



펨토초 테라와트 레이저

차용호*, 남창희**

(한국과학기술원 물리학과)

1. 서론

1960년에 레이저가 발명된 이후, 보다 강력한 고출력의 레이저를 개발하려는 연구가 꾸준히 계속되었으며, Q스위칭, 모드록킹 등의 기술이 개발되면서 레이저 출력은 급속히 증가하였다. 특히, 모드록킹 기술을 통한 피코초 이하의 극초단 레이저 펄스 생성이 가능해지면서 보다 적은 에너지로 고출력을 생성할 수 있게 되었다. 그러나, 피코초 이하의 레이저 펄스를 증폭할 경우, 레이저 펄스의 에너지가 충분히 증폭되기 전에 펄스의 침두 출력이 급격히 높아져서 자체집속(self-focusing)에 의해 레이저 증폭 매질이 손상되거나 이득 포화 현상이 생기는 문제점이 발생하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해 1980년대 중반까지는 레이저 빔의 크기를 크게하거나 나노초 영역의 레이저 펄스를 사용하여 단위 면적당 레이저 출력을 손상 문턱값 이하로 제한하는 방법을 사용해 왔으므로 고출력을 얻기 위해서는 증폭 매질의 크기도 크게 해야만 했다. 따라서, 테라와트(terawatt, 1 TW = 10^{12} W)의 고출력 레이저에는 Nd:glass와 같이 비교적 큰 부피로 제작이 용이한 이득 매질이 주로 사용되어 전체적인 실험장비 규모도 커지고 개발 비용도 많이 들었으며, 레이저 펄스 반복 주기도 상당히 느린 단점이 있었다[1-3].

1980년대 후반에 들어서면서 기존의 고출력 레이저의 단점을 극복한 극초단 고출력 레이저가 개발되기 시작하였다. 극초단 고출력 레이저는 피코초 혹은 펨토초(femtosecond, 1 fs = 10^{-15} s)의 매우 짧은 레이저 펄스를 증폭하여 테라와트 영역의 고출력을 생성하는 레이저로서, 레이저 펄스폭이 짧기 때문에 상대적으로 적은 에너지로도 고출력을 낼 수 있다. 따라서, 비교적 소규모로 제작이 가능하고, 개발 비용이 적게 들며, 10 Hz 이상의 고반복률로 레이저 펄스를 생성할 수 있는 장점이 있다. 또한, 극히 짧은 시간동안만

매우 강력한 전자기장이 존재하는 새로운 물리적 환경을 제공하기 때문에, 지금까지 알려지지 않았거나 시도해 보지 못한 새로운 응용분야의 개발이 기대되고 있다. 이러한 극초단 고출력 레이저는 소규모의 연구실에서도 운영 가능하기 때문에, 지난 몇 년 동안 극초단 고출력 레이저에 대한 연구가 활발히 진행되었고, 현재 전 세계적으로 많은 수의 시스템이 운영되고 있다.

2. 펨토초 테라와트 레이저의 등장 배경

극초단 고출력 레이저의 급속한 발전은 펨토초 영역의 극초단 펄스를 생성하는 극초단 레이저 기술[4-7], 극초단 펄스를 효과적으로 증폭할 수 있는 chirped-pulse amplification(CPA) 기술[8], 그리고, 극초단 고출력 레이저의 이득 매질로 적합한 티타늄 사파이어 이득 매질의 개발[9] 등과 같이 1980년대 중반부터 개발된 신기술의 등장으로 가능하였다.

극초단 레이저는 주로 모드록킹 방법에 의해 개발된다. 초기의 모드록킹 방법으로는 기계적인 변조기, 음향광학 변조기(acousto-optic modulator), 포화 흡수체(saturable absorber) 등을 공진기 내부에 사용하는 방법이 사용되었으나, 이러한 방법으로는 기계적, 전기적 변조 속도나 포화 흡수체의 흡수 회복 시간의 한계 때문에 피코초 이하의 극초단 펄스를 생성할 수 없었다. 1972년, E. P. Ippen 등이 포화 흡수체를 연속발전 색소 레이저에 설치하여 흡수 포화와 이득 포화를 함께 이용한 모드록킹 방법을 개발하고[10-13], 공진기 내부의 군속도 분산(group velocity dispersion) 기술이 도입되면서 펨토초 영역의 레이저 펄스 생성이 가능하게 되었다[14, 15]. 그러나, 색소 레이저는 사용하기가 상당히 까다롭고, 형광 수명이 매우 짧아 펄핑 출력도 높아야하는 문제점이 있었기 때문에, 최근에는 고체

