

정밀 거리 측정용 광주파수 합성기; 개발 및 응용

Optical Frequency Synthesizer for Precision Length Metrology; Development and Applications

진종한, 김영진, 김윤석, 현상원, 김승우

한국과학기술원 BUPE연구단

jonghan@kaist.ac.kr

광간섭 원리를 바탕으로 하는 거리 측정은 길이 표준에 소급성을 갖고 높은 측정 불확도로 측정할 수 있는 장점을 갖는다. 특히 이런 광간섭법에서는 파장을 기준으로 하여 거리를 측정하므로 측정 불확도는 파장의 안정도에 직접적으로 영향을 받는다. 현재 정밀 변위 측정에서 널리 사용되고 있는 약 632.8 nm의 파장을 갖는 안정화된 He-Ne 레이저는 $10^{-9} \sim 10^{-10}$ 정도의 파장 안정도를 갖는다. 본 논문에서는 안정화된 펨토초 레이저의 광 빔(optical comb)과 외부 공진기 다이오드 레이저(external cavity diode laser, ECLD)로 구성된 광주파수 발생기를 정밀 길이 측정용으로 제안 및 구현하였고, 765 nm ~ 781 nm 사이의 파장 가변 범위에서 6.1×10^{-12} (10 s)의 파장 안정도를 얻을 수 있었다. 이를 통해 상대 변위 측정은 물론 여러 안정화된 파장이 요구되는 절대 거리 측정에도 적용하여 광주파수 발생기의 정밀 길이 측정에의 적용 가능성을 검증하였다.

광주파수 발생기의 구성 부분인 펨토초 레이저의 광 빔은 주파수 표준 중의 하나인 루비듐(Rb) 원자 시계에 주파수 모드간 간격인 반복률(repetition frequency)과 공진기 내부의 분산에 의해 생기는 오프셋 주파수(offset frequency)를 측정 및 잠금하여, 이를 수백 nm의 광대역 파장 영역에서의 표준 자(ruler)로 사용하였다. 실제 길이 측정용 광원으로는 평균 12 mW의 높은 광량과 300 kHz이하의 좁은 선폭을 갖고 있으며 765 nm부터 781 nm까지인 약 20 nm의 파장 가변이 가능한 외부 공진기 다이오드 레이저를 채택하였다. 이 때 파장 가변 외부 공진기 다이오드 레이저의 주파수는 안정화된 펨토초 레이저의 광 빔과의 맥놀이 주파수를 통해 측정할 수 있을 뿐만 아니라 맥놀이 주파수를 일정한 값으로 잠금함으로써 높은 파장 안정도를 갖는 파장을 발생시킬 수 있다. 이를 정밀 길이 측정에 적용하면, 광주파수 발생기만으로도 높은 측정 불확도로 주파수 표준에 소급하여 상대 변위 및 절대 거리 측정을 수행할 수 있다.⁽¹⁾

Figure. 1 은 정밀 거리 측정용 광주파수 합성기의 전체 구성도이다. 이는 크게 펨토초 레이저의 안정화 부분, 외부 공진기 다이오드 레이저와 안정화된 펨토초 레이저의 광 빔의 간섭을 통해 구현되는 광주파수 발생기 부분, 정밀 거리 측정을 위한 간섭계 부분으로 나누어져 있다. 펨토초 레이저의 안정화는 반복률과 오프셋 주파수를 제어하고자 하는 기준 주파수와 함께 위상 잠금 회로(phase locked loop, PLL)에 넣음으로써 원하는 기준 주파수로 루비듐 원자 시계에 소급하여 제어할 수 있다. 이 때 오프셋 주파수는 자기 상관 간섭인 $f-2f$ 간섭계를 이용하여 측정할 수 있고, 이를 위해 광결정 광섬유(photonic crystal fiber)를 통해 펨토초 레이저의 대역폭을 넓히게 된다. 외부 공진기 레이저 다이오드는 파장 측정기를 통해 분해능이 8 MHz(0.016 fm)로 대략적인 파장 제어가 이루어지고, 안정화된 펨토초 레이저의 광 빔을 통해 미세한 파장 제어 및 잠금이 이루어진다. Figure. 2는 앞서 언급한 방법으로 원하는 파장을 안정하게 얻을 수 있는 광주파수 발생기의 광학 구성도이다. 광주파수 발생기로부터 파장 제어가 이루어진 빛은 정밀 거리 측정을 위한 마이켈슨(Michelson) 형태의 간섭계 부분으로 입사하게 된다. 간섭계의 검출부에서 얻어진 간섭 신호 및 무늬에 헤테로다인(heterodyne) 검출법 혹은 푸리에 변환

(Fourier transform)방법을 적용함으로써 위상을 구할 수 있으며, 이를 통해 거리를 계산해낼 수 있다.

