

# 고출력 광섬유 펨토초 레이저의 개발 및 응용 Development and Applications of a High Power Fiber Femtosecond Laser

\*김윤석, 김영진, 김승만, Hatem Hussein, #김승우

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

KAIST 극초단광학 초정밀기술 연구단

Key words : high power fiber femtosecond laser, chirped pulse amplification

## 1. 서론

희토류 원소가 도핑된 광섬유를 이득 매질로 사용하는 광섬유 기반 펨토초 레이저는 사용에 있어서의 용이성, 차지하는 부피, 안정화 지속 시간, 제작 단가 및 유지 비용 등에 있어서 고체 기반의 펨토초 레이저에 비해 많은 장점을 가지고 있으며 이로 인해 안정화된 광 주파수 빔 (Stabilized optical frequency comb)을 생성하는 광원으로 각광 받고 있다. 이 중 Er 광섬유와 Yb 광섬유 기반의 펨토초 레이저들은 레이저 공진기의 구성에 필요한 광학 정렬이 다른 광섬유 기반 펨토초 레이저들에 비해 상대적으로 용이해서 여러 연구 및 응용에 널리 적용되고 있다.

Er 광섬유 기반 펨토초 레이저의 경우 무엇보다도 주파수 안정화 기법이 성숙되어 장기간 주파수 안정화가 가능하다는 점이 큰 장점이며 이는 장시간 연속적인 데이터 축적을 필요로 하는 실험이나 환경의 변화에 의한 영향이 큰 산업에의 적용에 있어서 장점을 갖는다. 일례로 2006년 일본의 NMIJ(National Metrology Institute of Japan)에서는 Er 광섬유 기반 펨토초 레이저를 이용하여 7일 이상 주파수 안정화를 수행한 결과를 발표했다 [1]. 하지만 Er 광섬유를 이득 매질로 사용하는 증폭 시스템의 경우 낮은 pump to signal 변환 효율로 인해 큰 파워로의 증폭이 불가능한 단점이 있다.

한편 Yb 광섬유 기반 펨토초 레이저는 Er 광섬유 기반 펨토초 레이저와는 상반된 특성을 보인다. 주파수 안정화면에 있어서 최근까지 알려진 가장 오랜 주파수 안정화는 2008년 IMRA와 MIT 등에 의해 수행되었으며 그 결과는 수 시간 정도로 Er 광섬유 기반 펨토초 레이저에 비해 상대적으로 불안한 특성을 보인다 [2]. 반면 Yb 광섬유 기반 펨토초 레이저는 높은 pump to signal 변환 효율 덕에 CPA(Chirped Pulse Amplification) 등을 통한 큰 파워로의 증폭이 가능한 장점을 갖는다. 일례로 독일의 Friedrich-Schiller-University에서는 2007년 Yb 도핑된 PCF(Photonic Crystal Fiber)를 CPA 시스템의 증폭 매질로 하여 100 μJ의 펄스 당 에너지와 90 W의 평균 파워를 갖는 레이저를 구성하여 이를 발표하였다 [3].

장기간 주파수 안정화가 가능한 고출력 광섬유 펨토초 레이저는 장거리 거리 측정 시스템, HHG(High Harmonic Generation) 현상을 이용한 EUV(Extreme-Ultraviolet) 대역에서의 주파수 안정화된 광 주파수 빔 형성 및 이를 통한 분광 및 측정 등의 응용, 혹은 위상 정보와 물질의 비선형 특성을 동시에 필요로 하는 실험 분야에 매우 적합한 광원이다. 만약 Er 광섬유 기반 펨토초 레이저가 갖는 우수한 주파수 안정화 특성과, Yb 광섬유 이득 매질의 높은 pump to signal 변환 효율을 통한 큰 파워로의 증폭 특성을 결합할 수 있다면 앞서 언급된 장기간 주파수 안정화가 가능한 고출력 광섬유 펨토초 레이저를 구현해 낼 수 있게 된다.

본 논문에서는 안정화된 Er 광섬유 기반 펨토초 레이저의 출력을 증폭, 주파수 넓힘(Spectral broadening) 후 Yb 광섬유 이득 매질의 발진 파장에 해당하는 주파수 성분을 추출하여 CPA 시스템의 seed signal로 사용함으로써 장기간 주파수 안정화가 가능한 고출력 광섬유 펨토초 레이저

의 구현에 대해 언급하고자 한다. 더불어 고출력 광섬유 펨토초 레이저의 가능한 응용 방향에 대해서도 살펴보고자 한다.

