

장시간 지속가능한 광주파수 발생기의 개발

Development of the Long-time Reliable Optical Frequency Generator Based on the Optical Comb

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

Key words : Optical frequency generator (OFG), Optical injection phase-locked loop (OIPLL)

1. 서론

광주파수 발생기(optical frequency generator)는 주파수 안정화된 펄스 레이저의 광 빔(optical frequency comb)을 이용하여 수백 THz 에 이르는 대역폭 내에서 광주파수를 자유롭게 측정하고 생성할 수 있는 광원이다.

원자시계와 같은 주파수 표준에 안정화된 펄스 레이저에서 생성된 광 빔은 $10^5 \sim 10^6$ 개의 수 많은 주파수 모드들을 가지며 각각의 주파수 모드들은 주파수 표준에 소급되는 우수한 주파수 특성을 가진다. 하지만 각각의 주파수 모드를 직접적으로 이용하기는 광량이 작다는 한계가 있어 이를 극복하며 우수한 주파수 특성을 그대로 이용하기 위해서 광 빔에서 하나의 주파수 모드를 추출 및 증폭 시켜서 이용하는 광주파수 발생기가 제안 및 개발되었다. 그러나 이러한 광주파수 발생기는 주변의 온도변화, 진동 등의 환경변화에 민감하여 구동시간의 제약이 있었다. 현재의 광주파수 발생기가 갖는 좋은 특성에 더해 긴 시간 동안 신뢰성 있는 구동이 가능한다면 거리 측정, 길이 표준, 정밀 분광 등의 산업적, 학문적 응용분야가 크게 넓어질 것이라 기대할 수 있다.

본 연구에서는 주파수 모드의 광량 증폭과 광주입위상 잠금회로(optical injection phase locked loop)를 이용해서 광주파수 발생기를 장시간 동안 신뢰성 있게 구동할 수 있는 방법을 제안하고 이를 구현하고자 한다. 이렇게 개발된 광주파수 발생기는 표준에 직접 소급되며, 높은 주파수 정확도와 좁은 선평의 빛을 발생시키는 광원으로 그 응용범위를 더욱 확장할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 기본 이론 및 구성

2.1 주입잠금기법 기반의 광주파수 발생기

앞서 언급된 바와 같이 광주파수 발생기는 원하는 임의의 광주파수를 자유롭게 생성할 수 있는 광원이다. 광주파수 발생기는 주파수 안정화된 펄스 레이저, 주파수 모드 추출 부분, 증폭 부분의 3부분으로 구성된다. Fig 1.과 같이 먼저 펄스 레이저의 주파수 안정화를 통해 주파수 표준에 소급되는 광 빔을 생성하고, 주파수 모드 추출부에서는 이러한 광 빔의 모드들 중에서 원하는 광주파수 성분만을 추출한다. 최종적으로 증폭 부분에서 추출된 주파수 모드의 광출력을 증폭함으로써 높은 주파수 안정도와 좁은 선평을 갖는 단색광을 생성하게 된다.

추출된 하나의 주파수 모드를 증폭하는 방법으로는 주입잠금기법(optical injection locking)이라는 광학적 증폭방법이 사용된다. 주입잠금기법이란 주파수를 통제하거나 주파수 떨림 등을 막기 위해 두 개의 레이저를 주종관계로 짝을 맺어 사용하는 것으로 주 레이저(Master laser)의 빛을 종 레이저(Slave laser)로 입사시키면 종 레이저에서 발진되는 빛의 주파수가 주 레이저 빛의 주파수로 고정되는 현상을 말한다. 이 때, 종 레이저에서 발진하는 빛은 주파수 이외에 선평과 주파수 안정도와 같은 특성 또한 주 레이저와 같아지게 된다. 이러한 주입잠금기법의 특성에 의해 주파수 표준의 우수한 주파수 성능을 완벽히 이용할 수 있다.

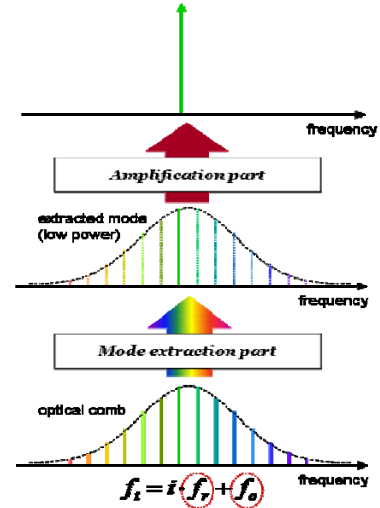


Fig. 1 Realization of the optical frequency generator based on the mode amplification

2.2 광주파수 발생기의 장시간 구동 방안

2.2.1 광량 증폭을 통한 잠금범위의 확장

주입잠금기법에서 두 레이저의 출력 주파수를 잠금하기 위해서는 주 레이저의 발진 주파수와 종 레이저의 발진 주파수가 일정 범위내에 존재해야 하고 이를 주입잠금범위(injection locking range)라고 한다. 주입잠금범위 $\Delta\nu$ 는 일반적으로 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\nu = \frac{1}{2\pi} \frac{2(1-R)}{T} \sqrt{\frac{I}{I_0}} \quad (1)$$

위 식에서 R은 종 레이저의 앞 면의 반사율, T는 종 레이저의 공진기 내에서 빛이 왕복하는데 걸리는 시간, I는 종 레이저로 주입되는 주 레이저의 광량, I_0 는 종 레이저의 발진 광량을 나타낸다.

