

## 신호대잡음비가 최적화된 광헤테로다인 신호를 이용한

### 요오드안정화 헬륨네온 레이저의 주파수 절대측정

## Absolute Frequency Measurement of HeNe/I<sub>2</sub> Laser Directly

### Utilizing Optimized Optical Heterodyne Beat SNR

이원규, 이대수, 서호성

한국표준과학연구원 기반표준부 길이/시간그룹

[oneqlee@kriss.re.kr](mailto:oneqlee@kriss.re.kr)

1983년에 국제도량형 총회에서 미터가 “빛이 진공에서 299 792 458 분의 1초 동안 진행한 경로”로 정의된 이래로 여러 가지 원자 또는 분자의 전이선에 안정화된 레이저들이 미터 표준을 구현하는 수단으로 추천되었다.<sup>(1)</sup> 그 중에서도 633 nm 파장의 요오드 분자 전이선에 안정화된 헬륨네온 레이저는 대부분의 나라에서 국가 길이표준으로서 길이 측정용 정밀 간섭계의 교정 등에 이용되고 있고, 이 레이저의 광주파수에 관한 수많은 국제비교가 이루어졌다. 이 레이저의 주파수를 SI 초의 정의에 입각하여 절대측정을 하기 위해서 종래에는 주파수 배가와 여러 중간 단계 레이저들을 사용하는 거대 시스템인 주파수 체인을 사용하였으나, 펨토초 레이저를 이용한 광빗(optical comb)이 개발된 이후로 초의 정의인 세슘 원자의 마이크로파 대역의 주파수로부터 직접적으로 광주파수를 절대측정하는 것이 가능해졌다.<sup>(2)</sup> 그러나 633 nm 요오드 안정화 헬륨네온 레이저의 경우에는 출력이 낮고(100  $\mu$ W 이하), 주파수 안정화를 위하여 변조(변조주파수; 2.5 kHz, 변조폭; 6 MHz)가 걸려 있기 때문에 절대주파수 측정을 위해 이용되는 광빗과의 광헤테로다인 신호의 SNR이 20 dB이하인 경우가 대부분이다. 이 정도의 SNR로는 주파수 카운터가 제대로 작동하지 않기 때문에 직접 주파수를 측정하지 못하고 간접적인 방법을 써야 하는데 그 예로는 tracking oscillator를 사용하는 방법<sup>(3)</sup>, high power buffer laser를 사용하는 방법<sup>(4)</sup>, optical amplifier를 사용하는 방법<sup>(5)</sup> 등이 있다. 하지만 이러한 간접적인 방법들은 추가적인 장비들로 인해 실험 장치가 복잡해지며, 위상잠금루프의 cycle slip이 일어나지 않았는지 항상 확인해야 한다. 본 연구에서는 광빗과 633 nm 요오드 안정화 헬륨네온 레이저와의 광 헤테로다인 신호대 잡음비를 34 dB로 최적화하여 직접 주파수 카운터로 절대 주파수 측정을 하였다.

실험 장치는 그림 1과 같다. 광빗은 반복율이 202 MHz이고 반복율과 오프셋주파수(carrier offset frequency)를 수소메이저 신호로 위상잠금하였다. 요오드 안정화 헬륨네온 레이저의 출력은 94  $\mu$ W였다. 광빗과 요오드 안정화 헬륨네온 레이저의 진행방향과 빔 크기 그리고 파면을 정확하게 맞추어 주기 위하여 633 nm 용 2x2 단일모드 광섬유 결합기(SMF coupler)를 사용하였다. 광섬유 결합기의 한쪽 출력단에서 요오드 안정화 헬륨네온레이저의 출력은 26  $\mu$ W이었다. 편광방향을 서로 맞추어 주기 위해 헬륨네온 레이저 쪽에 half wave plate로 편광을 조절하였다. 광 헤테로다인 신호에 참여하지 않는 광빗의 모드들은 shot noise를 유발하여 신호대 잡음비를 악화시키므로 1800 gr/mm의 회절격자를 사용하고 아발란치 광 다이오드(APD)와의 거리를 멀게 하였다. 회절격자와 APD의 거리가 110 cm 일 때, 약 10 dB의 SNR 향상을 얻을 수 있었다.

