

모드잠김 이터븀 광섬유 레이저의 펨토초 펄스 발생

Generation of femtosecond pulses from mode-locked ytterbium fiber laser

서영석, 홍성기, 임창환, Kazuhiko Sumimura*, Hidetsugu Yoshida*, Masahiro Nakatsuka*

한국원자력연구원 양자광학기술개발센터, *오사카대학 레이저에너지학연구소

physys@kaeri.re.kr

한국원자력연구원의 고에너지 레이저 시설(KLF: KAERI Laser Facility)에서는 증폭 시스템과 응용 분야에 따라 다양하게 구성할 수 있는 나노 또는 피코초 증폭이 가능한 front-end 레이저 시스템을 구축하고 있다. 특히, front-end 시스템에서 신호광을 생성하는 레이저 발진기는 고에너지 레이저 시설의 심장과도 같은 역할을 하는 중요한 구성 요소이다. 즉, 초단펄스로 동작하면서도 시간적으로 출력이 안정되어 있어야 하며 공간적인 세기 분포 또한 매끄러워야 한다는 조건을 만족하여야만 하기 때문이다. KLF에서는 대형화된 벌크형 고체 레이저 발진기를 대신하여 소형이면서도 안정적으로 신호광의 펄스 형태를 임의로 제어할 수 있는 광섬유 레이저 발진기를 적용하고 있다.

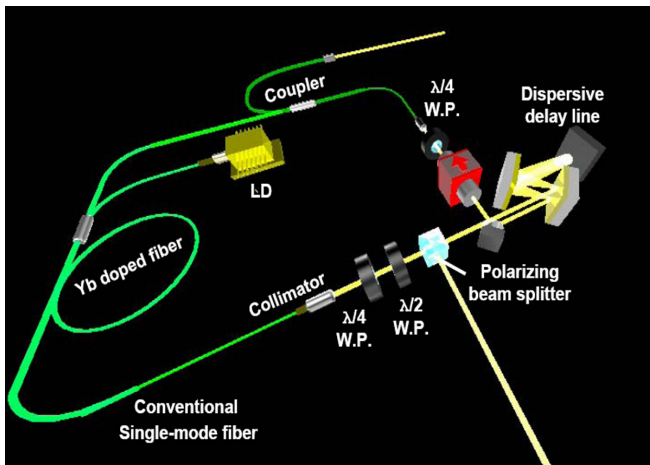


그림 1. 모드잠김 이터븀 광섬유 레이저의 구성도

본 연구에서는 일본 오사카 대학의 레이저 에너지학연구소(ILE, Institute of Laser Engineering)와 공동으로 펨토초로 구동하는 모드잠김 이터븀 (Ytterbium) 광섬유 레이저를 그림 1과 같이 구성하였다⁽¹⁾. 모드잠김된 초단펄스를 안정되게 발생시키기 위해서는 가포화 흡수체가 필요할 뿐만 아니라 레이저 공진기 내부의 군속도 분산 (GVD: Group Velocity Dispersion)을 보상해 주어야한다⁽²⁾. 여기에서는 가포화흡수체로써 비선형편광회전 (NPR: Nonlinear Polarization Rotation) 방법을 이용하였고, 공진기 내부의 분산보상을 위하여 회절격자를 사용하였다. 가포화흡수체 역할을 하는 NPR에는 $\lambda/4$, $\lambda/2$ 파장판 그리고 편광빔가르개 (PBS: Polarizing Beam Splitter)를 사용하였다.

실험에 사용된 이터븀 첨가 광섬유 ($2.8/125 \mu\text{m}$, $\text{NA}=0.20$)의 길이는 1.5 m이다. 이터븀 이온의 첨가량은 10,000 ppm이고 977 nm에서 흡수율이 250 dB/m이며 정상분산 파라미터는 1060 nm에서 -72.3 ps/nm/km 이다. 그리고 단일모드 광섬유(SMF)의 코어와 클래드의 직경은 각각 6.5, 125 μm 이며 NA는 0.11, 정상분산 파라미터는 1060 nm에서 -50.8 ps/nm/km 이다. 공진기내의 GVD는 600 lines/mm이고 입사각도가 40.5도인 회절격자를 더블 펄스로 구성하여 보상하였다. 이때, 회절격자에 의한 분산치는 1060

