

펨토초 레이저 광 빔 기반 광대역 광주파수 발생기 A Wide-range Optical Frequency Generator based on the Optical Frequency Comb

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

Key words : Optical frequency generator, Optical frequency comb, Absolute distance metrology

1. 서론

최근 광주파수 측정 분야에서 개발된 펨토초 레이저 광 빔(optical frequency comb)은 피측정 광원의 광주파수를 마이크로파(microwave) 영역에 위치한 주파수 표준에 직접 소급하여 측정할 수 있는 가능성을 열었다. 광 빔은 주파수 안정화된 펨토초 모드잠금 레이저(femtosecond mode-locked laser)를 통해 구현되며, $10^5 \sim 10^6$ 개에 해당하는 광 빔의 수많은 주파수 모드들 각각은 주파수 표준에 안정화된 레이저에 해당하는 우수한 안정도 특성을 가진다. 이는 차세대 광시계 개발, 분광학 및 정밀 길이/거리 측정 등의 다양한 분야에서 이미 핵심 광원으로써 중요하게 사용되고 있으며, 최근에는 광 빔을 기준으로 원하는 임의의 단일 광주파수를 생성하는 광주파수 발생기가 제안/개발됨으로써 그 적용범위를 더욱 넓혀가고 있다.

펨토초 레이저 광 빔 기반 광주파수 발생기는 다음의 두 가지 기능을 만족시킬 수 있어야 한다. 먼저 광 빔으로부터 원하는 하나의 모드만을 추출할 수 있어야 하며, 다음으로 추출된 모드를 추가적인 위상잡음 없이 수 mW 이상의 광출력을 가지도록 증폭할 수 있어야 한다. 이러한 과정에서 광 빔의 높은 안정도 및 좁은 선폭 특성을 그대로 유지하는 것 역시 필수적이다. 초기의 광주파수 발생기는 파장가변 외부광원을 광 빔에 잠금함으로써 구현되었다. 이와 같이 구현된 광주파수 발생기는 넓은 파장 가변영역에서 단일 광주파수를 생성할 수 있었지만, 선폭 및 안정도 측면에서 일정 정도의 손실을 겪었다.

본 연구에서는 광 빔의 원하는 모드만을 선택/추출한 후 이를 증폭하여 원하는 단일 광주파수를 생성하는 모드 증폭형 광주파수 발생기를 제안한다. 이와 같은 광주파수 발생기는 우수한 주파수 정확도와 안정도를 가지며, 수 mW 이상의 광출력과 단색광 특성을 유지하는 동시에 파장 가변하므로 정밀 분광학, 광주파수 측정/표준 및 절대거리 측정 등의 여러 분야에서 범용으로 사용될 것으로 기대된다.

2. 모드 증폭형 광주파수 발생기

모드 증폭형 광주파수 발생기는 Fig. 1 과 같이 크게 펨토초 레이저 광 빔과 모드 추출부 그리고 광출력 증폭부의 세 부분으로 구성된다.

먼저 펨토초 모드잠금 레이저는 $Ti:Al_2O_3$ 와 같이 넓은 증폭대역을 가지는 증폭매질(gain medium)의 특성과 수많은 모드의 상대위상을 일정하게 유지하는 모드잠금 기술을 통해 펨토초의 극히 짧은 펄스 폭을 가지는 반복적인 펄스 열(train)을 만들어 낸다. 이러한 반복적인 펄스 열은 주파수 영역에서 일정한 간격을 가지는 모드들의 집합, 즉 광 빔으로 구성된다. 광 빔의 모든 주파수 성분은 주파수 모드간 간격인 반복률(repetition rate)인 f_r 과 공진기 내에서의 군속도와(group velocity) 위상속도(phase velocity)의 차로 인해 발생하는 오프셋 주파수(offset frequency), f_o 를 통해 Fig. 1 의 아래쪽 식과 같이 정의된다. 특히, f_r 과 f_o 는 마이크로파

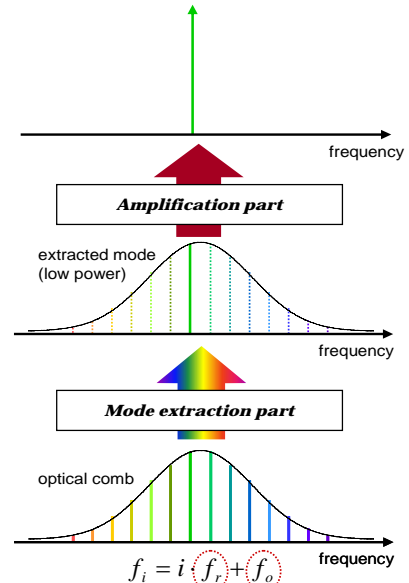


Fig. 1 Conceptual diagram of the OFGenerator based on the mode amplification

영역에 위치하므로 세슘(Cs) 혹은 루비듐(Rb) 원자시계와 같은 고안정도의 주파수 표준에 직접 안정화 될 수 있으며, 이를 통해 모든 광 빔의 주파수 모드를 기준 원자시계와 동일한 수준의 안정도로 제어되며, 안정화된 광 빔의 단일 모드는 1 Hz 이하 수준의 좁은 선폭을 가짐이 알려져 있다.

