

정밀 광주파수 합성기의 개발 Development of the precision optical frequency synthesizer

*김영진, 진종한, 김윤석, 현상원, #김승우
* Y.-J. Kim, J. Jin, Y. Kim, S. Hyun, S.-W. Kim(swk@kaist.ac.kr)
KAIST BUPE 연구단

Key words : Optical frequency synthesizer, Frequency comb, Absolute distance metrology

1. 서론

최근 광주파수 측정(optical frequency measurement) 분야에서 제안된 광주파수 합성기(optical frequency synthesizer)는 피측정 광원의 광주파수를 마이크로파(microwave) 영역 또는 광주파수 영역의 주파수 표준(frequency standard)에 소급하여 측정할 수 있는 가능성을 열었다. 광주파수 합성기는 주파수 안정화된 펨토초 모드잠금 레이저(frequency-stabilized femtosecond mode-locked laser)를 통해 구현되며, 광주파수 합성기의 $10^5 \sim 10^6$ 개에 해당하는 수많은 모드들은 각각 주파수 표준에 안정화된 레이저에 해당하는 우수한 주파수 특성을 가진다. 그러나 펨토초 레이저의 광출력이 수많은 모드들로 나뉘어지면서 모드 당 출력이 μW 이하의 작은 값을 가지게 되어, 광주파수 합성기의 우수한 주파수 특성에도 불구하고 그 적용 범위를 제한 받아 왔다. 또한 거리 및 형상 측정 간섭계, 밀리미터파(millimeter wave) 및 테라헤르쯔(terahertz) 파 발생, 포화흡수분광(saturated absorption spectroscopy) 분야 등에서는 단색(monochromatic) 광 특성이 요구된다.

본 연구에서는 이와 같은 광주파수 합성기의 한계를 해결하고자, 파장가변(wavelength tunable) 외부 단색광원을 광주파수 합성기에 안정화하여 광출력과 단색광 특성을 해결한 외부광원형 광주파수 발생기(optical frequency generator)와 광주파수 합성기의 원하는 모드를 선택한 후 주입잠금법(injection locking)을 통해 증폭하는 주입잠금형 광주파수 발생기를 제안한다. 이와 같은 광주파수 발생기는 우수한 주파수 정확도와 안정도를 가지며, 수 mW 이상의 광출력과 단색광 특성을 유지하는 동시에 파장가변하므로 절대거리 측정, 분광 등의 여러 분야에서 범용으로 사용될 것으로 기대된다.

2. 광주파수 합성기

펨토초 모드락 레이저는 $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ 와 같은 넓은증폭대역(gain bandwidth)을 가지는 증폭매질(gain medium)의 특성과 공진기(cavity)에서 발생하는 모든 종모드(longitudinal mode) 간의 상대 위상(relative phase)을 고정시키는 모드잠금 기술을 이용하여 펨토초의 극히 짧은 펄스 폭을 가지는 반복적인 펄스 열(train)을 만들어 낸다. 이러한 반복적인 펄스 열은 주파수 영역에서 Fig. 1 과 같이 일정한 간격을 가지는 모드들의 집합, 즉 광빗(optical comb)으로 구성된다. 광빗은 주파수 모드간 간격인 반복률, f_r 과 공진기 내에서의 군속도와(group velocity) 위상속도(phase velocity)의 차로 인해 발생하는 오프셋 주파수(offset frequency), f_o 로 표현할 수 있으며, 주파수 영역에서 f_r 과 f_o 를 제어함으로써 모든 광빗의 주파수 성분을 정의할 수 있다. 광빗의 n 번째 주파수 모드는 아래의 식과 같이 f_r 과 f_o 의 식으로 쉽게 표현된다.

$$f_n = n \cdot f_r + f_o \quad (1)$$

특히, f_r 과 f_o 는 마이크로파 영역에 위치하여 세슘(Cs)이나

루비듐(Rb) 원자시계와 같은 고안정도의 주파수 표준에 안정화 될 수 있으며, 이를 통해 전체 광빗의 주파수 성분은 기준 원자시계와 동일한 안정도로 안정화 된다.

펨토초 레이저의 반복률, f_r 은 대역폭이 큰 광검출기(photo-detector)를 통해 쉽게 측정할 수 있다. 이를 위상 잠금 회로(Phase Locked Loop : PLL)를 통해 제어신호를 얻어 레이저 공진기의 길이를 조절함으로써 원자시계에 잠금한다. 오프셋 주파수, f_o 는 $f-2f$ 간섭계를 이용하여 측정되며, 이 또한 위상 잠금 회로를 통해 제어신호를 얻어 프리즘 쌍(pair) 뒤에 위치한 거울의 기울기(tilt)를 조절하여 원자시계에 잠금된다. $f-2f$ 간섭계는 광자결정(photonic crystal) 광섬유를 이용하여 광빗의 대역을 넓힌 후, 장파장과 단파장의 빛을 이차 조화파 생성(second harmonic generation)을 이용하여 간섭시키는 형태로 구성된다. 이와 같이 반복률과 오프셋 주파수가 원자시계에 잠금되어 광빗의 모든 주파수 성분들이 안정화 되면, 이를 광주파수 영역에서의 기준 자(ruler)로 사용할 수 있게 되는데 이를 광주파수 합성기라고 한다.