nm에서 -0.18 ps^2 이다. 광 격리기(Isolator)는 광섬유 레이저를 단일방향으로 동작시키기 위해 공진기 내부에 삽입하였고 피그테일 광섬유의 끝 부분에는 시준기(Collimator)를 사용하여 빔을 정렬하였다. 모드잠김 동작은 구성되어진 전체 파장관을 조정함으로써 관측되어지는데, 공진기 내의 편광이 완전히 조정된 후에는 LD의 전류를 증가시키는 것만으로 모드잠김 레이저 발진이 가능하다. 분산 보상을 위한 회절격자 사이의 거리를 마이크로미터를 사용하여 미세하게 조정하면 분산값이 이상분산 값으로부터 영분산 값에 근접해지면서 여러 가지 특이한 펄스형태를 관측할 수 있게 된다. 여기에서 멀티펄스 파형은 일반적으로 고에너지에서 일어나는 파형분열(Wave Breaking)에 의해 생성되는데, 이 상태를 유지시키기 위해서는 보다 정밀한 공진기의 정렬이 필요하다.

가장 짧은 펄스 폭을 얻기 위하여 회절격자간의 거리를 최적화 시킨 후, 주파수 분해 광 게이트(FROG: Frequency-Resolved Optical Gating)법을 사용하여 시간파형 및 위상에 대한 스펙트럼을 관측하였다. 이때, 측정된 펄스의 폭은 62.5 fs 이었고 그림2에 나타내었다. 또한, 분광분석기(OSA: Optical Spectrum Analyzer)를 사용하여 모드잠김 레이저의 스펙트럼을 측정하여 그림 3에 나타내었다. 이때의 중심파장은 1053 nm 이고, 밴드 폭은 55 nm 이었다. 펄스의 반복 주파수는 레이저 공진기의 길이 7.9 m에 해당하는 26.3 MHz이었다. 평균 출력은 130 mW, 펄스 에너지는 4.9 nJ, 첨두 출력은 79 kW 이었다. 모드잠김 Yb 첨가 광섬유 레이저 발진기의 안정도는 12시간 연속동작에서 $\pm 0.2 \%$ 이하로 나타났으며, 장치의 크기는 300 mm \times 600 mm의 광학정반 위에 구성할 수 있을 정도로 소형이다. 구성된 모드잠김 이터븀 광섬유 레이저의 특성을 향상시키기 위해서는 공진기 내부에서 형성되는 고차 파장 분산을 보상해 주어야 하는데, 이를 위해 공진기 내부에 프리즘을 도입하면 30 fs 이하의 레이저 펄스를 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

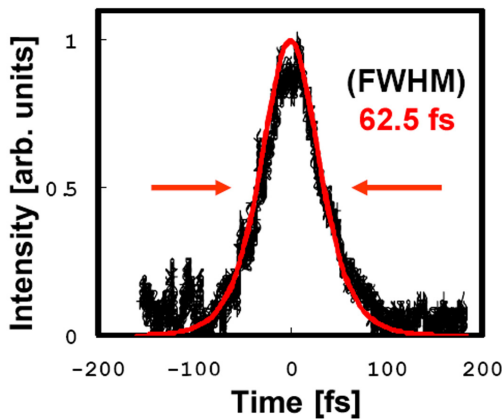


그림 2. 모드잠김 레이저 펄스의 FROG 파형

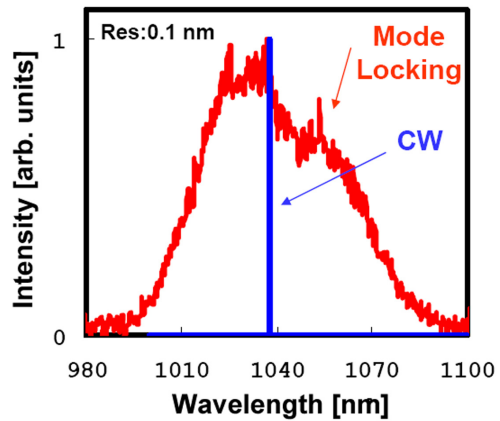


그림 3. 분광분석기로 측정된 레이저의 스펙트럼

1. K. Sumimura, H. Yoshida, H. Fujita and M. Nakatsuka, "Yb fiber mode-locked laser with a wide tuning range for chirped pulse amplification system," IEICE Electronics Express, 3(11), 233 (2006).
2. F. Ö. Ilday, J. R. Buckley, H. Lim, F. W. Wise, and W. G. Clark, "Generation of 50-fs, 5-nJ pulses at 1.03 μm from a wave-breaking-free fiber laser," Optics Letters, 28(15), 1365 (2003).