식에서 알 수 있듯이 주입잠금범위 $\Delta\nu$ 는 종 레이저로 주입되는 광량 I와 종 레이저의 발진 광량 I_0 의 비에 비례한다. 즉, 주입되는 광량 I가 커질수록 주입잠금범위가 넓어지므로 광주파수 발생기가 주변 환경변화에 둔감해진다.

2.2.2 광 주입 위상 잠금 회로(OIPLL)

현재 많이 사용하고 있는 주파수 잠금 방법은 위상잠금회로(phase locked loop)를 이용하는 방법과 주입잠금기법의 2가지가 있다.

Reference 신호와 고정된 위상 관계를 갖는 신호를 생성해 내는 방식의 잠금 기법인 위상잠금회로를 이용하는 방법은 잠금범위(locking range)가 넓다는 장점을 갖지만 반응속도가 느려 빠른 주파수 변화를 보상하지 못하고, 선평이 종 레이저에 의해 결정되므로 좁은 선평을 갖는 종 레이저가 필요하다.

레이저 공진기 내부에 특정 광 주파수를 갖는 빛을 주

입하여 레이저가 주입된 빛과 동일한 주파수로 발진하도록 만드는 주입잠금기법은 단순하고, 정확한 주파수 잠금이 가능하다는 장점을 갖지만 잠금 범위가 좁아 오랜 시간 잠금이 힘들다.

각각의 주파수 잠금 방법들이 가지는 한계점들을 해결하고자 본 연구에서는 광주입 위상잠금회로(optical injection phase locked loop)를 이용한 잠금 기법을 도입하였다. 광주입 위상잠금회로를 이용한 잠금 방법과 주입잠금기법을 통합한 것으로써 이를 통해 넓은 잠금범위 내에서 주 레이저의 우수한 주파수 특성을 그대로 유지할 수 있다.

광주입 위상잠금회로는 종 레이저의 주파수를 주입잠금 기법을 이용하여 주 레이저에 잠금하는 동시에 위상잠금회로를 이용하여 종 레이저의 발진 파장을 조절하여 환경변화나 진동 등의 외란이 존재할 때에도 주입잠금을 유지할 수 있다. 종 레이저의 발진 파장을 조절하는 것은 결국 주입잠금범위를 이동시키는 것이므로 기존의 주입잠금기법과 비교하여 훨씬 넓은 영역을 주입잠금범위로 사용할 수 있으며, 이는 결국 주변 환경에 의한 영향에 둔감해지는 효과를 가져와 장기간 구동을 가능하게 한다.

2.3 실험장치 및 결과

광주파수 발생기의 장시간 구동 실험에 앞서 주 레이저로 사용되는 광섬유 펄스 레이저 광 빛을 루비듐(Rb) 주파수 표준에 안정화 하여 장시간 구동 시의 주파수 안정도 특성을 평가한 결과는 Fig. 2 와 같다.

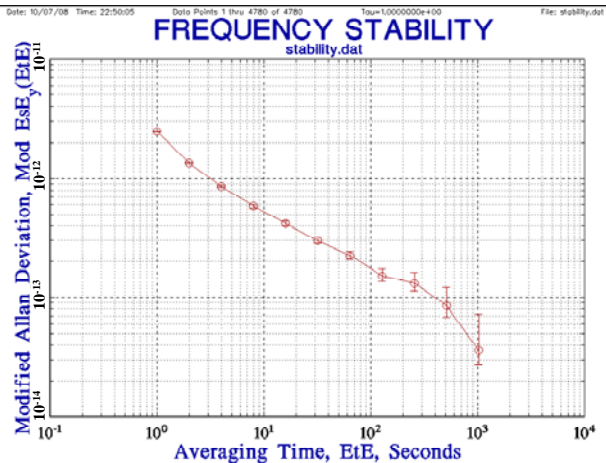


Fig. 2 Frequency stability of the fiber frequency comb (Allan deviation)

