PLL 서보에 의해 동기된 상태와 자유발진 상태의 공진기 온도변화로 Δt 는 1.1 °C정도 측정되었다. 공진기 길이 L_0 는 139 mm이다. 그림 5는 비례미분 제어기의 회로도를 나타내었고, 발생하는 오프셋 드리프트 영향으로 비례미분 제어기의 출력이 PLL 기준 신호의 위상 동기 범위를 벗어나게 된다[6]. 따라서, 오프셋 드리프트 영향을 최소화 하기 위해 저역통과 필터의 입력측에 제로 조절 회로[7]와 input offset voltage null circuit[8]를 비례미분 제어기에 적용하였다. 그림 6은 저역통과필터와 비례미분 제어기의 출력파형을 보였다. 저역통과필터 입력은 2 kHz로 하향 조정된 맥놀이 신호의 주파수가 기준 발진기의 주파수와 다를 때, 연속적인 위상 검출기의 출력이다. 이 출력은 펄스적으로 고조파 성분을 많이 함유하고 있기 때문에 저역통과 필터를 통해 이 고조파 성분을 적분하여 직류 제어신호로 투입파형이 출력되었고, 이 출력은 비례미분 제어기를 통해 구형파형을 보였다.

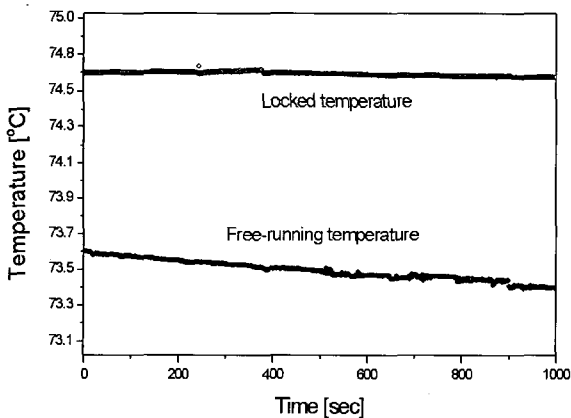


그림 4. PLL 서보에 의해 동기된 상태와 자유발진 상태의 공진기 온도 변화.

Fig. 4. Temperature variable of cavity of locked and free-running by the PLL-servo.

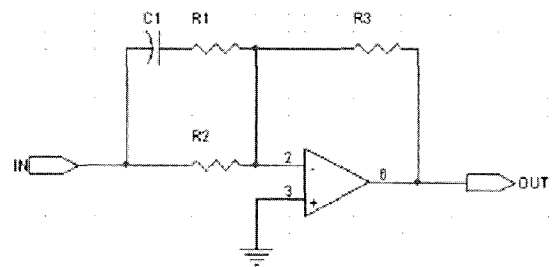


그림 5. 비례미분 제어기의 회로도.

Fig. 5. Circuit of proportional-derivative amplifier.

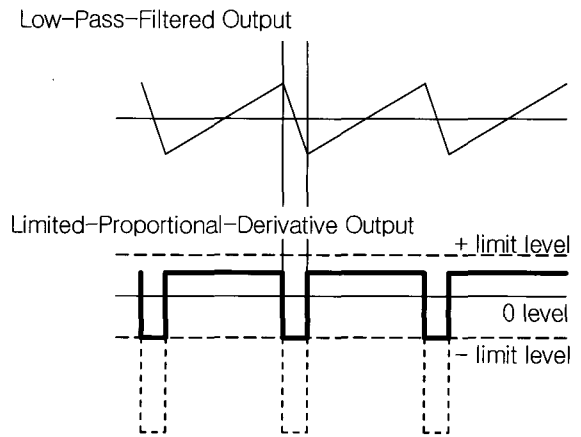


그림 6. 저역 통과 필터와 비례미분 제어기의 출력파형.

Fig. 6. Output waveform of the low-pass filter and the proportional-derivative controller.

