

# 광섬유 펨토초 레이저의 낮은 위상 잡음 안정화 Fiber Femtosecond Laser Stabilization with Low Phase Noise

\*김승만, 김윤석, 김영진, Hatem Hussein, #김승우

\*S.-M. Kim, Y. Kim, Y.-J. Kim, Hatem Hussein, #S.-W. Kim (swk@kaist.ac.kr)

KAIST 극초단광학 초정밀기술 연구단

Key words : fiber femtosecond laser, frequency stabilization, phase noise

## 1. 서론

주파수 안정화 된 펨토초 레이저에 의해 생성된 광 빔 (Optical comb)은 고 정밀 분광, 광 주파수 측정, 고차 조화파 생성 등의 광범위한 응용분야에서 사용되고 있다. 현재 까지 고체 상태의 Ti:Sapphire 펨토초 레이저를 광 빔을 생성하는데 사용하여 왔지만 Ti:Sapphire 펨토초 레이저에 비해 간결성, 쉬운 작동, 장기간 작동, 통신대역에서의 활용, 낮은 가격 등의 산업적으로 여러 장점을 가지고 있는 광섬유 기반의 펨토초 레이저에 대한 연구가 진행되었고 Ti:Sapphire 펨토초 레이저의 대안으로 주목 되고 있다. 하지만 아직까지 위상잡음 면에서 Ti:Sapphire 펨토초 레이저가 광섬유 펨토초 레이저에 비해 좋은 결과를 보이고 있으며 이를 해결하기 위해 광섬유 펨토초 레이저의 낮은 위상 잡음을 갖는 안정화에 대한 연구가 중요시 되고 있다.

광섬유 펨토초 레이저에 의해 생성된 광 빔은  $10^5 \sim 10^6$  개의 독립된 주파수 모드로 이루어져 있으며 각 주파수 모드는 반복률( $f_{rep}$ )의 정수 배에 옵셋 주파수( $f_{ceo}$ )를 더한 값으로 정의 되고, 반복률과 옵셋주파수를 안정화하여 광 빔 전체를 안정화 시킬 수 있다. 반복률은 각 모드들 간의 간격으로, 광섬유 펨토초 레이저에서 생성된 광 주파수 빔의 모드들 간의 맥놀이 현상에 의해 무선 주파수 신호로 획득하여 쉽게 안정화 할 수 있는 반면, 옵셋 주파수는 광 주파수 빔이 0 주파수로부터 전체적으로 천이된 정도이므로 광섬유 펨토초 레이저에서 생성된 광 주파수 빔을 광섬유 형태의 이득 매질에서 증폭하고 HNLF(Highly Nonlinear Fiber)를 통과시켜 확장시킨 후  $f-2f$  간섭계를 구성하여 획득한 무선 주파수 신호로 안정화 한다.

광섬유 펨토초 레이저에서 발생하는 잡음은 크게 공진기 내부에서 발생하는 잡음과 옵셋 주파수 안정화 시스템에서 발생하는 잡음으로 나눌 수 있다. 공진기 내부에서 발생하는 잡음의 대표적인 원인으로 펌핑 출력의 변동과 이득 매질에서 증폭된 자연방출(Amplified Spontaneous Emission, ASE)이 있고, 공진기 안에서 발생된 잡음은 반복률의 변화를 주는 주파수 잡음으로 작용하여 광 주파수 빔의 모드 선포를 증가시키게 된다. 반면 옵셋 주파수 안정화 시스템에서 광 빔의 증폭 시 발생하는 ASE가 위상 잡음으로 작용하여 옵셋주파수의 선포를 증가시킨다. 즉, 광 주파수 빔을 증폭하기 위해 사용되는 펌핑 출력을 증가하게 되면 옵셋 주파수의 신호대 잡음비가 증가하는 반면 동시에 위상 잡음이 증가하여 옵셋 주파수의 선포가 증가하게 되는 것이다.

