

횡자장하에서 633 nm He-Ne 레이저의 주파수 안정화

엄태봉 · 박진원 · 정명세
한국표준과학연구원, 역학연구부

양 준 목
충남대학교 물리학과

(1993년 9월 23일 받음)

횡자장하에서 Zeeman 분리된 두 편광성분의 맥놀이 주파수와 출력 차를 이용하여 내부 반사경형 633 nm He-Ne 레이저의 주파수를 각각 안정화시켰다. 맥놀이 주파수를 이용할 경우 주파수안정도(square root Allan variance)와 주파수 온도계수는 7.0×10^{-11} 과 170 kHz/°C 였으며, 출력차이를 이용할 경우에는 1.1×10^{-9} 과 1.8 MHz/°C 였다. 이 결과로부터 두 편광성분의 맥놀이 주파수를 이용한 안정화 방법이 출력차의 방법보다 10배 이상의 우수한 주파수 안정화 특성을 갖고 있음을 알 수 있었다.

I. 서 론

내부 반사경형 633 nm He-Ne 레이저의 주파수를 안정화시키기 위해 2모드 출력차 비교방법,^[1] Zeeman 안정화방법,^[2,3] Lamp dip 안정화방법^[4]이 개발되어 정밀 길이측정용 간섭계의 광원으로 사용되고 있다. 특히 Zeeman 안정화방법의 경우 높은 출력에서도 단일모드 발진이 가능하고 비교적 높은 주파수 안정도를 갖고 있기 때문에 가장 많이 사용되고 있으며 상용으로 시판되는 Hewlett Packard사의 레이저 길이측정기 또한 맥놀이 주파수가 약 1.8 MHz인 종자장 Zeeman 안정화 레이저를 광원으로 사용하고 있다.^[5] 횡자장하에서 Zeeman 분리된 두 성분은 자장에 평행한 방향의 π 편광과 자장에 수직인 방향의 σ 편광을 지니기 때문에 원형편광된 종자장의 경우와는 달리 서로 직교하는 선형편광 광원을 직접 얻을 수 있다. 또한 두 편광성분의 주파수 간격이 수십에서 수백 kHz 정도 벌어져 있기 때문에 고속의 광검출기나 증폭기가 필요없이 쉽게 맥놀이 주파수를 검출할 수 있기 때문에 측정속도가 빠르지 않은 heterodyne 간섭계의 광원으로 적합하다. 횡자장에서의 주파수 안정화는 R. H. Morris 그룹에 의해 처음 보고되었는데 이들은 안정화를 위한 제어용 오차신호로 두 편광성분의 맥놀이 주파수를 이용하였다.^[3] 그후 N. Umeda 그룹에서 출력차를 이용한 안정화방법을 발표하였다.^[6] 그러나 두 경우 각각 다른 조건에서 안정화를 시켰기 때문에 두 안정

화방법의 특성을 정량적으로 분석할 수 없다.

따라서 본 연구에서는 동일 플라즈마 튜브와 동일한 전자제어계에 맥놀이 주파수 방법과 출력 차 방법을 각각 적용하여 주파수를 안정화시킨 후 광주파수 표준기인 옥소안정화 He-Ne 레이저와 주파수를 비교 측정하므로써 두 안정화방법의 특성을 평가하였다.

II. 실험장치

횡자장하에서는 633 nm He-Ne 레이저의 이득곡선이 축소되기 때문에 수 mW의 고출력에서도 단일 종모드 발진이 가능하다. 이 단일모드는 서로 직교하는 두 선형 편광 성분으로 Zeeman 분리되는데 이 두 성분사이의 맥놀이 주파수와 출력차이는 이 단일모드가 이득곡선에 놓인 위치에 따라 변한다. 특히 이득곡선의 중심 부근에서 두 신호는 선형적으로 변하기 때문에 이 신호를 이용하여 주파수를 안정화시킬 수 있다. 그림 1은 본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도이다. 실험에 사용된 레이저는 내부 반사경 He-Ne 레이저 (USHIO, #UNL-220R)로 출력은 1 mW이다. 그리고 공진기의 길이는 22 cm로 종모드 간격은 약 670 MHz이다.