III. 페 루프 안정 해석

그림 3의 주파수 안정화 루프에서 개루프 전달함수 $H(\omega)$ 는 다음과 같이 주어진다[9].

$$H(\omega) = H_L \cdot H_{LPF} \cdot H_{PD} = \frac{1}{j\omega\tau_L} \cdot \frac{1}{1+j\omega\tau_{LPF}} \cdot \frac{R_3}{R_2} \cdot \frac{1+j\omega(R_1+R_2)C_1}{1+j\omega R_1 C_1} \quad (5)$$

여기서, H_L 은 전압제어 발진기로서의 부 레이저 공진기, H_{LPF} 는 저역통과필터, H_{PD} 는 비례미분제어기이다.

그림 7은 개루프 전달함수의 보드선도를 나타내었다. 이득 여유가 decibel로 나타낼 때 양이면 시스템은 안정하고, 음이면 시스템은 불안정하다. 안정된 최소 위상 시스템은 양의 위상 여유를 갖는다. 개루프 전달함수는 $G(s)H(s) = \frac{K(s+c)}{s(s+a)(s+b)}$ 의 형태이며, 근궤적은 s-평면의 왼쪽에 있어 K에 관계없이 안정한 상태를 그림 8 근궤적 선도에서 보여주고 있다. 근궤적 선도는 각각의 개루프 극점이나 영점이 페루프 극점의 위치에 미치는 영향을 보여준다. 즉, 시스템의 안정성을 따지기 위한 것으로, 개루프 전달 함수의 극점들이 좌반평면에 있게 되면 라플라스 변환을 할 때 $e^{(-at)}e^{(-bt)}$ 형태로 변환되어 시간이 지남에 따라 수렴하게 되고 안정하게 된다.

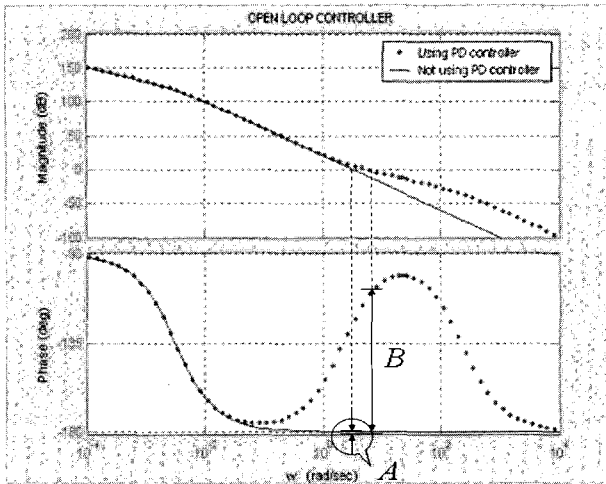


그림 7. 개루프 전달함수의 보드선도 (A : 보상기 사용한 위상 여유, B : 보상기 사용하지 않은 위상 여유).

Fig. 7. Bode plot of open-loop transfer function (A : phase margin without compensation, B : phase margin with compensation).

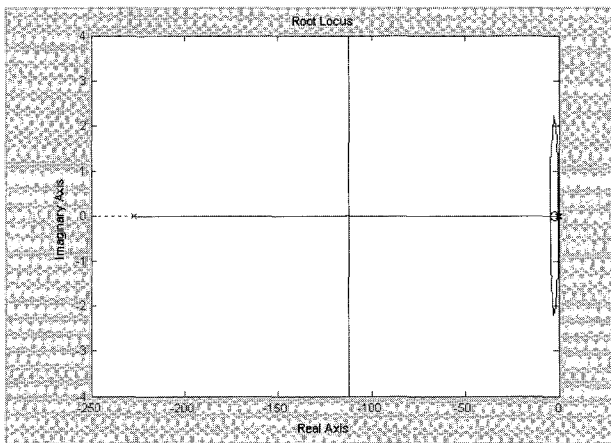


그림 8. 근궤적 선도.

Fig. 8. Bode plot of root locus.