레이저에 광학적 커 효과(Kerr effect)를 이용한 모드록킹 방법을 적용하여 극초단 펄스를 생성하는 기술이 많이 사용되고 있다. 이러한 기술에는 솔리톤 레이저, 첨가 펄스(additive pulse) 모드록킹 등이 있으며, 현재 가장 널리 쓰이는 방법은 커 렌즈 모드록킹(Kerr-lens mode locking)이다. 커 렌즈 모드록킹은 커 효과에 의해 매질 내에서 강한 레이저 빔이 자체집속되는 현상을 이용하는 것으로서, 그 반응속도가 매우 빠르고, 특정 파장에 구애받지 않으며, 사용방법이 비교적 간단한 장점이 있다. 1991년 D. E. Spence 등이 이 방법을 사용하여 티타늄 사파이어 레이저에서 60 fs의 레이저 펄스를 생성한 이후[16], 여러 고체 레이저에 커 렌즈 모드록킹 기술이 적용되었으며, 최근에는 10 fs 이하의 극초단 레이저 펄스를 생성한 결과도 보고되고 있다[17-19].

피코초, 펨토초의 극초단 레이저 펄스는 적은 에너지로도 침투출력이 매우 높아지기 때문에, 증폭단에서 레이저 펄스가 충분히 증폭되기 전에 자체집속 등에 의해 증폭단의 이득 매질이 손상되거나 이득 포화에 의해 증폭이 잘 안되는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 개발된 것이 CPA 기술이다. 1985년 G. Mourou 등에 의해 개발된 CPA 기술은[8] 극초단 레이저 펄스를 증폭하기 전에 펄스폭을 수천 배 혹은 수만 배로 확대하고, 증폭단의 손상이나 이득 포화 없이 효율적으로 레이저 펄스를 증폭한 다음, 다시 증폭된 레이저 펄스를 원래의 펄스폭에 가깝게 압축하여 고출력의 레이저 펄스를 생성하는 기술이다(그림 1). 이러한 CPA 기술을 사용함으로써 기존의 고출력 레이저의 출력을 수백 배 이상 증가 시키는 것이 가능하게 되었으며, 보다 소규모로 테라와트의 고출력 레이저가 개발되기 시작했다. 현재 개발되고 있는 극초단 고출력 레이저는 거의 모두 CPA 기술을 사용하고 있으며, CPA 기술을 사용한 페타와트(petawatt, 1 PW = 10^{15} W) 레이저 개발도 보고되었다[20].

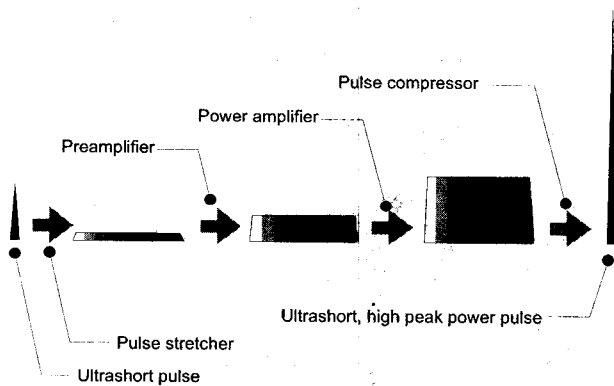


그림 1. chirped-pulse amplification 기술의 개념

모드록킹 기술의 발달로 인해 거의 모든 파장 영역에서 모드록킹이 가능해지고, CPA 기술이 개발되어 극초단 펄스도 효율적으로 증폭할 수 있게 되면서, 보다 짧은 레이저 펄스의 생성과 증폭에 유리한 매질을 개발하려는 연구가