레이저 출력을 광속분리기 BS₁으로 분리하여 반사된 광속은 주파수 안정화에 사용하고 통과된 광속은 모드 분석과 주파수 안정도 측정에 사용하였다. BS₂를 통과한 두 편광성분은 45° 편광판에서 혼합되어 그 맥놀이 주

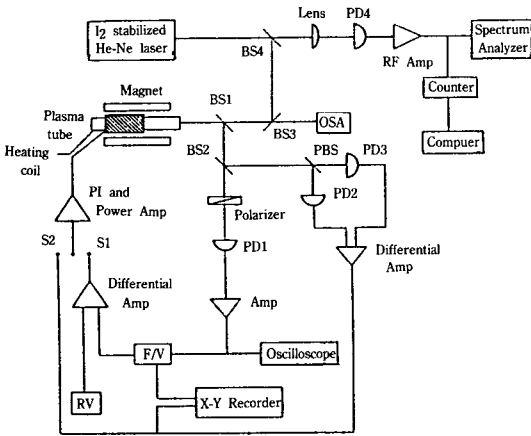
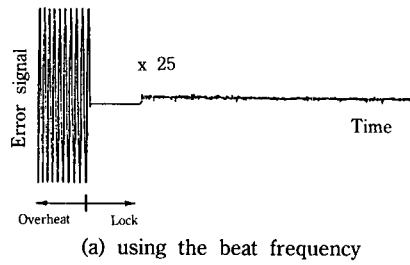


그림 1. Experimental setup for frequency stabilization: (BS) beam splitter, (PBS) polarizing beam splitter, (OSA) optical spectrum analyzer, (F/V) frequency-to-voltage converter, (RV) reference voltage.

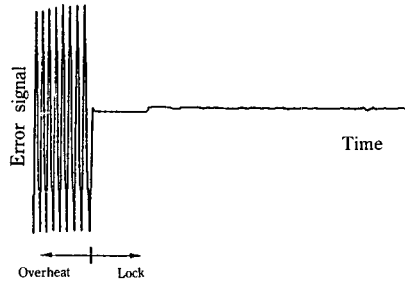
파수가 광소자 PD₁에서 검출된다. 이 맥놀이 주파수는 주파수-전압 변환기에 의해 아날로그 신호로 바뀌어지고 차등증폭기에 의해 기준전압 신호와 비교된 후 공진기의 길이 조절을 위한 오차신호 S₁으로 사용된다. 한편 BS₂에서 반사된 광속은 편광광속분리기에서 수직 수평 두 성분으로 분리되어 그 세기가 검출된 후 차등증폭기에서 차신호 S₂가 얻어진다. 이 두 신호중 하나가 선택되어 플라즈마튜브 외벽에 부착된 thin film heater에 흐르는 전류를 조절하는데 사용된다. 비례적분기에 입력되는 두 오차신호는 똑같은 기술기, 즉 광주파수 대 전압 신호의 비가 같도록 조절하였다.

III. 실험결과 및 논의

그림 2는 맥놀이 주파수와 출력차를 기록한 그림으로 overheating은 레이저를 충분히 예열시켜 주위와 열 평형이 이루어진 후 heater에 전류를 인가하여 플라즈마 튜브의 온도를 정상 작동 온도보다 높게 만드는 것으로 overheating 후 servo 회로를 가동시켜 주파수를 안정화시킨다. 여기서 오차신호의 주기는 플라즈마 튜브의 $\lambda/2$ 팽창 (약 0.3°C의 온도상승)에 해당되며 overheating양은 두 방법 모두 같게 하였다. 레이저가 안정화되었을 경우 오차신호는 두 방법 모두 0.2% 이내에서 안정화되었다. 맥놀이 주파수 방법의 경우 출력차 방법보다 short term 노이즈가 많은데 이것은 주파수-전압변환기



(a) using the beat frequency



(b) using the intensity difference.

그림 2. Error signals of two servo controls.

center frequency drift (MHz)

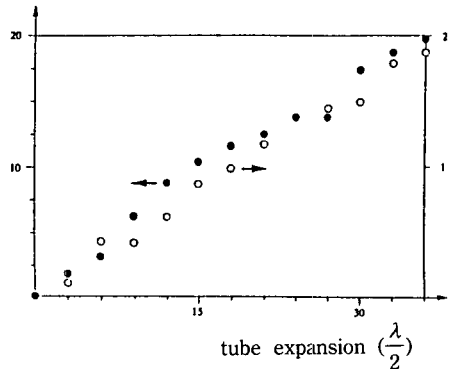


그림 3. Center frequency drift as function of tube expansion.

- : using the beat frequency
- : using the intensity difference

가 적절하게 조절되지 못한데서 발생된 것으로 추정된다. 많은 경우 주파수 안정도를 그림 2의 오차신호로 비교 평가하나 중심주파수와 주파수 안정도의 절대적인 측정 은 불가능하다. 따라서 국가 광주파수 표준기인 옥소안정화 He-Ne 레이저(square root Allan variance at sampling time 100 s : 9×10^{-13})와 주파수를 비교하여 square root Allan variance를 계산하였다.^[7,8] 측정결과 sampling 시간 1초에서 맥놀이 주파수 방법의 경우 7.0×10^{-11} , 출력차방법의 경우 1.1×10^{-9} 이었다.

