

증폭된 광빔과 광시계 방법을 이용한 세슘 D2 전의선의 절대주파수 측정

Absolute Frequency Measurement using Amplified Optical Frequency Comb and Optical Clock Configuration

^{1,2}김억봉, ¹박상언, ¹박창용, ¹권택용, ¹이호성, ²조혁

¹한국표준과학연구원, ²충남대학교

ubkim@kriss.re.kr

시간 및 주파수 표준으로 사용되고 있는 세슘 원자의 초미세 구조에 관한 연구는 많은 분야에서 계속적인 연구가 진행되어왔다. 특히 세슘 원자의 초미세구조들 간의 초정밀 주파수 측정에 관한 연구는 정확한 물리 상수 측정과 중력 가속도 측정과 같은 실험에 있어서 중요한 역할을 담당하였다. 또한 세슘 원자 D₂ 전의선(transition line)중 $F_g=4 \rightarrow F_e=5$ 전의선의 절대 주파수 값은 레이저를 이용한 원자의 포획과 원자시계에 관한 연구에 있어서 매우 중요한 역할을 한다. 초미세구조의 초정밀 측정을 실험실 수준의 작은 공간에서 측정 가능하게 된 계기는 최근에 개발된 펄스초 모드록 레이저를 이용한 광빔 기술과 비선형 광섬유의 발전 때문이다. 이러한 광빔 기술을 이용하여 독일의 MPQ에서는 세슘 원자 셀을 기반으로 하여 세슘 원자의 D₂ 전의선의 절대 주파수를 측정하였고, NIST에서는 원자 빔을 이용하여 같은 전의선 들의 절대 주파수를 측정하였다. 이들의 결과는 D₂ 전의선중 $F_g=4 \rightarrow F_e=5$ 전의선의 절대 주파수를 제외하면 일정 불확도 내에서 잘 일치하였다.

본 연구에서는 세슘 원자의 D₂ 전의선 중 $F_g=4 \rightarrow F_e=5$ 전의선의 절대 주파수를 반도체 레이저를 이용한 광빔 증폭기술과 광시계 방법을 이용하여 측정하였다. 반도체 레이저가 광빔의 여러 모드 중 한 모드에 주입 잠금 되도록 하여 광빔의 한 모드들 증폭하였다. 그 결과 광빔과 측정될 레이저 사이의 맥놀이 신호비를 손쉽게 높일 수 있었다. 그리고 주파수 측정 시에 광시계 방법⁽²⁾을 적용하여 광주파수 합성기 방법⁽¹⁾에서 위상 잡음이 증가하는 문제를 최소화하였다. 일반적인 광주파수 합성기를 이용한 절대 주파수 측정은 다음과 같은 결과 식으로 표현될 수 있다.

$$f_{laser} = n f_{rep} \pm f_{ceo} \pm f_{beat}$$

여기서, n 은 정수이며 약 $10^5 \sim 10^6$ 값을 갖는다. 그리고 f_{rep} 는 펄스초 레이저 공진기 길이에 반비례하는 반복률이고, f_{ceo} 는 공진기내의 위상속도와 군속도차이에 의해서 발생하는 주파수 편이이며, f_{beat} 는 레이저와 광빔 사이의 맥놀이 신호이다. 펄스초 레이저의 반복률은 마이크로파 주파수 기준기(H-maser)에 위상 안정화된 신호발생기에 의하여 위상 안정화된다. 하지만 광 영역에서의 광빔은 반복률에 정수 n 값이 곱해진 값이 된다. 이것은 마이크로파 영역에 작은 위상 잡음이 광 영역에서는 n 값이 곱해진 만큼 커지는 결과를 낳는다. 하지만 광시계 방법은 광 영역의 맥놀이 신호를 가지고 직접적으로 반복률을 제어하기 때문에 이러한 문제를 최소화 할 수 있다.

그림 1은 광시계 방법을 이용한 세슘 원자 D₂ 전의선의 절대주파수 측정을 위한 실험 장치도이다. 이때 외부공진기 반도체 레이저 (ECDL)는 세슘 D2 전의선중 $F_g=4 \rightarrow F_e=5$ 전의선에 변조전달 분광법을 이용하여 안정화되었다.

그림 2는 펄스 레이저의 광빔의 한 성분에 광주입 잠금된 DBR 반도체 레이저와 ECDL의 출력 사이의 맥놀이 신호를 보여주고 있다. 정밀한 간섭계를 구성하지 않아도 손쉽게 300 kHz 분해 범위 (resolution bandwidth)에서 약 40 dB이상의 신호를 얻을 수 있었다.

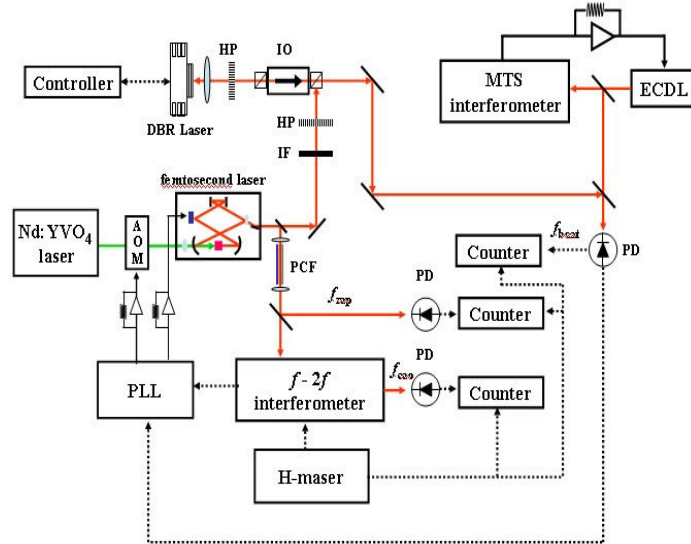


그림 1 광시계 방법을 이용한 세슘 원자의 D_2 전의 선중 $F=4$ $F=5$ 전의 선의 절대주파수 측정을 위한 실험장치도

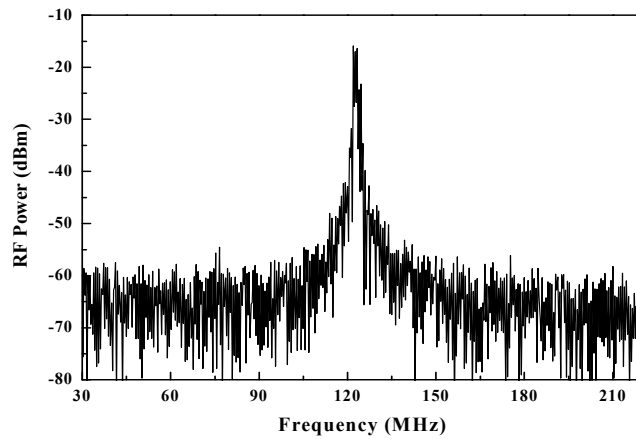


그림 2. 광주입 잠금된 DBR 반도체레이저와 ECDL 반도체 레이저 사이의 맥놀이 신호. 분해 범위는 약 300 kHz.

참 고 문 헌

(1) D. J. Jones, S. A. Diddams, et al., *SCIENCE*. **288**, 635-639 (2000).
 (2) L-S. Ma, L. Robertsson et al., *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **52**, 232-235 (2003).