

# 펨토초 모드록 레이저를 이용한 광주파수의 절대 측정

## Absolute Optical Frequency Measurement with Femtosecond Mode-Locked Laser

윤태현

광주파수 제어 연구단, 한국표준과학연구원, 대전시 유성구 도룡동 1  
thyoon@kriss.re.kr

현대 측정 과학의 많은 분야에서 널리 사용되고 있는 광주파수 측정기술(optical frequency metrology)은 높은 측정 정확도와 분해능을 얻기 위해 주파수 안정화된 광원의 연구, 광주파수의 절대 측정, 및 고분해 레이저 분광학의 발전을 가져왔다. 최근에는  $5 \times 10^{14}$  Hz 정도의 주파수를 가지는 붉은색 가시광선 레이저의 주파수를 수 mHz 이하로 안정화시킬 수 있는 기술이 개발되어, 대략  $10^{17}$ 의 분해능 동력학 영역을 보이고 있다.<sup>(1)</sup> 이러한 광주파수 측정학은 이제 새로운 전기를 맞고 있다. 그것은 대략 40여 년간 레이저를 이용한 광주파수 제어에 기반을 둔 광주파수 측정학에서 불가능하게 여겨졌던 “실시간적으로 광주파수를 절대 측정” 할 수 있는 기술이 가능해 졌기 때문이다.<sup>(2-4)</sup> 이것은 시간공간에서 발달해온 극초단 펄스 레이저 발생기술과, 주파수 공간에서 발달해온 고정도 주파수 안정화 기술이 융합하여, 펨토초 모드록 레이저의 광빗(optical comb) 성분의 광주파수를 세습 주파수 표준기를 이용하여 안정화 함으로써 가능하게 되었다. 이러한 최근의 연구 결과를 볼 때 실용적인 광시계(optical clock)와 광주파수 합성기의 개발이 멀지 않은 장래에 이루어질 것으로 예측되고 있다. 또한 다중 양자 천이선을 이용한 coherent quantum control에 대한 가능성도 제시한다.<sup>(5)</sup> 본 논문에서는 이러한 새로운 광주파수 측정 기술에 대한 간단한 이론과 실험결과를 소개하고 앞으로의 전망에 대하여 논의한다.

위에서 설명한 극초단(시간) 기술과 고안정도(주파수) 기술의 융합은 펨토초 모드록 레이저, 즉 다중 모드 레이저의 종모드가 모드록킹 과정을 거쳐 일정한 시간 간격을 가지는 연속적인 극초단 펄스를 발생시키는 원리에 기인한다. 만약, 펨토초 레이저가 레이저 공진기의 왕복시간  $\tau$ 마다 펨토초 폭을 갖는 펄스를 발생시킨다면, Fourier 변환에 의해 주파수 공간에서는 일정한 주파수 간격  $f_{rep} = 1/\tau$ 을 가지는 불연속 스펙트럼, 즉 광빗 스펙트럼을 갖게 됨을 쉽게 알 수 있다. 여기서 연속적으로 발생하는 주기적인 펄스 간격은 주파수 공간에서 주기적인 광빗의 주파수 분해능에 해당되고 펄스의 폭은 대략 발생한 광빗의 전체 스펙트럼 폭을 결정한다. 그러나, 펄스폭이 펨토초 가까이되면 각 펄스의 진폭안에 전자기파의 진동이 대략 10개 이하로 되기 때문에 진폭을 결정하는 펄스 모양과 실제 전자기파의 진동위상이 각 펄스마다 다르게 되는데 이는 공진기 내에서 진행되는 광 펄스의 위상속도와 그룹속도가 다르기 때문이다. 이러한 영향은 pulse-to-pulse phase slip (PS)  $\Delta\phi$ 를 발생시키게 된다. 주파수 공간에서는, 이 PS가 모든 광빗 성분에 같은 주파수 편이  $\delta$ 를 주게 되는데, 이때  $\delta = \Delta\phi f_{rep}/2\pi$ 의 관계가 성립한다. 이러한 간단한 이론적 고찰을 통해 우리는 어떻게 주파수 공간에서  $f_{rep}$ 과  $\delta$ 를 제어함으로써 모든 광빗의 광주파수 성분을 제어할 수 있고, 반대로 시간 공간에서는 펄스 진폭에 대한 전자기파의 위상 편이  $\Delta\phi$ 를 제어할 수 있는지 알 수 있다. 이때 중요한 것은 주파수 공간에서  $f_{rep}$ 과  $\delta$  모두 현재 가장

발달한 전자기술로 제어가 가능한 마이크로파 영역에 (수백 MHz) 속하므로  $f_{rep}$ 과  $\delta$ 를 세습 주파수 표준기를 이용하여 쉽게 안정화시킬 수 있다는 점이다. 이렇게 함으로써 펨토초 모드록 레이저에서 발생한 모든 광빔 성분의 주파수를 간단히 안정화시킬 수 있으며, 각 성분의 주파수는  $f_n = nf_{rep} + \delta$  ( $n$ 은 정수 대략  $10^6$ )의 간단한 식으로 표현됨을 알 수 있다. 현재 이러한 광빔 스펙트럼은 대략 500 nm에서 시작하여 1100 nm 이상(즉 광주파수의 한 옥타브(octave) 이상)에서 photonic air-gap fiber(PAF)를 이용하여 발생시킬 수 있으며, 각각의 광빔 성분의 주파수를 1 Hz 이하로 안정화시킬 수 있다.