한편 overheating양, 즉 플라즈마튜브의 온도에 따른 안정화 레이저의 중심 주파수 변화를 측정하였다. 이것은 레이저의 반복사용에 의한 주파수의 repeatability에 영향을 미치는 중요한 요소로 측정결과가 그림 3에 있다. 레이저의 정상 작동온도보다 약간 높은 온도에서 안정화시킨 후 옥소안정화 레이저에 대한 상대적인 주파수를 측정한 후 servo 회로를 정지시킨다. 다음 heater에 전류를 인가하여 플라즈마튜브를 $3/2 \cdot \lambda$ 만큼 팽창 (0.9°C 온도상승)시킨 후 다시 servo 회로를 동작시켜 안정화시킨 후 주파수를 측정한다. 약 6시간 동안 이 과정을 반복하여 중심 주파수의 온도 의존성을 측정하였다. 측정하는 동안 주위온도 변화는 1°C 미만이었다. 계산된 온도·주파수 계수는 맥놀이 주파수 방법의 경우 $170 \text{ kHz}/^\circ\text{C}$ 이었고 출력차 방법의 경우 $1.8 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$ 였다.

IV. 결 론

횡자장에서 내부반사경 633 nm He-Ne 레이저의 주파수를 안정화시켰다. 안정화를 위한 오차신호로 Zeeman 분리된 두 편광성분의 맥놀이 주파수 신호와 출력차 신호를 각각 이용하였다. 맥놀이 주파수 방법의 경우 얻어진 주파수 안정도와 온도 주파수 계수는 7.0×10^{-11} 과 $170 \text{ kHz}/^\circ\text{C}$ 였으며 출력차 방법의 경우 1.1×10^{-9} 과 $1.8 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$ 였다. 그림 2의 오차신호는 두 방법이 거의 동일한 안정도를 갖고 있으나 옥소안정화 He-Ne 레이저와 비교하여 주파수를 절대 측정한 결과 맥놀이 주파수 방법이 10배 이상은 우수한 성능을 갖고 있음을 알 수

있었다. 이러한 현상은 그림 2(b)에서 볼 수 있듯이 출력차 오차신호의 진폭과 중심 주파수가 overheating에 따라 약간 변하는 것으로부터 발생된다. 즉 레이저 출력은 정량적인 신호로 공진기의 정렬에 크게 의존하고 있으며 광속분리기 등의 광학소자나 광검출기, 증폭기의 비선형성에 의해 검출신호가 달라질 수 있다. 따라서 횡자장에서 주파수를 안정화시키기 위한 더욱 효과적인 방법은 Zeeman 분리된 두 편광성분의 맥놀이 주파수를 오차신호로 사용하는 것 (본 실험 10배 이상의 안정도를 얻었다)이며 출력차를 이용할 경우 열적 안정도가 매우 우수한 공진기를 사용해야 됨을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 엄태봉, 임재선, 원종욱, 정명세, 새물리 **26**, 26(1985).
- [2] T. Baer, F. V. Kowalski and J. L. Hall, Appl. Opt. **19**, 3173(1980).
- [3] R. H. Morris, J. B. Ferguson, and J. S. Warniak, Appl. Opt. **14**, 2808(1975).
- [4] K. Shimoda and A. Javan, J. Appl. Phys. **36**, 718 (1966).
- [5] N. Umeda, M. Tsukiji, T. Katsura and H. Takasaki, Kogaku. **8**, 279(1979).
- [6] Hewlett-Packard, 5526 Laser Measurement System Manual (1980).
- [7] 서호성, 강선도, 심명현, 원종욱, 정명세, 새물리, **29**, 312(1989).
- [8] D. W. Allan, Proc. IEEE **54**, 221(1966).

Frequency Stabilization of a 633 nm He-Ne Laser in a Transverse Magnetic Field

Tae Bong Eom, Jin Won Park and Myung Sai Chung

Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-606, Korea

Joon Mook Yang

Department of Physics, Chungnam University, Taejon 305-764, Korea

(Received: September 23, 1993)

The frequency of the 633 nm internal mirror He-Ne laser has been stabilized by using the beat frequency and the intensity difference between two Zeeman split components in a transverse magnetic field. The frequency stability and the frequency temperature coefficient for the beat frequency method was 7.0×10^{-11} and $170 \text{ kHz}/^\circ\text{C}$, respectively, and those for the intensity difference was 1.1×10^{-9} and $1.8 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$, respectively.