3. 외부광원형 광주파수 발생기

광주파수 합성기는 수많은 모드들의 집합, 즉 광빗으로 이루어지므로 광출력이 μW 이하로 작으며 다파장의 특성을 가진다. 간섭계 및 분광 등의 분야에 적용되기 위해서는 광주파수 합성기의 우수한 주파수 정확도 및 안정도 특성과 더불어 적절한 수준의 광출력과 단색광의 특성을 확보하는 것이 요구된다. 이러한 조건을 만족시키는 방법 중의 하나가 적절한 광출력과 단색광의 외부광원을 광주파수 합성기에 안정화 시키는 것이다.

Fig. 1 은 이러한 외부광원형 광주파수 발생기의 개념도이다. 외부광원과 광주파수 합성기를 간섭시키면 외부광원의 광주파수, f_{wl} 와 광빗의 각 모드들의 광주파수 차에 해당하는 맥놀이 주파수(beat frequency)들을 얻어낼 수 있으며, 이 중 가장 낮은 맥놀이 주파수를 선택하여 f_b 로 정의하면, f_{wl} 은 식 (2)와 같이 결정된다.

$$f_{wl} = n \cdot f_r + f_o + f_b \quad (2)$$

f_r 과 f_o 는 광주파수 합성기에서 원자시계에 안정화된 값이므로, 남은 주파수 성분인 f_b 를 원자시계에 안정화 시키면 외부광원의 주파수 f_{wl} 이 원자시계에 안정화되게 된다. 정수 n 은 별도의 파장 측정기(wavelength meter)에서 결정된다.

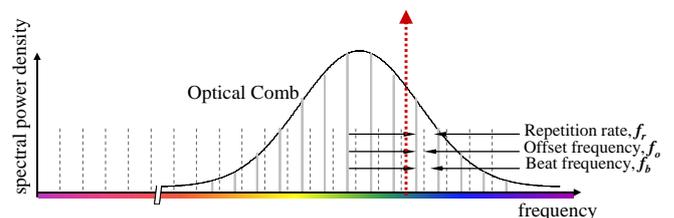


Fig. 1 Conceptual schematic of optical frequency generator adopting external laser

4. 주입잠금형 광주파수 발생기

주입잠금(injection locking)법은 주로 광출력이 약하나 주파수 특성이 우수한 광원을 적절한 광출력의 광원에 입사시킴으로써, 입사시킨 광원의 우수한 주파수 특성을 가지는 동시에 입사된 광원의 광출력을 가지는 광원을 얻는 방법이다. 광주파수 합성기의 원하는 하나의 모드를 선택한 후 이를 적절한 광출력의 다이오드 레이저에 입사시키면, 다이오드 레이저는 자신의 자발방출(spontaneous emission)에 의한 주파수가 아닌 입사된 광주파수 합성기의 주파수로 발진하게 된다. 이를 통해 적절한 광출력과 단색광 조건을 만족시키는 광주파수 발생기를 구현할 수 있다. 이러한 주입잠금형 광주파수 발생기는 입사된 광주파수 합성기의 선폭과 주파수 특성을 유지하게 되므로, 안정도 및 선폭(linewidth)의 측면에서 외부광원형 광주파수 발생기에 비해 우수한 특성을 보이며, 별도의 위상잠금회로 없이 다른 광주파수 대역으로 확장 가능한 장점이 있다.

5. 실험 구성 및 결과

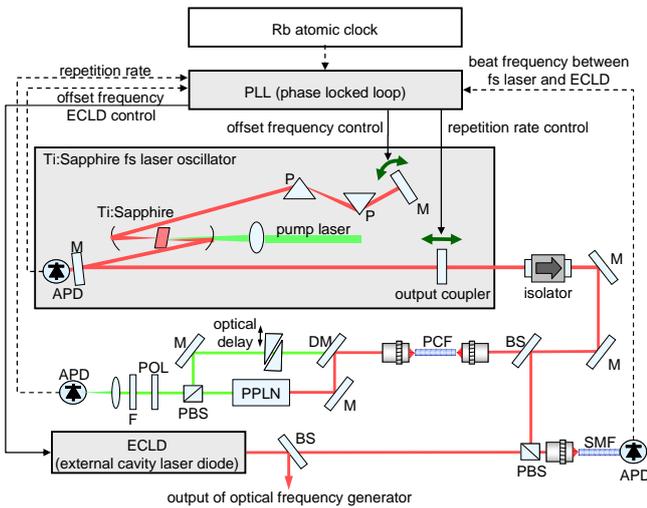


Fig. 2 Schematic diagram of the optical frequency generator adopting ECLD as a working laser