모드 추출부는 수많은 광 빔의 주파수 모드들 중에서 원하는 단일 모드만을 선별하는 역할을 한다. 단일 광학필터를 이용하여 광 빔의 넓은 대역폭으로부터 원하는 하나의 모드만을 추출하는 것은 현재까지 불가능하므로, 본 연구에서는 회절격자-광섬유 필터와 가변 패브리 패롯 필터로 구성되는 이중 필터를 통해 원하는 파장대역을 선택/추출하였다.

광출력 증폭부에서는 주입잠금(injection locking) 원리를 이용하여, 추출된 모드의 광출력을 증폭하였다. 주입잠금법은 Fig. 2 와 같이 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. 따라서 이와 같은 주입잠금을 통해 추출된 모드를 증폭하면, 추출된 광 빔의 주파수 안정도 및 선폭과 같은 특성을 유지하면서, 적절한 광출력과 단색광 조건을 만족시키는 새로운

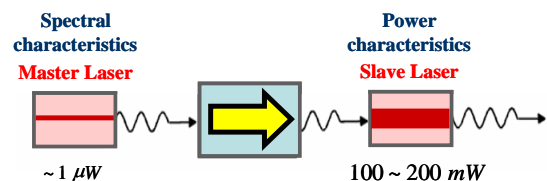


Fig. 2 Principle of the mode amplification based on the semiconductor laser injection locking

형태의 광주파수 발생기를 구현할 수 있다.

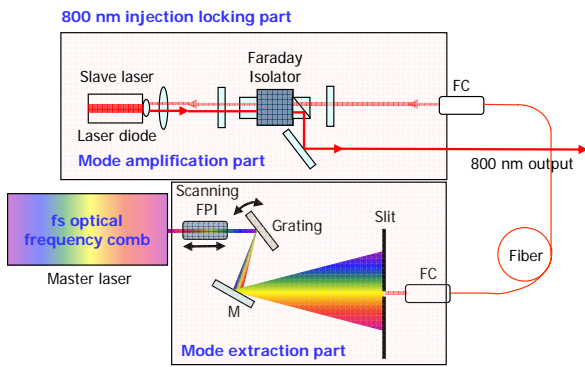


Fig. 3 Experimental configuration of the OFGenerator based on the mode amplification

3. 실험 구성 및 결과

Figure 3 은 본 연구에서 개발된 모드 증폭형 광주파수 발생기의 구성도이다. 사용한 펄스초 레이저는 800 nm 중심파장의 Ti:Sapphire 레이저로 80 MHz 의 반복률, 35 fs 의 펄스폭과 300 mW 의 광출력을 가진다. f_r 과 f_0 는 각각 광검출기와 $f-2f$ 간섭계를 통해 측정되어, 위상잠금회로(Phase Locked Loop : PLL)를 통해 주파수 안정도 기준 10^{-12} 이하 수준으로 루비듐 원자시계에 안정화 되었다.

광 빛의 안정화에 필요한 부분을 제외한 200 mW 의 광출력은 1.35 mrad/nm 의 회절능을 가지는 회절격자와 광섬유로 구성된 회절격자-광섬유 필터를 통과하게 되며, 이 과정에서 원하는 광주파수 부근의 약 100 GHz (0.2 nm) 대역폭만이 1 차적으로 추출된다. 이는 다시 10 GHz 의 자유 스펙트럼 영역(Free Spectral Range : FSR)과 67 MHz 의 투과 선폰을 가지는 가변 패브리 패롯 필터를 통과함으로써 2 차적으로 추출되며, 이는 광 빛의 반복률 이하에 해당하므로, 이를 통해 원하는 광주파수 성분만을 주로 추출할 수 있다.

선택/추출된 광 빛의 모드는 100 nW 수준의 광출력을 가지며, 이는 주입잠금을 통한 증폭을 위해 다이오드 레이저로 입사된다. 광출력원의 되먹임광(optical feedback)에 의한 효과를 제거하기 위하여 광단절기(isolator)가 사용되었다. 증폭에 사용된 다이오드 레이저는 800~810 nm 의 파장가변 대역을 갖는 무반사 코팅된 파브리 패롯 형태의 다이오드 레이저이다. 주입잠금을 통해 다른 광증폭 방법에서 구현하기 어려운 50~60 dB 수준의 높은 증폭을 구현하였다. 주입잠금은 또한 다이오드 레이저의 공진기 구조를 통해 모드 추출부에서 완전히 제거되지 않은 기생모드들을 억제하는 역할 역시 수행하게 된다.

