

## 정밀 길이 측정을 위한 광 주파수 합성기의 구현

## Optical Frequency Synthesizer

## for Precision Length Metrology

김영진, 진종한, 김승우

KAIST BUPE연구단

lovemonk@kaist.ac.kr

절대 거리(absolute distance) 측정은 두 물체 간의 거리를 한 번의 측정으로 결정하는 것을 말한다. 일반적으로 거리를 측정하기 위해 사용되는 호모다인(homodyne) 및 헤테로다인(heterodyne) 간섭계는 광원의 파장(wavelength)을 측정의 기준 자(ruler)로 사용하여 측정하기 때문에 높은 정밀도를 가진다. 그러나 거리 측정시 발생하는 위상(phase)의 모호성(ambiguity)을 극복하기 위해, 위상의 변화량을 적분하여 변위를 측정하므로 절대 거리 측정에서는 근본적인 한계를 지닌다. 절대 거리 측정에 적합한 방법으로 비행시간법(time-of-flight method)이나 세기변조법(intensity-modulation)과 같은 방법들이 연구되었으나 이러한 방법들은 비교적 낮은 정밀도를 가지기 때문에 높은 정밀도를 요구하는 분야에서의 적용이 어렵다. 이후 제안된 두파장(two-wavelengths) 혹은 다파장(multiple-wavelengths) 간섭계는 주파수 불안정성(frequency instability)에 민감하다는 한계점을 가지고 있다. 최근에는 주파수 가변(frequency tunable) 레이저 다이오드(laser diode)를 이용하여 연속적으로 주파수를 변조(modulation) 및 주사(scanning)하는 형태의 간섭계들이 연구되고 있으며, 이러한 형태의 간섭계에서도 고정밀도의 구현을 위해 주파수의 변조 혹은 주사량의 안정화 및 정확한 측정이 요구된다. 최근에 절대 광주파수 측정(absolute optical frequency measurement) 및 합성(synthesis) 분야에서 사용되는 주파수 안정화된 펨토초 모드록 레이저(frequency-stabilized femtosecond mode-locked laser)를 이용하면, 주파수의 안정도 및 정확도를 주파수 표준(frequency standard)에 해당하는 마이크로파(microwave) 영역의 원자시계(atomic clock)에 소급하여 측정 및 제어할 수 있다. 본 연구에서는 절대 거리 및 정밀 길이 측정에 적용을 목표로 하여, 외부 공진기 다이오드 레이저(external cavity diode laser)를 안정화된 펨토초 레이저 광 빛의 한 모드에 잠금(lock)하여 광주파수 합성기를 구현하였다.

펨토초 레이저의 펄스는 주파수 영역에서 일정한 간격을 가지는 모드(mode)들의 집합, 즉 광 빔(optical comb)으로 구성된다. 이러한 광 빛은 주파수 모드간 간격인  $f_r$ 과 공진기 내에서의 군속도와 위상속도의 차로 인해 발생하는 오프셋 주파수(offset frequency)  $f_o$ 로 표현할 수 있으며, 주파수 영역에서  $f_r$ 과  $f_o$ 를 제어함으로써 모든 광 빛의 주파수 성분을 정의할 수 있다.  $f_r$ 과  $f_o$ 는 마이크로파(microwave) 영역에 위치하여 세슘(Cs)이나 루비듐(Rb) 원자시계와 같은 고안정도의 주파수 표준급의 시계에 안정화될 수 있고, 이를 통해 전체 광 빛의 주파수 성분을 원자시계와 같은 정확도로 안정화할 수 있다. 본 연구에서는 루비듐 원자시계를 기준 시계로 사용하였으며, 공진기의 길이와 끝단 반사경의 각도를 조절하여  $f_r$ 와  $f_o$ 를 안정화하였다. 사용한 펨토초 레이저는 780 nm 중심 파장으로 35 fs의 펄스 폭을 가지며, 광량은 약 300 mW, 주파수 안정도는 그림 2과 같다. 이 때, 펨토초 레이저의 모드 당 광량은 15 nW 정도로 실제 간섭계에 적용하기에는 크게 부족하다. 따라서 별도의 측정용 간섭계 광원으로 12 mW의 충분한 광량을 가지는 외부 공진기 다이오드 레이저를 사용하고, 외부 공진기 다이오드 레이저의 광 주파수를 펨토초 레이저 광 빛의 한 모드에 잠금하여 그림 1과 같이 광주파수 합성기를 구현하였다.

광주파수 합성기의 주파수는 펨토초 레이저의 제어 변수인  $f_r$ ,  $f_o$ 와 안정화된 펨토초 레이저의 한 모

드와 외부 공진기 다이오드 레이저 사이의 맥놀이 주파수  $f_b$  및 파장 측정기(Angstrom, WS Ultimate 30Lt)를 통해 결정되는 정수  $i$ 를 이용하여  $f_{ECLD} = i \cdot f_r + f_o \pm f_b$  로 정의된다. 측정용 간섭계 광원으로 사용된 주파수 가변 다이오드는 765 nm~781 nm의 파장 가변 폭을 가지며, 300 kHz의 선폭을 가진다. 구현된 광주파수 합성기의 주파수 안정도는 그림 3과 같다.