## 2. 고출력 광섬유 펨토초 레이저의 개발

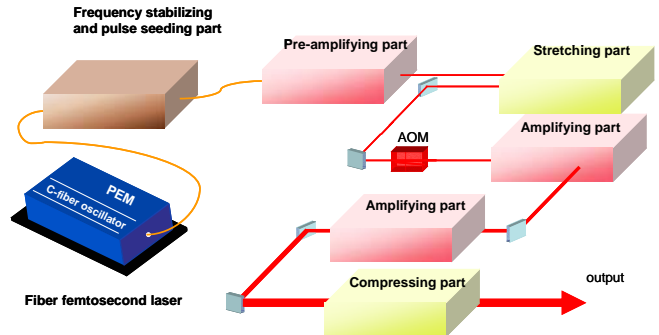


Fig. 1 Schematic diagram of high power fiber femtosecond laser system

주파수 안정화된 고출력 광섬유 펨토초 레이저는 안정화되고 주파수 넓힘된 Er 광섬유 펨토초 레이저의 특정 대역을 광섬유 CPA(Fiber Chirped Pulse Amplification) 방법을 통해 증폭함으로써 구현된다. 가장 먼저 수행되어야 할 작업은 주파수 안정화이다. Er 광섬유 펨토초 레이저의 주파수 안정화는 광 주파수 빔의 주파수 모드간 간격인  $f_{rep}$ (Repetition Rate Frequency)와 광 주파수 빔이 0 주파수로부터 전체적으로 천이된 정도인  $f_{ceo}$ (Carrier Offset Frequency)를 기준 시계(Reference Clock)에 안정화 함으로써 가능하다. 여기서  $f_{rep}$ 는 레이저의 출력을 PD(Photo Detector)를 통해 받아보는 것만으로 얻을 수 있는 반면  $f_{ceo}$ 는 출력의 증폭, HNFL(Highly Nonlinear Fiber)나 PCF 등을 통한 주파수 넓힘, PPLN(Periodically Poled Lithium Niobate) 등의 비선형 결정을 통한 이차 조화파의 형성, 그리고 f-2f 간섭계의 구성을 통해 얻어낼 수 있다.

광섬유 CPA 시스템에 필요한 seed signal은 Er 광섬유 펨토초 레이저의 출력을 주파수 넓힘 처리 한 후 1040 nm 파장을 중심으로 한 10 nm FWHM(Full Width Half Maximum)의 성분을 추출함으로써 생성 가능하다. 한편 주파수 넓힘 과정은 주파수 안정화 과정 시 필요로 하는 과정이기 때문에 이를 이용하여 seed signal을 생성하면 별도의 주파수 넓힘 과정을 생략할 수 있다.

광섬유 CPA 시스템은 펄스 폭 펼침 부분(Pulse Stretching Part), 증폭 부분(Pulse Amplification Part), 펄스 폭 압축 부분(Pulse Compressing Part)의 세 부분으로 나눌 수 있다. 펄스 폭 펼침 부분은 증폭 시 펄스의 높은 첨두 파워에 의해 발생하는 비선형 특성으로 인한 주파수 잡음 및 부품의 광학적 손상 등을 방지하기 위해 펄스를 시간 축으로 충분히 넓히는 역할을 수행한다. 본 시스템에서는 두 개의 grating(1740 line/mm)과 구면 거울 및 평면 거울을 이용하여 펄스 폭 펼침 시스템을 구현하였으며 grating 간의 간격 조절을 통해 펄스 폭이 1.3 ns 가 되도록 시스템을 설계하였다. 증폭 부분은 세 개의 다단 증

폭 시스템으로 구성되어 있다. 각각의 증폭 시스템은 중심 파장이 980 nm 인 다이오드 레이저(20 W, 20 W, 250 W)와 core 의 지름이 40  $\mu\text{m}$  인 1.2 m 의 Yb 도핑 PCF 로 구성되어 있다. Pumping 출력 및 증폭된 출력은 이색 거울 (Dichroic Mirror)을 통해 경로가 나뉘어 진다. 펄스 폭 압축 부분에서는 앞서 증폭된 빛을 다시 시간 축으로 수백 fs 수준으로 압축시키는 역할을 수행한다. 펄스 폭 압축 시스템은 두 개의 grating(1740 line/mm)과 평면 거울로 구성되어 있으며 적절한 grating 간의 간격을 통해 1.3 ns 의 펄스 폭을 보상한다.