Figure 4 는 모드 증폭형 광주파수 발생기의 주파수 특성을 평가한 결과를 보여준다. 평가는 광주파수 발생기의 주파수 정확도, 안정도 및 선폰 측면에서 진행되었으며, 이를 위해 최종 광주파수 발생기의 출력과 기준 광 빛 사이의 간섭 맥놀이 주파수를 획득하였다. Fig 4 (a), (b)는 주입잠금 전후의 맥놀이 주파수의 변화를 보여준다. 주입잠금 전에는 맥놀이 주파수의 선폰이 넓으며 빠르게 이동하는 경향을 보이나, 주입잠금 후에는 선폰이 좁아지는 동시에 맥놀이 주파수가 30 MHz 에 정확히 잠금 되었음을 확인할 수 있다. 30 MHz 의 맥놀이 주파수를 통해 광주파수 발생기의 선폰 및 주파수 안정도를 확인할 수 있으며, 이는 각각 Fig. 4 (c), (d)와 같이 세부 평가되었다. Fig. 4 (c)에서 선폰은 1 Hz 이하로, 이는 측정에 사용된 RF 스펙트럼 분석기의 분해능

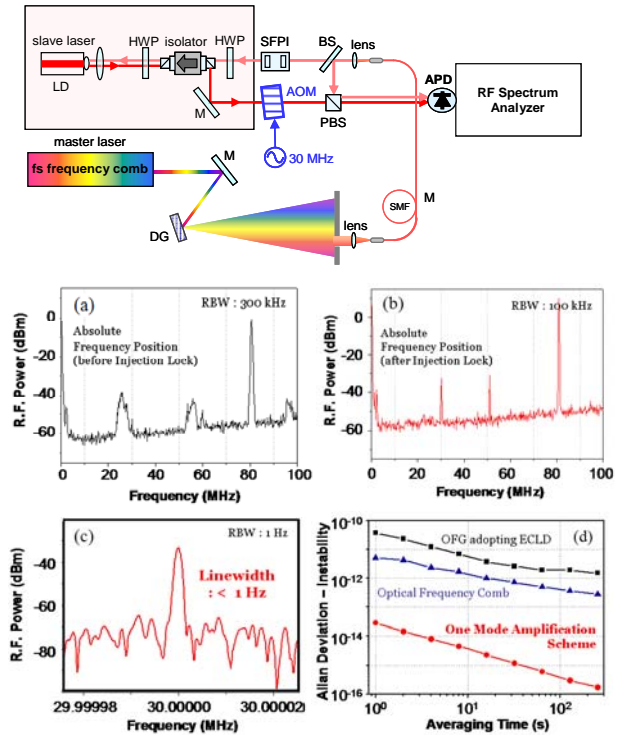


Fig. 4 Experimental configuration and results for the verification of the absolute frequency position and linewidth : The RF beat frequency (a) before and (b) after injection locking, (c) magnified beat frequency and (d) the frequency stability as an Allan deviation

한계에 해당하며, Fig. 4(d)는 주파수 안정도를 평가한 것으로 사용된 시간/주파수 표준의 안정도에 따라 10^{-15} 수준까지 그 안정도가 유지됨을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 광 빛의 우수한 주파수 특성을 유지하는 동시에 원하는 임의의 단일 광주파수를 생성할 수 있는, 모드 증폭형 광주파수 발생기를 제안/개발하였다. 개발된 광주파수 발생기는 주파수 표준의 불확도를 10^{-15} 수준까지 성공적으로 유지하며, 선폰 역시 1 Hz 이하 수준까지 유지할 수 있음을 검증하였다. 이와 같은 모드 증폭형 광주파수 발생기는 우수한 주파수 불확도와 선폰 특성을 바탕으로 정밀 분광, 시간/주파수 표준 및 절대거리 측정 등의 다양한 분야에서 극한의 성능을 실현하는 핵심적인 광원으로 자리잡을 것으로 기대된다.

후기

본 연구는 교육과학기술부 도약연구지원 사업의 지원을 받아 한국과학기술원 극초단광학 초정밀기술 연구단에서 수행되었습니다.

참고문헌

1. R. Holzwarth, Th. Udem, T.W. Hänsch, J. C. Knight, W. J. Wadsworth, P. St. J. Russell, "Optical frequency synthesizer for precision spectroscopy," Phys. Rev. Lett. **85**, pp. 2264-2267 (2000)
2. 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.
3. Y.-J. Kim, J. Jin, Y. Kim, S. Hyun, S.-W. Kim, "A wide-range optical frequency generator based on the frequency comb of a femtosecond laser," Opt. Exp., **16**, pp. 258-264, 2008.