

다운처프 펄스 증폭 방식을 이용한 100 kHz 고출력 펨토초 레이저 개발

Development of 100 kHz High-power Femtosecond Laser using Down-Chirped Pulse Amplification Technique

홍경한*, 유태준, 성재희, 최일우, 노영철, Sergei Kostritsa, 고도경, 이종민

광주과학기술원 고등광기술연구소

*khhong@gist.ac.kr

1990년대 이후 펨토초 티타늄사파이어 레이저는 펨토초 레이저의 표준이 되어왔으며 고출력과 고평균 출력을 얻기 위한 많은 연구가 진행되어져 왔다. 특히, 고반복률의 펨토초 고출력 레이저는 규모가 작아 소 규모 연구실에서도 개발이 가능하고 재료공정, 레이저 가공, 의료기술 등의 응용분야 뿐만 아니라 레이저와 빛의 상호작용과 같은 기초 연구에도 매우 유용한 도구이다. 반복률은 100 MHz 수준의 모드록킹된 펄스열에서 펄스를 얼마나 자주 선택해서 증폭하느냐에 달려있으므로 펨핑 광원의 반복률과 펄스 선택기의 반복률 등에 제한을 받는다. 펄스 선택에 있어서 일반적으로 사용하는 포켈셀과 같은 전기광학적 방식을 이용하면 보통 1-10 kHz의 반복률에서 약 1 mJ 정도의 에너지를 얻을 수 있는 반면,¹⁾ 브래그셀과 같은 음향광학적 방식을 이용하면 100-250 kHz의 높은 반복률에서 10 μ J 미만의 에너지를 얻을 수 있다.²⁾ 현재까지는 후자의 경우 10배 이상의 높은 반복률에도 불구하고 펄스당 낮은 에너지로 인하여 평균출력에 있어서 장점이 없으므로 100 kHz 이상급 레이저의 활용도가 1 kHz급 레이저에 비하여 매우 낮다. 이로 인하여 펄스당 에너지가 높은 100 kHz급 레이저의 개발이 요구되며 본 논문에서는 수십 μ J의 비교적 높은 에너지를 갖는 100 kHz급 펨토초 레이저의 개발에 대하여 기술한다.

기존의 100 kHz 이상급(보통 250 kHz)의 레이저에서는 증폭을 위하여 연속발전되는 펨프레이저를 사용하여왔다. 이러한 경우 한 가지 펨프레이저로 티타늄사파이어 레이저와 증폭기를 동시에 운영할 수 있는 장점이 있으나 연속발전 레이저의 특성상 증폭기의 펨핑 세기가 약해서 높은 출력 에너지를 얻을 수 없다는 단점이 있다. 그리고 증폭자발발진을 막기 위하여 증폭기 내부에서 Q-스위칭을 따로 해야하므로 증폭기의 공진기가 복잡해진다. 그러나 100 kHz의 반복률을 갖는 Q-스위칭된 펄스형 레이저를 펨프레이저로 이용하면 펄스당 펨핑 세기가 훨씬 높아져 펄스당 에너지를 몇 배 이상 높일 수 있고 증폭기 내부에서 Q-스위칭을 따로 할 필요가 없으므로 보다 간단한 구조로 증폭기를 구성할 수 있다.

한편, 최근들어 고반복률 레이저에 처프펄스증폭(chirped pulse amplification; CPA) 방식과 유사한 다운 처프 펄스 증폭(down-chirped pulse amplification; DCPA) 방식이 10 kHz 펨토초 티타늄사파이어 레이저 시스템에서 성공적으로 시도되었는데³⁾ 이 방식은 CPA와는 반대로 펄스를 음의 분산을 주어 펄스폭을 확대한 후 증폭하고 양의 분산으로 압축하는 방식이다. 이렇게 하면 일반 광학 매질에 통과시킴으로써 펄스를 압축할 수 있기 때문에 CPA에서 사용하는 에돌이발(grating) 형 펄스압축기에서 발생하는 40% 이상의 에너지 손실 문제를 해결할 수 있다. 다만, 매질에서 생기는 비선형 효과가 문제가 될 수 있으므로 펄스당 mJ 이상의 너무 높은 에너지를 갖는 경우에는 사용하기 어려운 단점이 있다. 따라서 보통 펄스당 에너지가 너무 높지 않은 고반복률 레이저에 적합한 것으로 알려졌다.

본 연구에서는 100 kHz에서 20 W로 동작하는 Q-스위칭되는 Nd:YAG 레이저를 펌프레이저로 사용하여 펨토초 레이저 펄스를 증폭하였고 펄스의 압축효율을 높이기 위하여 DCPA 방식을 이용하였다. 펄스의 증폭 효율을 높이기 위하여 티타늄사파이어 재생증폭기를 제작하였고 높은 펌핑 출력으로 생기는 열렌즈 효과를 줄이기 위하여 thermo-electric 냉각기를 사용하였다. 펄스의 압축을 위하여 각 광학계와 매질들의 군지연 분산을 계산하여 3차분산까지 보상되도록 설계하였다.