IV. 안정도 평가

이와 같은 PLL 서보를 사용하여 부 레이저의 주파수를 주 레이저의 주파수에 200 MHz 옵셋을 주고 이 옵셋 주파수를 안정화를 실현하였다. 위상 동기가 되었을 때의 2 kHz의 기준 주파수와 2 kHz로 변환된 옵셋 주파수가 위상동기 되었을 때의 동기된 맥놀이 신호를 그림 9에 나타내었다. 그림 10은 RF spectrum analyzer를 이용하여 측정한 두 레이저의 200 MHz의 맥놀이 주파수의 측정결과를 보여주고 있다. 그림 11은 본 실험에서 τ=0.1 s, N=10,000일 때, 측정된 데이터에 의하여 부 레이저는 주 레이저의 주파수에 200 MHz 옵셋된 상태로 동기되어 있음을 알 수가 있다. 이 옵셋 주파수의 안정도를 측정하기 위하여 두 대 레이저 사이의 맥놀이 주파수를 평가하였다. 주파수 안정도를 표현하는 방법으로 주파수 영역에서의 안정도와 시간 영역에서의 안정도 두 가지가 있다. 주파수 영역에서는 시간 요동의 스펙트럼 밀도 또는 미세 주파수 요동의 스펙트럼 밀도로써 안정도를 나타내고 시간 영역에서는 Allan variance[10,11]으로써 나타낸다. 즉, 시간에 따라 변화는 평균값은 분포를 평균 시간의 함수로 나타낸 것을 Allan variance이라 한다. Allan variance (σ_y²(τ))의 제곱근을 시간 영역에서의 주파수 안정도로 정의하면 (6)과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \sigma_y^2(\tau) &\equiv \langle \sigma_y^2(N=2, T=\tau, \tau) \rangle \\ &= \langle \frac{(\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2}{2} \rangle \\ &\approx \frac{1}{2(M-1)} \sum_{k=1}^{M-1} (\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2 \end{aligned} \tag{6}$$

여기서, M은 측정된 \bar{y}_k 의 개수이며 이와 같이 유한한 측정 개수 M으로부터 계산된 σ_y(τ)의 통계적 오차는 근사적으로 ± M^{-1/2}이다. 그림 12는 안정화 되지 않은 옵셋 레이저의 주파수 안정도를 Allan variance 제곱근으로 나타낸 결과로 데이터의 최소 샘플링 시간은 100 ms이다. 데이터 fitting 결과 gate time이 0.1s ≤ τ ≤ 1000s 구간에서

σ_y(τ) = 1.2 × 10⁴ τ^{3.4}의 안정도를 얻었다. 주 레이저 주파수의 드리프트 현상에 의해 안정도가 떨어지는 것을 알 수 있다. 옵셋 안정화가 이루어졌을 때 두 대의 레이저 사이

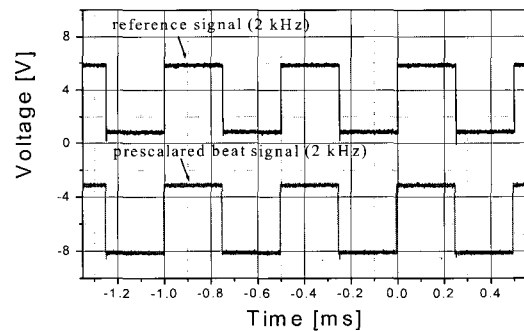


그림 9. 기준 신호에 위상 동기된 맥놀이 신호.
Fig. 9. Beat signal which is phase synchronized to reference.

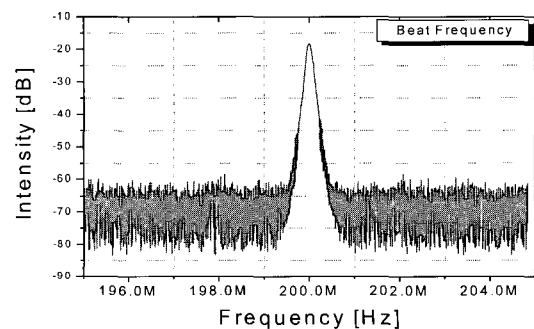


그림 10. RF spectrum상의 200 MHz 맥놀이 주파수.
Fig. 10. 200 MHz beat frequency of 200 MHz on rf spectrum analyzer.