계속되어 왔다. 1982년에 개발된 티타늄 사파이어 이득 매질은 650-1100 nm의 넓은 발진 대역을 갖고면서도, 색소 레이저에 비해 형광 수명이 3 μ s 정도로 길어서 펄핑이 비교적 용이하고, 사파이어의 우수한 광학적, 물리적 특성을 지니기 때문에 지금까지 개발된 레이저 이득 매질 중, 극초단 펄스 생성에 가장 적합한 매질로서 널리 사용되어 왔다. 특히, 커 렌즈 모드록킹 기술을 사용하는 티타늄 사파이어 레이저는 구성이 비교적 간단하면서도 10 fs 영역의 극초단 펄스를 생성할 수 있기 때문에 여러 응용분야에 많이 사용되고 있다. 또한, 티타늄 사파이어는 열 전도율이 좋고, 손상 문턱값과 포화 fluence도 높아서 증폭 매질로서도 우수한 특성을 가지므로, 티타늄 사파이어를 증폭 매질로 하여 극초단 고출력 레이저를 개발하려는 연구가 많이 이루어졌다. 그러나, 티타늄 사파이어는 다른 고체 이득 매질에 비해 형광 수명이 짧아서 섬광 등에 의한 펄핑이 어렵기 때문에, Q스위칭된 Nd:YAG 레이저의 2차 조화파와 같은 복잡하고 고가인 펄핑광원을 사용해야 하는 단점도 있다. 1990년대에는 이러한 티타늄 사파이어를 펨토초 레이저 펄스의 생성과 증폭에 사용함으로써 펨토초 영역에서 테라와트의 고출력 펄스를 생성할 수 있는 펨토초 테라와트 티타늄 사파이어 레이저가 개발되었다[21-24].

3. 펨토초 테라와트 티타늄 사파이어 레이저의 구성

펨토초 테라와트 레이저는 CPA 기술을 적용하여 시스템 구성이 이루어진다. 즉, 펨토초 영역의 극초단 펄스를 생성하는 펨토초 레이저 공진기, 레이저 펄스폭을 확대하는 펄스 확대기, 충분한 에너지를 얻기 위한 몇 개의 증폭단, 그리고, 확대한 레이저 펄스를 원래의 레이저 펄스폭에 가깝게 압축하는 펄스 압축기 등으로 구성된다. 1990년대에 들어서면서 이러한 펨토초 테라와트 레이저 기술이 급속히 발전하여 많은 레이저 시스템이 개발되었으며, 본 논문에서는 한국과학기술원 물리학과 극초단 레이저 연구실에서 개발한 펨토초 테라와트 티타늄 사파이어 레이저를 예를 들어 설명하겠다(그림 2).

펨토초 영역의 레이저 펄스를 생성하는 레이저 공진기로서 커 렌즈 모드록킹된 티타늄 사파이어 레이저 공진기를 사용하였다. 티타늄 사파이어 레이저 공진기는 초점거리가 5 cm인 두 개의 오목거울과 두 개의 평면거울로 이루어진 집진 공진기 형태이고, 두 오목거울 사이에 레이저가 집속된 지점에 길이 4.75 mm, 도핑률 0.15 wt.%의 티타늄 사파이어 결정을 설치하였으며, 집속된 레이저 모드에 맞추어 펄핑 레이저를 집중하여 펄핑함으로써 비교적 쉽게 레이저 발진을 할 수 있었다. 펄핑 레이저로는 Nd:YVO₄ 레이저의 2차 조화파를 사용하였다. 커 렌즈 모드록킹과 공진기 내부의 균속도 분산 보상을 통해 펨토초 영역의 레이저 펄스를