현재까지 주로 공진기 안에서 발생되는 잡음을 줄여 좁은 모드 선포를 갖는 광 주파수 빔을 생성하는 연구가 NIST, IMRA America Inc., OFS Laboratories 등에서 수행 되어 졌다. 특히 NIST에서는 옵셋주파수 안정화를 위한 80 kHz의 피드백 대역폭을 갖는 위상 잠금 회로(Phase Locked Loop, PLL)를 사용하여 펌핑 출력의 변동에 의한 잡음을 줄임으로 1 Hz이하의 좁은 선포를 갖는 옵셋주파수를 생성하였고[1], 이렇게 생성된 좁은 선포의 옵셋주파수의 제어를 통해 Ti:Sapphire 펨토초 레이저와의 상대적인 안정도를  $1.3 \times 10^{-18}$ 까지 획득 하였다[2]. 이와 달리 NMIJ는 기본적인 옵셋주파수 안정화 시스템에서 적절한 광 빔의 스펙트럼

확장을 통해 높은 신호대 잡음비를 갖는 옵셋주파수를 생성하여 8일 동안의 긴 기간 안정화를 구현하였다[3].

즉, 높은 피드백 대역폭을 갖는 PLL 회로를 통해 공진기 내의 주파수 잡음을 줄여 좁은 선포의 옵셋주파수를 생성함과 동시에 옵셋주파수 안정화 시스템에서 적절한 광 빔 확장에 필요한 최소한의 펌핑 출력을 사용하여 위상잡음을 감소 시키고, 확장된 광 빔에서 옵셋주파수 생성에 필요한 주파수 대역의 출력을 증가시켜 좁은 선포와 높은 신호대 잡음비를 갖는 옵셋주파수를 생성한다면 매우 좁은 선포와 높은 안정도 및 긴 기간 안정도의 특성을 다 갖춘 낮은 위상 잡음의 광 빔을 생성 할 수 있다.

본 연구에서는 우선적으로 10 MHz의 높은 피드백 대역폭을 갖는 PLL 회로를 사용하여 공진기 내부에서 발생하는 잡음을 최소화하고, 옵셋주파수 안정화 시스템에서 상대적으로 작은 펌핑 출력과 ytterbium doped 광섬유, Thulium-Holmium doped 광섬유를 이용해 좁은 선포와 높은 신호대 잡음비를 갖는 옵셋주파수를 생성하여 낮은 위상 잡음을 갖는 광섬유 펨토초 레이저의 안정화를 실현하고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 광섬유 펨토초 레이저의 안정화

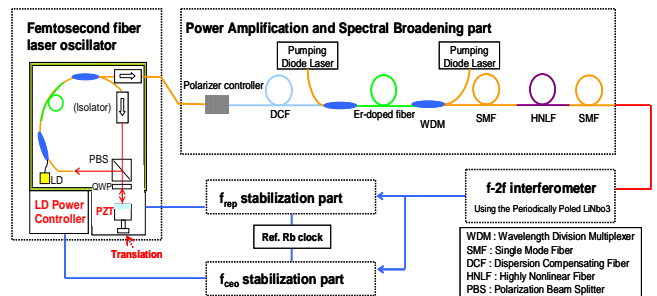


Fig. 1 Schematic diagram of fiber femtosecond laser stabilization

Fig. 1은 현재 연구에 사용되고 있는 광섬유 펨토초 레이저 안정화 시스템의 전체적인 구성도이다. 광섬유 펨토초 레이저 안정화 시스템은 광 주파수 빔을 생성하는 공진기와 광 주파수 빔을 안정화를 위한 반복률 및 옵셋주파수 안정화 시스템으로 나뉘게 된다. 광섬유 펨토초 레이저 공진기는 1550 nm을 중심으로 넓은 방출대역을 가진 Erbium doped 광섬유를 이득 매질로 사용하고 대부분 단일 모드 광섬유로 구성된 단 방향 순환 공동으로 되어 있으며 수동적 모드 잠금 기술인 비선형 편광회전과 펼쳐진 펄스의 분산보상을 통해 광 빔을 생성하게 된다. Fig. 1의 광섬유 펨토초 레이저는 중심파장이 1550 nm이고 파장 대역폭이 약 55 nm이며 반복률이 100 MHz인 광 빔을 생성하고 이 광 빔을 푸리에 변환하여 시간 축에서 보게 되면 150 fs 이하의 폭과 20 mW 출력을 갖는 펄스로 볼 수 있다. 반복률 및 옵셋주파수 안정화 시스템은 출력증폭 및 스펙트럼 확장 부분과  $f-2f$  간섭계 그리고 PLL 회로로 구성되어 있고 안정화 하는 과정은 다음과 같다. 공진기에서 생성된 광 빔은 Erbium doped 광섬유에서 증폭이 되고 HNLF의 높은 비선형 특성에 의해 새로운 주파수 모드가 생성되어 광 빔 스펙트럼이 확장된다. 옵셋주파수 생성을 위해서 최소한 950 nm에서 2100 nm까지 광 빔이 확장되어야 하는데, HNLF에