Figure. 3은 상대변위 측정을 위해 781 nm의 파장에서 측정면을 100 μm씩 움직이면서 그에 따른 위상의 변화를 나타낸 것이다. 전체 측정범위 1100 μm에서 선형성은 0.99994이며 각 측정점들은 선형 보간된 직선으로부터 표준편차 0.012 rad이내에 포함되었다. 그리고 절대 거리 측정을 위해 파장 쓸기 간섭계(wavelength sweeping interferometer) 원리를 적용하여, 25 mm의 단차를 세 번 측정하여 얻은 평균값은 24.996921 mm이며, 측정 반복능은 3 nm (P.V.)이고 측정 불확도는 100 nm이내 이다⁽²⁾.

본 연구단에서는 펨토초 레이저를 기반으로 하는 광주파수 발생기를 구현하여 765 nm ~ 781 nm의 파장 가변 범위에서 6.1×10^{-12} (10 s)의 파장 안정도를 구현하였고, 이를 통한 상대 변위 측정 및 절대 거리 측정을 실제 수행하여 정밀 거리 측정에서의 새로운 광원으로써 광주파수 발생기를 제안 하였으며, 이를 실제 거리 측정을 통해 검증하였다.

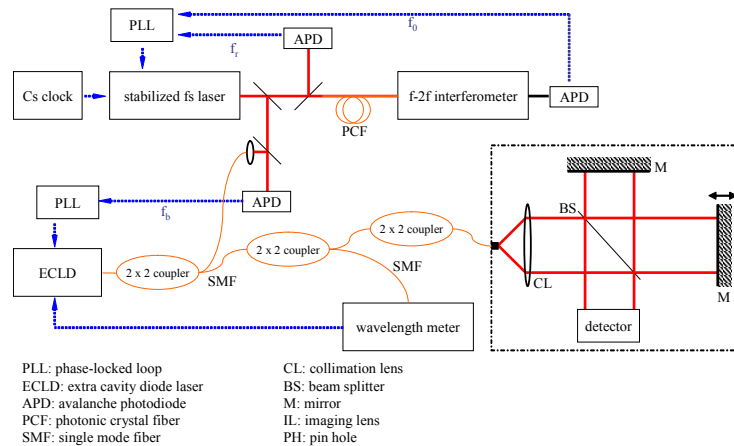


Fig. 1 System configuration of optical frequency generator for precision length metrology

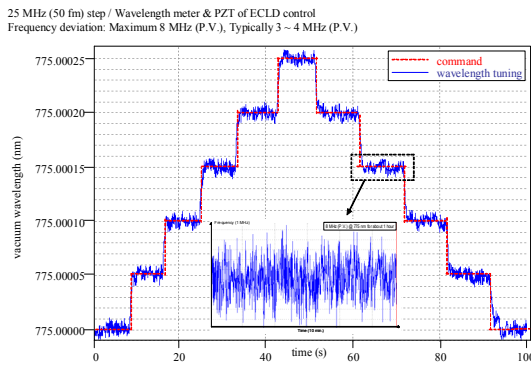


Fig. 2 Precision wavelength tuning of an optical frequency generator

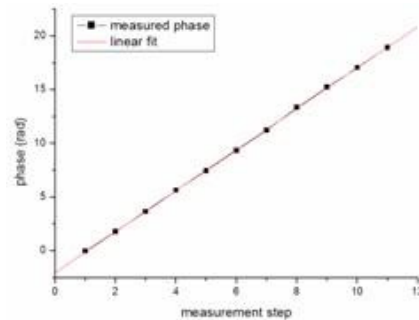


Fig. 3 Phase measurement of a monochromatic interferometer

참고문헌

(1) J. Jin, Y.-J. Kim, Y. Kim, S.-W. Kim and C.-S. Kang, "Absolute length calibration of gauge blocks using optical comb of a femtosecond pulse laser," Opt. Express, Vol. 14, No. 13, pp. 5968-5974, 2006.
 (2) Jonghan Jin, Young-Jin Kim, Yunseok Kim, and Seung-Woo Kim, "Absolute Distance Measurements Using the Optical Comb of a Femtosecond Pulse Laser," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2007. (accepted)