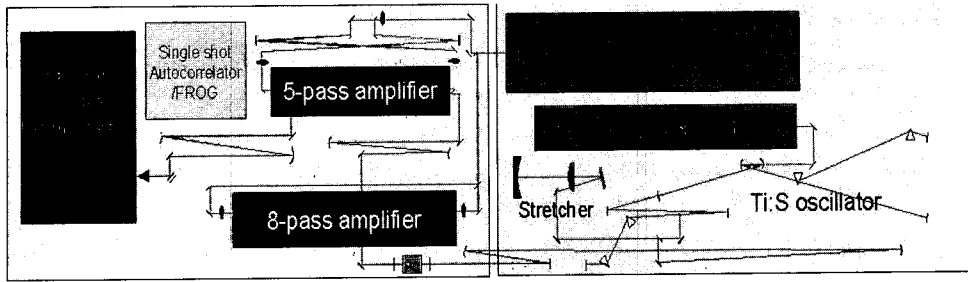


그림 2. 펨토초 테라와트 티타늄 사파이어 레이저의 구성도

생성하기 위해서 슬릿과 용융 실리카 프리즘 쌍을 설치하였고, 간섭형 자체상관계를 사용하여 측정된 레이저 펄스폭은 17 fs였다. 생성된 레이저 펄스의 반복률은 90 MHz였으며, 반사율 97%의 출력거울을 사용하였을 때의 평균출력은 5 W 펄핑에서 200 mW 이상이였다.

티타늄 사파이어 공진기에서 출력된 펨토초 영역의 레이저 펄스를 수 백 피코초 영역으로 확대하기 위해서 펄스 확대기를 사용하였다. 펄스 확대기는 극초단 펄스일수록 더욱 넓은 스펙트럼을 갖는 성질을 이용하여 펄스폭을 확대하는 장치로서, 펄스의 스펙트럼 성분을 에돌이발을 사용하여 공간적으로 분해하고, 분해된 각 스펙트럼 성분이 서로 다른 거리의 경로를 지나도록 하면, 시간에 따라 스펙트럼 성분들이 배열되면서 펄스폭이 확대된다. 펄스 확대기는 렌즈와 같은 투과형 광학계나 수차 등에 의한 군속도 분산을 억제하기 위해 1200 grooves/mm 에돌이발, 초점거리 30 cm의 오목거울, 초점거리 15 cm의 볼록거울, 평면거울 등의 반사형 광학계만을 사용하여 Öffner-triplet 형태로 구성하였으며, 확대된 레이저 펄스폭은 240 ps였다. 확대된 레이저 펄스는 포켈스 셀에 의해 증폭단의 펄핑주기인 10 Hz의 반복률로 선택된 후 증폭되었다. 포켈스 셀에서 선택된 레이저 펄스는 증폭단에 펄핑이 끝난 직후에 증폭 매질을 통과해야 하므로, 펄스동기화장치, 시간지연장치 등을 사용하여 ns 이하의 정밀도로 펄핑순간과 펄스 선택 순간을 조정하였다.

극초단 레이저 공진기에서 생성된 레이저 펄스는 수 nJ의 매우 적은 에너지를 가지며, 펄스 확대기와 포켈스 셀 등을 통과하면서 펄스 에너지가 더욱 줄어들기 때문에 테라와트의 고출력을 생성하기 위해서는 10^8 배 이상의 높은 증폭률로 증폭해야 한다. 레이저 펄스의 증폭단은 nJ 이하의 매우 낮은 에너지를 갖는 레이저 펄스를 수 mJ 영역으로 증폭하는 예비 증폭기와 mJ 영역의 레이저 펄스를 100 mJ 이상으로 증폭하는 주 증폭기로 구성하였다. 예비 증폭기와 주 증폭기의 펄핑 광원으로는 Q스위칭된 Nd:YAG 레이저의 2차 조화파를 사용하였으며, 펄핑 레이저 펄스의 펄스폭은 약 12 ns였다. 예비 증폭기는 8-pass 증폭기로서 증폭 매질로는 도핑률 0.25 wt.% 길이 7 mm의 티타늄 사파이어를 사용하였고, 초점거리 45 cm, 50 cm의 오목거울을 각각 두 개씩 사용하여 구성하였다. 오목거울은 공초점 배

치로 설치하였고, 초점이 맺히는 지점에 티타늄 사파이어 증폭 매질을 놓아 증폭할 펄스가 오목거울에 의해 집속되면서 티타늄 사파이어 매질을 8번 통과하도록 하였다. 예비 증폭기의 펄핑빔은 초점거리 50 cm의 렌즈를 사용하여 직경 약 0.7 mm로 티타늄 사파이어 증폭 매질에 집속하였