서 광 빛의 스펙트럼 확장 정도는 증폭된 후의 펄스의 출력과 비례하고 펄스의 폭과 반비례한다. 즉 Erbium doped 광섬유 전, 후의 분산보상 광섬유(Dispersion Compensating Fiber, DCF)와 단일모드 광섬유(Single Mode Fiber, SMF) 길이에 따른 분산의 조절로 펄스의 폭을 최소화하면 증폭된 펄스의 상대적으로 작은 출력에서도 원하는 스펙트럼 확장이 가능하다. 이 때 적은 양의 펌핑 출력을 사용하게 되므로 ASE 에 의해 생성되는 위상잡음을 최소화하여 좁은 선폭의 읍셋 주파수를 생성 할 수 있다.

적절하게 확장된 광 빛은 f-2f 간섭계의 PPLN (Periodically Poled LiNbO3)에서 2060 nm 파장의 이차 조화파를 생성하고 생성된 이차 조화파는 광 빛의 1030 nm 대역의 파장과 맥놀이 현상에 의해 무선 주파수 신호의 읍셋 주파수를 생성하게 된다. 100 MHz의 반복률은 광 빛의 각 모드 사이의 맥놀이 현상에 의해 쉽게 생성할 수 있다. 생성된 반복률과 읍셋 주파수는 높은 안정도를 갖는 Rb 원자시계에 잠금된 local oscillator와 10 MHz의 높은 피드백 대역폭을 갖는 서보 제어 시스템으로 구성된 PLL 회로에 의해 제어된다. PLL 회로에 의해 생성된 제어 신호를 통해 공진기 내부의 공동의 길이를 조절하여 반복률을 안정화 하고, 다이오드 레이저의 펌핑 출력을 조절하여 읍셋주파수를 안정화하므로 전체적인 광섬유 펄스초 레이저 광 빛의 안정화를 할 수 있다.

## 2.2 광섬유 펄스초 레이저의 낮은 위상 잡음 안정화

앞절에서 광섬유 펄스초 레이저의 안정화를 위해 10 MHz의 높은 피드백 대역폭을 갖는 서보 제어 시스템으로 구성된 PLL 회로를 사용하여 공진기 내부에서 발생하는 주파수 잡음을 줄이고, 읍셋주파수 안정화 시스템에서 적은 펌핑 출력을 사용해 위상 잡음을 줄여 좁은 선폭을 갖는 읍셋주파수를 생성하는 과정을 보였다. 여기에 더해 광섬유 펄스초 레이저의 낮은 위상 잡음 안정화를 위해서는 확장된 광 빛에서 읍셋주파수 생성에 필요한 주파수 대역의 출력을 증폭시켜 좁은 선폭과 높은 신호대 잡음비를 갖는 읍셋주파수를 생성하여야 한다.

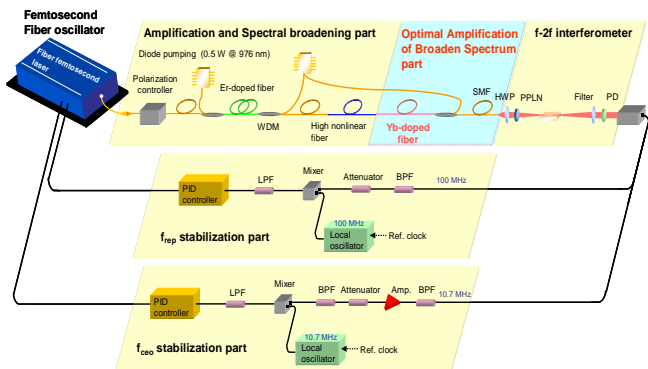


Fig. 2 Schematic diagram of fiber femtosecond laser stabilization with low phase noise

Fig.2 는 광섬유 펄스초 레이저의 낮은 위상 잡음 안정화 시스템이다. 이 시스템은 일반적인 광섬유 펄스초 레이저 안정화 시스템에서 HNLF 뒤에 Ytterbium doped 광섬유를 연결하여 확장된 스펙트럼에서 읍셋주파수 생성에 필요한 주파수 대역의 출력을 증폭하는 부분이 추가 되었다.