주파수 안정된 펨토초 모드록 레이저를 이용한 새로운 광주파수의 절대 측정 원리는 매우 간단하다. 측정할 광주파수 표준기의 주파수를  $f$ 라 하면  $f = 2f - f = n \times f_{rep} + \delta$ 라는 간단한 관계식을 이용한 것이다 ( $n$ 은 정수 대략  $10^6$ ). 여기서  $f$ 와  $2f$ 는 모두 광주파수 영역에 속하고,  $2f$ 는 그림 1에서 처럼 비선형 결정을 이용하여 간단히  $f$ 로부터 발생시킬 수 있다. 그리고  $2f - f$ , 즉  $f$ 와  $2f$  사이의 주파수 간격은 위에서 설명한 주파수 안정화된 펨토초 모드록 레이저를 이용하면 간단히 측정할 수 있다. 그림 1에는 이러한 원리를 이용하여 구현된 1064 nm Nd:YAG 레이저의 주파수를 절대 측정한 실험 장치를 보여준다.<sup>(2,6,7)</sup> 펨토초 모드록 레이저의 스펙트럼은 15 fs의 펄스폭인 경우 대략 30 nm이며, 5 cm의 PAF를 통과하면 500 nm - 1100 nm 이상의 광대역 스펙트럼을 갖고 있다. 이때  $f_{rep} = 100$  MHz 이었고  $\delta$ 는 능동 제어하지 않았다.  $\delta$ 를 능동제어 하려면 (시간 공간에서는  $\Delta\phi$ 를 제어하는 것과 동일) 적외선 영역의 광빔 성분을 2차 조화파 발생시켜 녹색 영역의 광빔 성분과의 맥놀이 주파수를 측정하여  $\delta$ 를 측정 한 후 Cs 원자시계를 이용하여  $f_{rep}$ 와 같이 안정화시키면 되는 데 이를 self-referenced optical comb 발생기라 부르며 참고문헌 3에서 처음 구현되었다. 본 시스템의 주파수 측정 정확도는  $1 \times 10^{-13}$  이상이며 Nd:YAG 레이저 및 He-Ne 레이저 주파수의 절대값 측정 결과는 학회에서 발표한다.

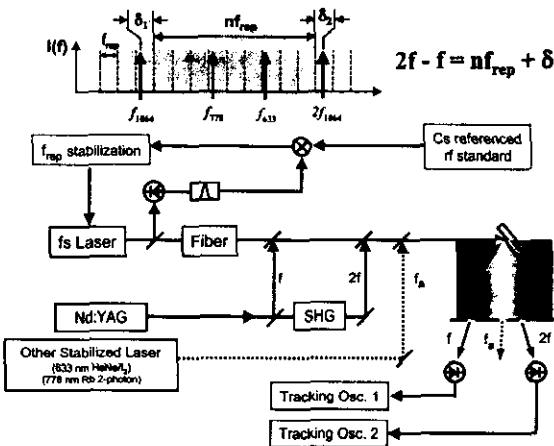


그림 1. 주파수 안정화 펨토초 모드록 레이저를 이용한 광주파수 절대 측정 장치. 새로운 광주파수 절대측정에서는  $f = 2f - f = n \times f_{rep} + \delta$  라는 식을 이용한다. 같은 방법으로 주파수가  $f$  와  $2f$ 에 속하는 어떠한 광주파수 표준기의 주파수 절대값을 측정할 수 있다.

참고문헌

1. S. T. Cundiff, J. Ye, and J. L. Hall, Rev. of Sci. Inst. (in press) (2001).
2. S. A. Diddams *et al.*, Phys. Rev. Lett. **84**, 5102 (2000).
3. D. J. Jones *et al.*, Science **288**, 635 (2000).
4. Th. Udem *et al.*, Opt. Lett. **24**, 881 (1999); Th. Udem *et al.*, Phys. Rev. Lett. **82**, 3568 (1999).
5. T. H. Yoon *et al.*, Phys. Rev. A **63**, 011402(R) (2001).
6. J. Ye, T. H. Yoon *et al.*, Phys. Rev. Lett. **85**, 3797 (2000); T. H. Yoon *et al.*, Appl. Phys. B **72**, 221 (2001).