으며, 증폭 매질 표면의 손상 위험을 줄이기 위해 양방향에서 펄핑하였다. 예비 증폭기에서 증폭된 레이저 펄스의 에너지는 펄핑 에너지가 50 mJ일 때 약 3.5 mJ이었다. 예비 증폭기에서 증폭된 레이저 펄스는 빔 크기가 직경 5 mm로 확대된 후, 주 증폭기에 의해 다시 증폭되었다. 주 증폭기의 증폭 매질로는 도핑률 0.25 wt.% 길이 7 mm, 직경 10 mm의 티타늄 사파이어를 사용하였고, 평면거울만을 사용하여 레이저 펄스가 5번 증폭 매질을 통과하도록 하였다. 펄핑 fluence를 최대한 균일하게 하기 위해, Nd:YAG 레이저의 2차 조화파를 두 개의 렌즈를 사용하여 티타늄 사파이어 증폭 매질까지 상전송 하였다. 전송된 펄핑빔의 크기는 직경 약 6 mm였으며, 증폭 매질의 손상 위험을 줄이기 위해 양방향에서 펄핑하였다. 주 증폭기에서 증폭된 레이저 펄스 에너지는 펄핑 에너지가 540 mJ 일 때, 약 130 mJ이었다.

증폭된 레이저 펄스는 펄스 압축기에 의해 압축되었다. 펄스 압축기는 펄스 확대기의 역할을 역으로 수행하여 레이저 펄스폭을 원래의 펄스폭에 가깝게 압축하는 장치로서, 금코팅된 두 개의 1200 grooves/mm 에돌이발과 평면거울로 구성하였다. 펄스 압축기에 입력되는 레이저 펄스는 증폭되어 높은 에너지를 가지므로 직경 3 cm 정도로 빔 크기를 확대하여 에돌이발 등이 손상되지 않도록 하였다. 펄스 압축기의 에돌이발에 입사하는 레이저 펄스의 각도와 에돌이발 사이의 거리를 조정함으로써 압축된 레이저 펄스폭을 최소화하였다. 증폭하는 과정에서 레이저 스펙트럼이 좁아지는 현상을 억제하여 증폭된 레이저 펄스폭을 최소로 유지하기 위해 장파장 주입법을 사용하였으며, 압축된 레이저 펄스폭은 20 fs였다. 펄스 압축기를 통과한 레이저 펄스의 에너지는 60 mJ로서 최대 3 TW의 출력을 생성할 수 있었다[21].

4. 결 론

펨토초 테라와트 레이저는 소규모로 제작이 가능하고, 10 Hz 이상의 높은 반복률로 레이저 펄스를 생성할 수 있어서 응용성이 뛰어난 장점이 있다. 최근에는 kHz 이상의 고반복률을 가지는 펨토초 고출력 레이저가 등장하기 시작하여 평균출력에 있어서도 많은 발전이 이루어지고 있다. 반복률

이 높아질수록 보다 짧은 시간에 더 많은 실험자료를 얻을 수 있으므로, 앞으로 고반복 고효율 레이저 연구가 더욱 활발해 질 것으로 기대된다. 본 실험실에서도 현재 1 kHz 펄스 초 고효율 티타늄 사파이어 레이저를 개발하고 있으며, 실용적인 면에서 보다 우수한 레이저 시스템이 될 것으로 기대하고 있다. 이와 같이 지난 몇 년 동안 펄스 초 테라와트 레이저 기술이 급속히 발전하였으며, 그 응용 분야도 급속히 확장하였다. 펄스 초 영역의 매우 짧은 시간 동안 테라와트의 강력한 전자기장이 존재하는 독특한 환경 때문에, 고차 조화파 발생, 레이저를 이용한 전자의 가속, 펄스 초 이하의 극자외선 펄스 발생 등의 새로운 연구 분야가 개척되었으며, 의학 분야, 정밀 가공 등 점차 그 응용 분야를 넓혀 가고 있다.

현재, 세계적으로 펄스 초 테라와트 레이저와 그 응용 분야를 전문적으로 연구하는 그룹들이 늘어나고 있으며, 상당한 수준의 레이저 기술이 이미 상용화되어 극초단 고효율 레이저의 보편화에 기여하고 있다. 극초단 고효율 레이저는 극초단 레이저 기술, 펄스 확대와 압축 기술, 증폭 기술 등의 복합적인 기술을 요구하며, 이를 위해서는 다양한 광학 기술, 정밀 기계 기술, 전기 및 전자 기술이 뒷받침되어야 한다. 최근, 국내에서도 광학이나 정밀 기계 등과 관련한 회사들이 등장하여 극초단 고효율 레이저 개발에 기여하고 있으나, 아직도 대부분의 기술을 외국에 의존하고 있다. 극초단 고효율 레이저의 다양한 응용 분야와 파급효과를 고려할 때 관련 기술 개발에 힘써야 할 것이다.