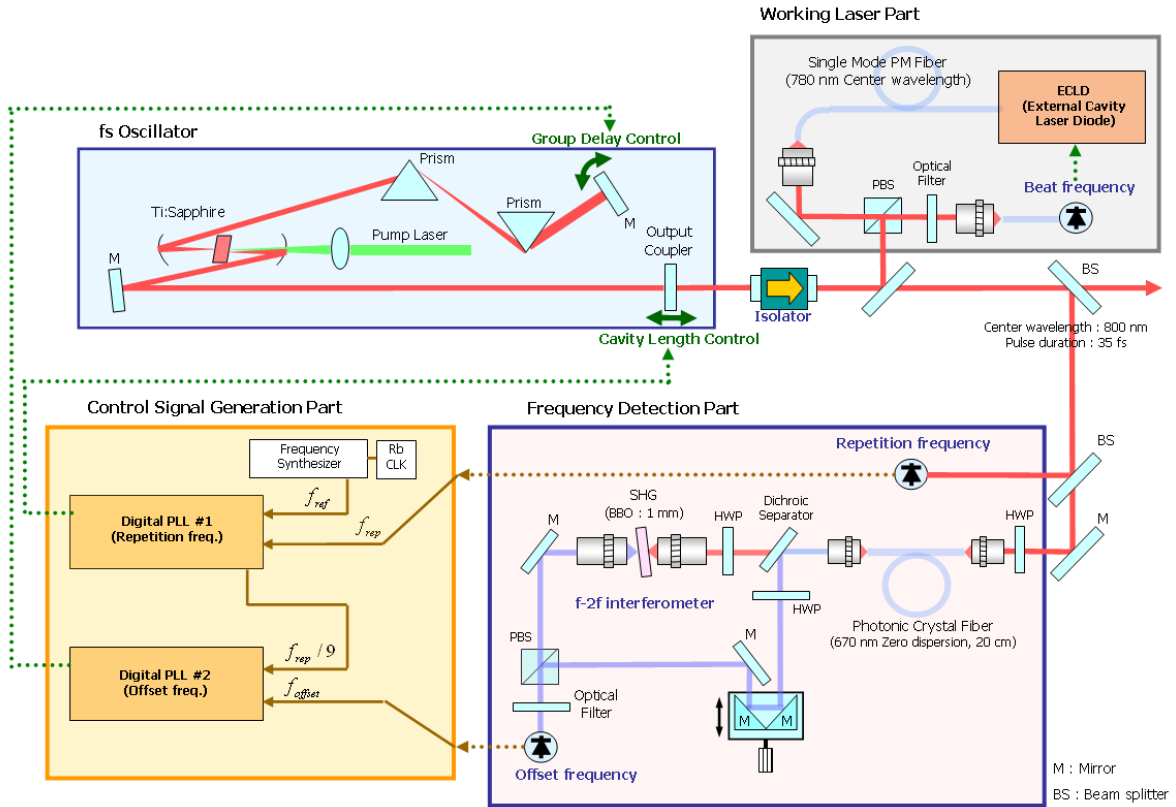


Fig 1 Schematic of the optical frequency synthesizer

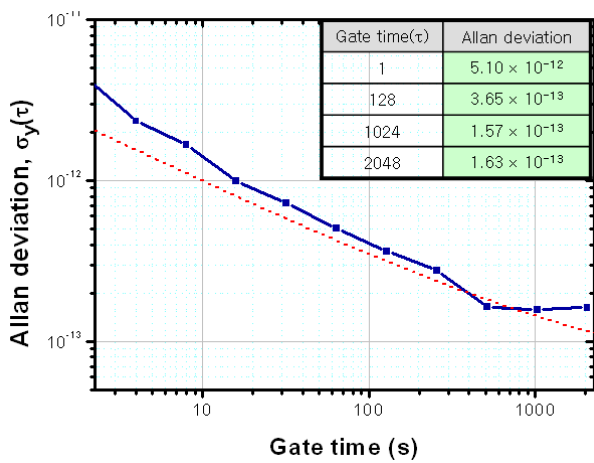


Fig 2 Allan deviation of stabilized repetition rate

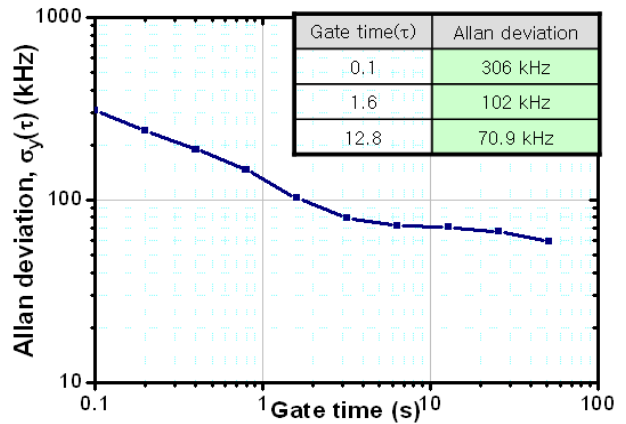


Fig 3 Allan deviation of stabilized ECLD