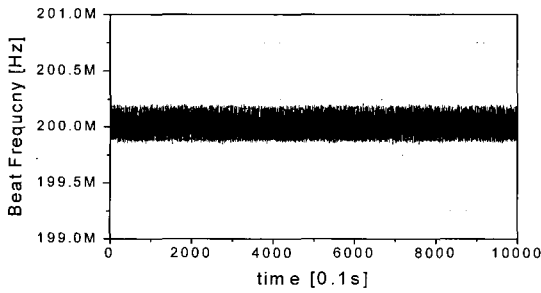


그림 11. PLL 동작시 측정된 맥놀이(오프셋) 주파수.
Fig. 11. Measured beat frequency when the PLL works.

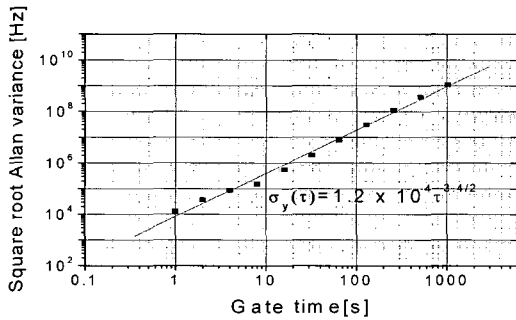


그림 12. 위상 비 동기시 Allan variance 제공근.
Fig. 12. The square root of Allan variance when both lasers are in free-running.

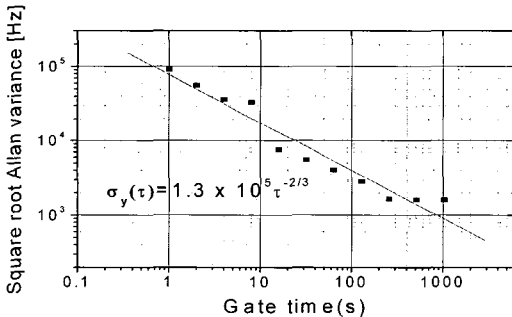


그림 13. 위상 동기시 Allan variance 제공근.
Fig. 13. The square root of Allan variance when the beat frequency was stabilized.

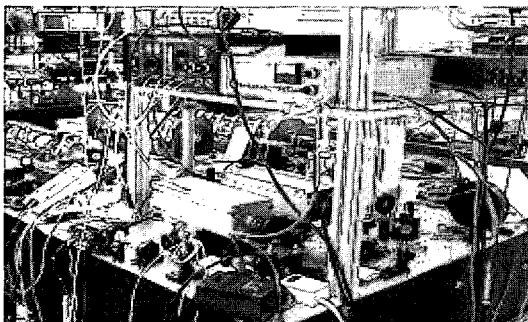


그림 14. PLL을 이용한 헬륨-네온 레이저 오프셋 주파수 안정화 시스템의 실험장치.
Fig. 14. Experimental setup of offset frequency stabilization of He-Ne lasers using phase locked loop system.

의 맥놀이 주파수 안정도를 Allan variance 제공근 $\sigma_y(\tau)$ 으로 나타낸 결과를 그림 13에 나타내었다. 데이터의 최소 샘플링 시간은 100 ms이다. 데이터 fitting 결과 gate time이 $0.1s \leq \tau \leq 1000s$ 구간에서 $\sigma_y(\tau) = 1.3 \times 10^5 \tau^{-2/3}$ 의 안정도를 얻었다. 그림 14는 PLL을 이용한 헬륨-네온 레이저 오프셋 주파수 안정화 시스템의 실험 장치 사진을 보여준다.