참고문헌

[1] Special issue on laser for fusion, IEEE J. QE-17 (1981).
 [2] M. J. Weber, J. Non-Cryst. Solids 42, 189 (1980).
 [3] G. J. Linford, R. A. Saroyan, J. B. Trenholme, and, J. T. Weber, IEEE J. QE-15, 510 (1979).
 [4] L. F. Mollenaur and R. H. Stolen, Opt. Lett. 9, 13 (1984).
 [5] J. F. Pinto, C. P. Yakymyshyn, and C. R. Pollack, Opt. Lett. 13, 383 (1988).
 [6] P. M. W. French, S. M. J. Kelly, and J. R. Taylor, Opt. Lett. 15, 668 (1990).
 [7] D. K. Negus, L. Spinelli, N. Goldblatt, and G. Feuget, Proc. on Advanced Solid-State Lasers (Hilton Head, 1991), PDP4 p120 (1991).
 [8] D. Strickland and G. Mourou, Opt. Commun. 56, 219 (1985).
 [9] P. F. Moulton, J. Opt. Soc. Am. B 3, 125 (1986).
 [10] E. P. Ippen, C. V. Shank, and A. Diens, Appl. Phys. Lett. 21, 348 (1972).
 [11] G. H. C. New, Opt. Commun. 6, 188 (1972).
 [12] G. H. C. New, IEEE J. Quantum Electron. QE-10, 115 (1974).

[13] C. V. Shank, and E. P. Ippen, Appl. Phys. Lett. 24, 373 (1974).
 [14] O. E. Martinez, R. F. Fork, and J. P. Gordon, Opt. Lett. 9, 156 (1984).
 [15] J. A. Valdmanis, R. L. Fork, and J. P. Gordon, Opt. Lett. 10, 131 (1985).
 [16] D. E. Spence, P. N. Kean, and W. Sibbett, Opt. Lett. 16, 42 (1991).
 [17] I. D. Jung, F. X. Kartner, N. Matuschek, D. H. Sutter, F. Morier-Genoud, G. Zhang, and U. Keller, Opt. Lett. 22, 1009 (1997).
 [18] U. Morgner, F. X. Kartner, S. H. Cho, Y. Chen, H. A. Haus, J. G. Fujimoto, and E. P. Ippen, Opt. Lett. 24, 411 (1999).
 [19] D. H. Sutter, G. Steinmeyer, L. Gallmann, N. Matuschek, F. Morier-Genoud, and U. Keller, Opt. Lett. 24, 631 (1999).
 [20] M. D. Perry, D. Pennington, B. C. Stuart, G. Tietbohl, J. A. Britten, C. Brown, S. Herman, B. Golick, M. Kartz, J. Miller, H. T. Powell, M. Vergino, and V. Yanovsky, Opt. Lett. 24, 160 (1999).
 [21] Y. H. Cha, Y. I. Kang, and C. H. Nam, J. Opt. Soc. Am. B 16, 1220 (1999).
 [22] 차용호, 강영일, 홍경한, 남창희, 새물리 37, 469 (1997)
 [23] C. P. J. Barty, C. L. Gordon III, and B. E. Lemoff, Opt. Lett. 19, 1442 (1994).
 [24] J. Zhou, C.-P. Huang, M. M. Murnane, and H. C. Kapteyn, Opt. Lett. 20, 64 (1995).

저 자 소개



차용호(車龍鎬)

1971년 3월 20일생. 1993년 한국과학기술원 물리학과 졸업. 1995년, 한국과학기술원 물리학과 졸업(석사). 2000년 2월, 한국과학기술원 물리학과 박사과정.



남창익(南昌熙)

1957년 2월 14일생. 1977년 서울대 원자핵공학과 졸업. 1988년 Princeton Univ. Plasma Physics Ph. D. 1989-현재, KAIST 교수.