Fig. 2는 ECLD(external cavity diode laser)를 외부광원으로 이용한 외부광원형 광주파수 발생기의 구성도이다. 구성은 크게 광주파수 합성기와 외부광원의 안정화 부분으로 나뉜다. 사용한 펄스 레이저는 800 nm 중심파장의 Ti:Al₂O₃ 레이저로 80 MHz의 반복률, 35 fs의 펄스폭과 300 mW의 광출력을 가진다. f_r과 f₀는 각각 광검출기와 f-2f 간섭계를 통해 측정되어, 위상잠금회로를 통해 루비듐 원자시계에 안정화 되었다. 이와 같이 구성된 광주파수 합성기의 주파수 안정도는 Fig. 3 과 같다. 사용된 ECLD는 파장가변 영역인 765~781 nm에서 가변이 가능하며, 이를 광주파수 합성기에 안정화하여 얻은 외부광원형 광주파수 합성기의 안정도는 Fig. 4 와 같다.

Fig. 5는 주입잠금형 광주파수 발생기의 구성도이다. 광주파수 합성기의 모드 중 원하는 모드만이 패브리페로 간섭계와 회절격자 및 광섬유 시스템을 통하여 선택되며, 선택된 모드는 광출력원인 다이오드 레이저로 입사된다. 이때, 광출력원의 되먹임광(optical feedback)을 제거하기 위하여 광단절기(isolator)가 사용되었다. 사용된 다이오드 레이저는 800 nm의 중심파장과 15 nm 정도의 파장가변 폭을 가진다.

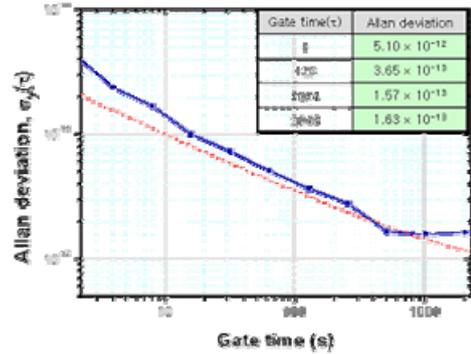


Fig. 3 Allan deviation of developed optical frequency synthesizer

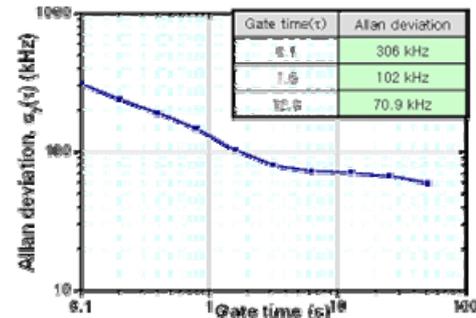


Fig. 4 Allan deviation of developed optical frequency generator adopting ECLD as a working laser

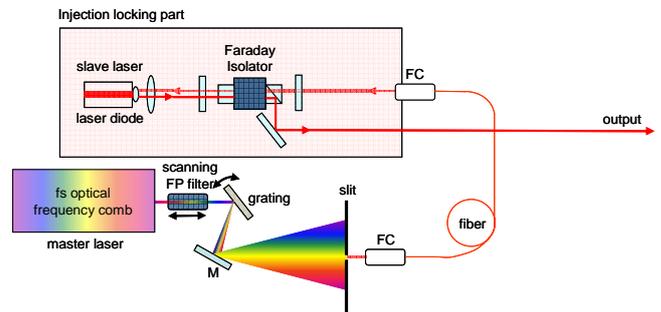


Fig. 5 Schematic diagram of the optical frequency generator based on injection locking

5. 결론

본 연구에서는 주파수 표준의 하나인 루비듐 원자시계에 안정화된 광주파수 합성기를 기반으로 하여, 수 mW의 적절한 광량과 단색광 특성을 가지는 광주파수 발생기를 제안하고 개발하였다. 이와 같은 광주파수 발생기는 우수한 주파수 정확도 및 안정도를 바탕으로 절대거리 측정 및 분광과 같이 높은 정확도와 파장가변 특성이 요구되는 분야에서 범용으로 사용 가능한 우수한 광원으로 자리잡을 것으로 기대한다.

후기

본 연구는 과학기술부 창의적 연구 진흥 과제(Creative Research Initiative, CRI)의 지원을 받아 한국과학기술원 BUPE(Billionth Uncertainty Precision Engineering) 연구단에서 수행되었습니다.

참고문헌

1. Jin J., Kim Y.-J., Kim Y., Kang C.-S., Kim S.-W., "Absolute length calibration of gauge blocks using optical comb of a femtosecond pulse laser," Opt. Exp., **14**(13), 5968-5974, 2006.