IV. 결론 및 활용

본 연구에서는 변조에 의해 요오드 안정화 된 헬륨-네온 레이저의 근본적인 문제점인 변조특성과 낮은 출력 문제점을 보완하기 위하여 주파수 오프셋 잠금 기술을 이용하여 주파수 안정화된 무변조 안정화 레이저를 개발하여 광 주파수 표준을 확립하고자 하였다. 특히, 본 논문에서는 자유발진하고 있는 주 레이저의 주파수를 추종하는 무변조 오프셋 주파수 안정화 레이저를 개발하기 위해 우선적으로 자유발진하는 주 레이저와 높은 출력의 부 레이저의 오프셋 주파수를 PLL 제어 회로를 이용하여 안정화를 실현 하였으며 안정도는 ± 0.15 MHz 이내 였으며, $0.1s \leq \tau \leq 1000s$ 사이에서의 시간영역의 주파수 안정도의 척도인 Allan variance 제공근

$\sigma_y(\tau)$ 은 $\sigma_y(\tau) = 1.3 \times 10^5 \tau^{-2/3}$ 의 안정도를 얻을 수 있었다. 요오드 안정화 레이저를 기준한 오프셋 레이저의 주파수 안정도는 이보다 훨씬 좋은 값을 얻을 수 있을 것으로 본다. 왜냐하면 기준 레이저의 안정도가 커지면 오프셋 레이저도 이를 추종하기 때문이다. 따라서 PLL 제어회로의 기준발진기를 주파수 1차 표준기를 사용하거나 기준 레이저를 요오드 안정화 헬륨-네온 레이저를 사용할 경우에는 이 보다 더 우수한 부 레이저를 만들 수 있을 것으로 기대한다. 이에 PLL 제어 회로를 요오드 안정화 된 헬륨-네온 레이저에 이용하여 오프셋 주파수 안정화 시스템에 응용하므로써 즉, 오프셋 주파수 안정화 레이저는 원자 및 분자 레이저 분광학 분야 또한 고출력 레이저의 주파수 안정화와 결맞음 광통신 시스템에서 많은 활용이 있을 것이다.

참고문헌

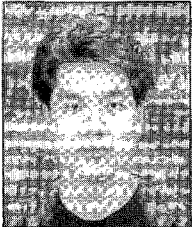
- [1] 편집부, "Documents concerning the new definition of the metre", Metrologia, vol. 19, pp. 163-177, 1984.
- [2] 엄태봉, 서호성, "레이저 간섭계의 미터 표준", 한국정밀공학회지, 제17권, 제6호, pp. 17-24, 6. 2000.
- [3] J. Ishikawa, "Accurate frequency control of an internal-mirror He-Ne laser by means of a radiation-heating system", Appl. Opt. vol. 34, no. 27, pp. 6095-6098, Sep. 1995.
- [4] Data sheet, "AD 590" ANALOG DEVICES.
- [5] Data sheet, "LDT-5910B" ILX Lightwave.
- [6] 박홍준, "CMOS 아날로그 집적회로 설계(하)", 시그마프레스, 1999.
- [7] 김상진, "OP 앰프 회로 설계", 성안당, 1990.
- [8] Data sheet, "OP 07", TEXAS INSTRUMENTS.

[9] N. Mio, M. ko, W. Ni, S. Pan, A. Araya, S. Moriwaki, and K. Tsubono, "Design of a stabilized laser by using thin-film heater", *Appl. Opt.* vol. 32, no. 30, pp. 5944-

5947, Oct. 1993.

[10] D. W. Allan. *proc. IEEE* 54, 221, 1966.

[11] NBS Technical note 669, 8, 1975.



윤 등 현

1975년 7월 27일생. 2002년 한밭대 제어계측공학과(공학사). 2004년 충남대 전자공학과(공학석사). 2004년~현재 한국기계연구원 첨단산업기술연구부 연구원. 관심분야는 제어응용, 정보 및 네트워킹 등.



서 호 성

1956년 8월 29일생. 1980년 영남대 물리학과(이학사). 1982년 경북대 물리학과(이학석사). 1994년 영남대 물리학과(이학박사). 현재 한국표준과학연구원 광기술표준부 책임연구원. 관심분야는 광주파수 및 파장표준.



유 준

1956년 3월 22일생. 1978년 서울대 전자공학과 졸업. 1984년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (박사). 1984년~현재 충남대학교 정보통신공학부 교수. 관심분야는 산업공정제어, 센서신호 처리, 항법 시스템 등.