Ytterbium doped 광섬유의 최대 흡수 파장은 975 nm 이고 최대 방출 파장은 1030 nm 이다. 그러므로 Ytterbium doped 광섬유를 사용하게 되면 HNLF 에서 확장된 광 빛의 대역폭이 950 nm 에서 2100 nm 이므로 975 nm 파장의 출력이 Ytterbium doped 광섬유에 의해 흡수 되게 되고, 읍셋주파수를 생성하기 위해서 요구되는 1030 nm 와 2060 nm 의 파장 중 1030 nm 파장이 Ytterbium doped 광섬유의 최대 방출 대

역과 일치 함으로 1030 nm 파장의 출력이 증폭된다. 이와 같은 스펙트럼 출력 재분배에 의한 1030 nm 파장의 증폭은 최종적으로 높은 신호대 잡음비를 갖는 읍셋주파수를 생성한다.

이와 동시에 읍셋주파수 안정화 시스템에서 증폭 하는데 사용되는 975 nm 다이오드 레이저의 일부 출력을 Ytterbium doped 광섬유에 연결하여 펌핑을 시켜 1030 nm 파장의 출력을 증폭 하게 된다. 펌핑에 의한 증폭은 Erbium doped 광섬유로 구성된 증폭 단에서 남은 펌핑 출력을 활용할 수 있고, 스펙트럼 출력 재분배에 의한 증폭 보다 더 큰 증폭률을 얻을 수 있는 장점이 있다.

또한 Ytterbium doped 광섬유와 더불어 Thulium-Holmium doped 광섬유도 추가로 적용하여 스펙트럼 출력 재분배에 의한 2060 nm 파장 출력의 증폭으로 높은 신호대 잡음비를 갖는 읍셋주파수를 생성할 수 있다. Thulium-Holmium doped 광섬유는 흡수 파장이 1100 nm 에서 2000 nm 범위에 있고 최대 방출 파장은 2000 nm 에서 2100 nm 이다. 즉 HNLF 에서 확장된 950 nm 에서 2100 nm 의 광 빛의 대역 중 1100 nm 에서 2000 nm 파장범위에 있는 출력을 흡수하고 읍셋주파수를 생성하기 위해서 요구되는 2060 nm 파장 대역으로 방출하므로 2060 nm 파장의 출력이 증가하여 높은 신호대 잡음비를 생성할 수 있다.

## 3. 결론

10 MHz의 높은 피드백 대역폭을 갖는 PLL 회로를 사용하여 공진기 내부에서 발생하는 잡음을 최소화하고, 읍셋주파수 안정화 시스템에서 읍셋주파수를 생성할 수 있는 최소한의 pumping 출력 사용과 ytterbium doped 광섬유와 Thulium-holmium doped 광섬유를 이용해 읍셋주파수 안정화 시 발생하는 위상 잡음을 줄여 좁은 선폭과 높은 신호대 잡음비를 갖는 읍셋주파수를 생성하고 이로 인해 낮은 위상 잡음을 갖는 광섬유 펄스초 레이저의 안정화를 실현 시킬 수 있다.

## 후기

본 연구는 교육과학기술부 도약연구 지원사업에 지원을 받아 한국과학기술원 극초단광학 초정밀기술 연구단에서 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. J. J. McFerran, W. C. Swann, B. R. Washburn, and N. R. Newbury, "Elimination of pump-induced frequency jitter on fiber-laser frequency combs," Opt. Lett., **31**, 1997-1999, 2006.
2. I. Coddington, W. C. Swann, L. Lorini, J. C. Bergquist, Y. Le Coq, C. W. Oates, Q. Quraishi, K. S. Feder, J. W. Nicholson, P. S. Westbrook, S. A. Diddams and N. R. Newbury, "Coherent optical link over hundreds of metres and hundreds of terahertz with subfemtosecond timing jitter," Nature Photonics **1**, 283-287, 2007
3. Hajime Inaba, Yuta Daimon, Feng Lei Hong, Atsushi Onae, Kaoru Minoshima, Thomas R. Schilbi and Hirokazu Matsumoto, "Long-term measurement of optical frequencies using a simple, robust and low-noise fiber based frequency comb," Opt. Express **14**, 5223-5231, 2006