추가로 빛의 효율적인 coupling 을 위해 편광의 조절이 필수적이며 이는 여러 wave plate 에 의해 조절된다. 또한 펄스의 높은 파워 및 에너지로 인한 부품의 손상을 막거나 광학 부품의 유효 구경을 만족시키기 위해 빛의 지름을 확장시키거나 축소시킬 수 있는 렌즈 시스템 및 펄스당 에너지 조절을 위한 AOM(Acousto-Optic Modulator)이 포함되어 있다.

현재 설계되어 제작중인 전체 광학 시스템은 120 cm X 60 cm 의 광학 테이블 위에 설치가 가능하다. 이 시스템을 통해 1 MHz 의 반복률에서 100  $\mu\text{J}$  의 펄스 당 에너지와 100 W 의 평균 파워를 갖는 펄스가 생성될 것으로 기대된다.

### 3. 고출력 광섬유 펄스 레이저의 응용

현재 개발중인 고출력 광섬유 펄스 레이저는 큰 출력 파워 및 안정화 된 주파수 특성을 동시에 갖는 레이저 시스템이다. 긴 거리를 측정하는 경우에 있어서 정밀한 길이 측정을 위해서는 주파수 안정화가 필수적이며, 대기에 의한 흡수 및 거울의 흡수에 의한 광량 손실을 극복하기 위해서는 큰 출력 파워 또한 요구된다. 더불어 HHG현상을 이용하여 EUV(Extreme-Ultraviolet) 대역에서 광 주파수 빛을 형성하는 경우에 있어서도 HHG 현상을 일으키기 위한  $10^{14} \text{ W/cm}^2$  이상의 큰 출력 파워가 요구되며, 동시에 주파수의 기준 역할을 위한 주파수 안정화도 동시에 요구된다. 따라서 현재 개발중인 시스템을 긴 거리 측정 및 EUV 대역에서의 광 주파수 빛 형성에 적용한다면 측정면에서는 기존의 시스템에 비해 보다 먼 거리를 정밀하게 측정할 수 있을 것으로 예상되며, EUV 광 주 파수 빛 형성에 있어서는 주파수 안정화까지 동시에 구현되는 EUV 광 주 파수 빛 형성이 가능하리라 생각된다.

### 4. 결론

본 논문에서는 Er 광섬유 기반 펄스 레이저의 장기 안정화 특성과 Yb 광섬유를 이득 매질로 사용했을 경우에 얻어지는 높은 pump to signal 변환 효율 특성을 결합한 장기간 주파수 안정화 고출력 광섬유 펄스 레이저의 개발 및 응용에 대해 기술하였다. 이 시스템의 구현을 통해 높은 정밀도를 갖는 긴 거리 측정, EUV 대역에서의 안정화 된 광 주파수 빛 형성 등 높은 광량 및 안정화된 주파수 특성을 동시에 요구하는 응용 분야에 대한 연구가 가능할 것이라 예상된다.

### 후기

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

### 참고문헌

1. Inaba, H., Daimon, Y., Hong, F-L., Onae, A., Minoshima, K., Schibli, T. R., and Matsumoto, H., "Long-term measurement of

optical frequencies using a simple, robust and low-noise fiber based frequency comb," *Optics Express*, **14**, 5223-5231, 2006.  
 2. Hartl, I., Fu, L. B., Thomas, B. K., Dong, L., Fermann, M. E., Kim, J., Kärtner, F. X., and Menyuk, C., "Self-Referenced fCEO Stabilization of a Low Noise Femtosecond Fiber Oscillator," *CLEO/QELS 2008, CTUC4*, 2008.  
 3. Röser, F., Schimpf, D., Schmidt, O., Ortaç, B., Rademaker, K., Limpert, J., and Tünnermann, A., "90 W average power 100  $\mu\text{J}$  energy femtosecond fiber chirped-pulse amplification system," *Optics Letters*, **32**, 2230-2232, 2007.