그림 2에 이러한 방법으로 신호대 잡음비가 최적화된 광 헤테로다인 신호를 나타내었다. 광빗과 요오드 안정화 헬륨네온 레이저의 맥놀이 주파수는 약 30 MHz가 되도록 맞추어 준 후 스펙트럼분석기로 측정하였다. 스

펙트럼 분석기의 resolution bandwidth는 300 kHz이다. SNR은 34 dB이었으며 이 신호를 이용하여 주파수 카운터로 광주파수를 절대 측정할 수 있었다. 광섬유 결합기를 사용하지 않으면 두 레이저 빔의 완벽한 파면 맞춤이 어려우므로 그림 3에서와 같은 결과 밖에 얻을 수 없었다.

결론적으로, 본 연구에서는 광헤테로다인 SNR 최적화는 광섬유 결합기의 사용과 회절격자와 APD의 거리 조절의 두 가지로 이루어졌으며, 주파수 카운터를 직접 사용하기에 충분한 SNR로서 요오드 안정화 헬륨네온 레이저의 주파수를 절대측정하였다.

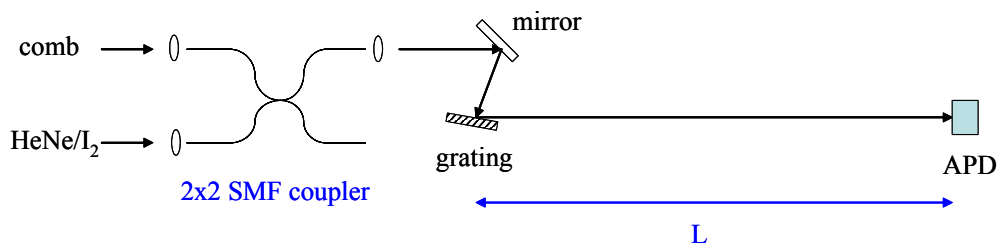


그림 1. 실험 장치도.

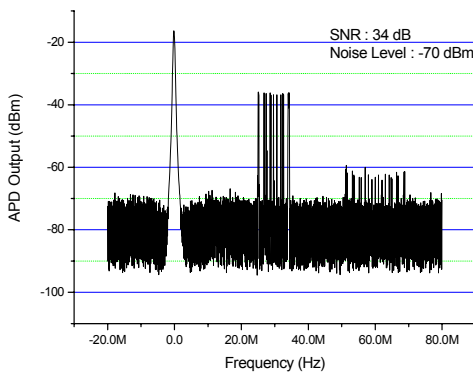


그림 2. SNR 최적화된 heterodyne beat 신호 (L=110 cm).

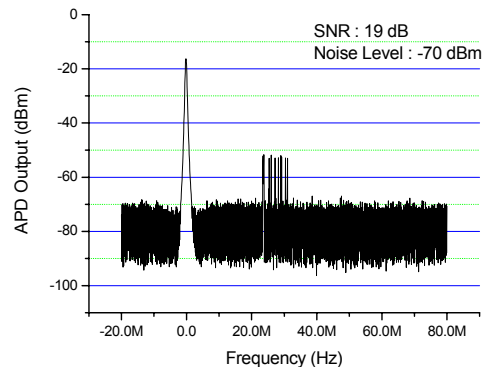


그림 3. SMF coupler를 사용하지 않았을 때의 heterodyne beat 신호.

참고문헌

1. T. J. Quinn, "Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards (2001)", Metrologia 40, 103-133 (2003)
2. T. Udem et. al., Phys. Rev. Lett. 82, 3568 (1999)
3. T. H. Yoon et. al., Appl. Phys. B 72, 221 (2001)
4. L. S. Ma et. al., Metrologia 41, 65 (2004)
5. M. Vainio et. al., Appl. Phys. B 81, 1053 (2005)