펨토초 레이저 발진기는 자체 제작한 10 fs 미만의 티타늄 사파이어 레이저를 이용하였고 SF10 프리즘 쌍과 에돌이발 쌍을 이용하여 약 25 ps까지 확대하며 이 때 펄스는 음의 분산으로 인하여 다운처프(down-chirp)된다. 확대된 펄스는 브래그 셀로 동작되는 재생증폭기에서 증폭된 후 SF10 매질을 통과하면서 압축된다. 재생증폭기에서 펌핑 세기가 티타늄 사파이어 결정의 포화 세기의 약 2배인 2 J/cm^2 정도가 되도록 하였고 펌프레이저와 씨앗빔 간의 모드가 잘 맞도록 각각 망원경 구조로 빔 크기를 조절하였다. 브래그 셀은 이중 경로를 통하여 덤핑 효율을 최대화하였고 주입과 덤핑되는 신호는 레이저 공진기의 반복물에 동기화하여 jitter가 없도록 하였다. 재생증폭기의 길이는 브래그 셀에 걸여주는 RF의 위상이 씨앗빔이 주입될 때와 덤핑될 때 같도록 하기 위하여 레이저 발진기의 공진기 길이와 거의 같게 조절하였다.

설계된 레이저의 구조는 그림 1과 같으며 30 μJ 의 펄스 에너지와 50 펨토초 미만의 펄스폭을 갖는 100 kHz 레이저 펄스를 발생시킬 수 있을 것으로 예측하고 있다. 개발된 레이저는 레이저를 이용한 미세가공과 100 kHz의 고차조화파 발생 연구, 절대위상 안정화 연구 등에 사용될 예정이다.

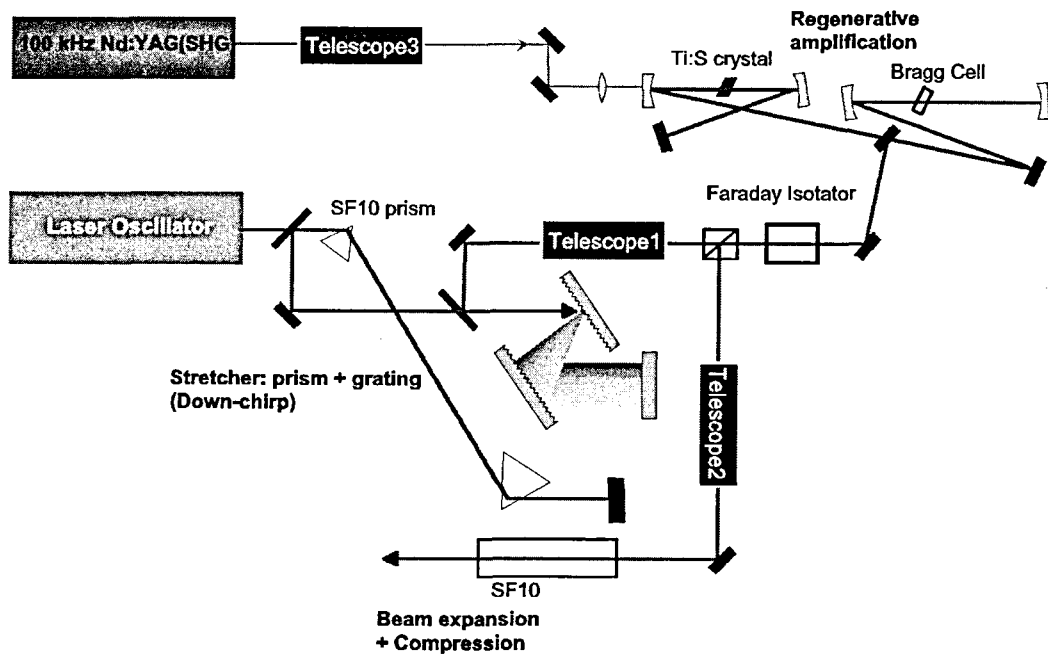


그림 1. DCPA 방식을 이용한 100 kHz 고출력 펨토초 레이저의 개략도

참고문헌

[1] S. Bakus, J. Peatross, C. P. Huang, M. M. Murnane, and H. C. Kapteyn, Opt. Lett. 20, 2000 (1995).
 [2] T. B. Norris, Opt. Lett. 17, 1009 (1992).
 [3] D. M. Gaudiosi, A. L. Lytle, P. Kohl, M. M. Murnane, H. C. Kapteyn, and S. Backus, Opt. Lett. 29, 2665 (2004).