Figure 3 는 광주파수 발생기의 장기간 구동을 위한 광학 구성도이다. 주 레이저로는 1550 nm 중심파장의 안정화된 광섬유 펄스 레이저 기반 광 빛이 사용되었으며, 종 레이저로는 광섬유 DFB(Distributed Feedback) 레이저를 사용하였다. 먼저 안정화된 광섬유 펄스 레이저에서 생성된 광 빛은 광섬유를 통해 SFPI(scanning fabry perot interferometer)를 통과하는 과정에서 SFPI 의 투과 선평에 해당하는 일부의 모드들만 추출된다. 추출된 광 빛은 EDFA(erbium doped fiber amplifier)에서 광량이 증폭된 후 circulator 로 입사한다. Circulator 에 입사된 광 빛은 먼저 FBG(fiber bragg grating) 로 진행하게 되며, FBG 는 입사된 광 빛 중 원하는 파장만을 반사하고 나머지 파장은 투과시키는 역할을 한다. SFPI 와 FBG 에 의해서 원하는 하나의 광 빛 성분만이 주로 선택되어 종 레이저인 DFB 로 입사하여 주입잠금 된다. 주입잠금된 DFB 레이저에서 생성된 빛은 다시 circulator 를 지나서 일부는 광주입 위상잠금회로의 신호생성을 위한 PD 로 진행하고, 나머지는 최종 출력광량

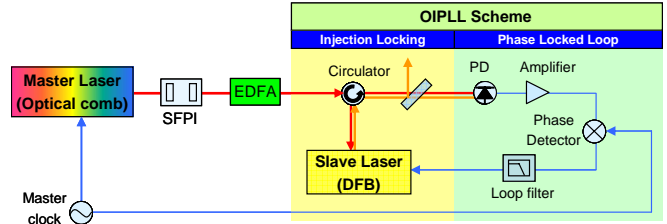


Fig. 3 Optical layout for long term operation of OFG (SFPI: scanning fabry perot interferometer, EDFA: erbium doped fiber amplifier, FBG: fiber bragg grating, DFB: distributed feedback laser, OIPLL: optical injection phase locked loop)

으로 사용된다. PD에서는 광 빛과 주입잠금을 통해 증폭된 광 빛의 선택된 성분 사이의 간섭 맥놀이 주파수를 검출하며, 이는 광섬유 펄스 레이저에서 생성되는 광 빛의 모드간 주파수 간격을 결정하는 f_r (repetition rate)와 동일해야 한다. 광주입 위상잠금회로에서는 PD에서 생성된 맥놀이 신호와 광섬유 펄스 레이저에서 생성되는 f_r 의 위상을 서로 비교하여 차이가 존재하면 종 레이저인 DFB 레이저의 발진 파장을 조절하여 차이가 없도록 만들어 준다.

앞에서 설명한 광학 구성도를 바탕으로 시스템을 구성하여 EDFA 에 의한 광량 증폭과 광주입 위상잠금회로에 의한 주입잠금범위의 확장을 구현했다. 광량 증폭 및 광주입 위상잠금회로를 사용하지 않았을 경우 기대되는 주입잠금범위는 수백 MHz 이지만, 위와 같은 구성을 통해 수십 GHz 의 확장된 주입잠금범위를 획득할 수 있었다. 이렇게 확장된 주입잠금범위는 광주파수 발생기가 주변의 환경변화에 둔감하도록 해 주므로, 이를 통해 광주파수 발생기의 장기간 구동이 가능함을 확인할 수 있었다. 또한 종 레이저로 사용된 광섬유 DFB 레이저의 경우 1530 nm 의 중심파장을 가지고 ± 0.5 nm 범위에서 연속적인 발진 파장 조절이 가능하므로, 광주파수 발생기는 128.16 GHz 의 연속적인 발진 주파수 조절 범위(tuning range)를 갖는다.

3. 결론

본 연구에서는 주파수 표준에 소급하는 임의의 광주파수를 생성할 수 있는 광주파수 발생기의 우수한 특성을 유지하면서, 기존 광주파수 발생기의 한계로 작용하였던 구동 시간을 개선하여 장기간 구동이 가능한 광주파수 발생기를 제안 및 검증하였다. 이를 위해 EDFA 를 통한 광출력 증폭 및 광주입 위상잠금회로를 이용하여 잠금구간을 수백 MHz 에서 수십 GHz 까지 증가시켰고, 장기간 구동 실험을 통해 광주파수 발생기의 장기간 구동이 가능함을 검증하였다.

후기

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

참고문헌

1. 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," Optics Express, 16(1), 258-264, 2008
2. Cyril C. Renaud, Michael Duser, Claudio F. C. Silva, B. Puttnam, T. Lovell, Polina Bayvel, Alwyn J. Seeds, "Nanosecond Channel-Switching Exact Optical Frequency Synthesizer Using an Optical Injection Phase-Locked Loop(OIPLL)," IEEE Photonics Technology Letters, Vol.16, No.3, 2004