

극초단 레이저와 극초단 고출력 레이저의 개발

남창희

한국과학기술원 물리학과
대전시 유성구 구성동 373-1

Additive-pulse modelocking 기법을 이용하여 레이저 다이오드에 의해 펄핑된 Nd:YLF 레이저에서 1.5 ps의 펄스폭을 갖는 펄스를 얻었으며, Kerr-lens modelocking 기법에 의해 Ti:S 레이저에서 27 fs의 펄스를 얻었다. 이러한 극초단 레이저의 구성과 모드록킹 원리를 설명하며, 이들을 효율적용 증폭하여 극초단 고출력 레이저로 구성하는 Chirped pulse amplification 기법에 대해 설명한다.

I. 서론

Additive-pulse modelocking (APM)과 Kerr-lens modelocking (KLM)과 같은 새로운 모드록킹 기법의 개발에 따라 종전에 얻을 수 없었던 짧은 펄스폭의 레이저 동작이 가능케 되었으며,^[1] 이러한 극초단 레이저를 칩두 공진기로 하여 이를 효율적으로 증폭시킬 수 있는 Chirped-pulse amplification (CPA) 방법을 도입함으로써 소규모 실험실에서 1 TW 이상의 칩두 출력을 내는 극초단 고출력 레이저가 등장하게 되었다.^[2] 매질이 갖는 비선형 굴절율을 이용하여 빛의 세기에 따른 투과율 (또는 반사율)을 변조하는 APM이나 KLM 같은 수동형 모드록킹 방법은 종래의 포화 흡수체를 사용하는 수동형 모드록킹에 비해 훨씬 짧은 펄스폭을 갖는 레이저의 발전을 가능케 하였다. APM 기법은 연속 발전하는 주공진기와 광섬유 같은 비선형 매질을 포함하는 외부 공진기를 결합하여 모드록킹을 시키는 방법이다. 이 APM 기법을 레이저 다이오드로 펄핑되는 Nd:YLF 레이저에 적용하여 2 ps 이하의 펄스폭을 갖는 공진기를 개발하였다.^[3] KLM 방법은 강한 새기의 빛이 매질을 통과할 때 나타나는 비선형 굴절율을 이용하여 모드록킹이 일어날 때 공진기의 발전 조건이 유리하도록 하는 방법이다. 광범위 파장 영역에서 이득을 갖는 Ti:S 레이저에서 이득 매질이 비선형 매질을 겸하도록 하여 KLM을 일으킬 수 있다. 5 W의 Ar 레이저로 펄핑되는 Ti:S 레이저에서 KLM 방법에 의해 27 fs ($\Delta\lambda = 36$ nm)의 펄스폭을 갖는 레이저 출력을 얻었다.^[4]

극초단 펄스를 고출력으로 증폭할 때 가장 문제가 되는 것은 고출력 레이저에 의한 광화 부품과 이득

매질의 손상이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 극초단 펄스를 수백 ps 이상으로 늘린후, 이를 증폭단에서 충분히 증폭시키고 최종단에서 다시 펄스 압축을 하여 극초단 펄스를 회복하며 고출력을 내는 것이 CPA 방법이다. 1.5 ps의 출력을 내는 Nd:YLF 레이저를 칩두 공진기로 하고 이를 Nd:Glass 증폭단으로 증폭하여 1 TW 이상의 출력을 내는 시스템을 개발중에 있다.

II. 극초단 레이저

A. 레이저 다이오드로 펄핑된 APM Nd:YLF 레이저

고출력 레이저 시스템에서 열적특성이 우수한 Nd:Phosphate glass 증폭기가 대구경 증폭단으로 많이 활용되고 있고, 이 Nd:phosphate glass의 이득 중심 파장인 1.054 μm 과 발전 파장이 1.053 μm 로 잘 일치하고 있는 Nd:YLF 레이저는 칩두 공진기로서 활용되고 있다. Nd:YLF 레이저를 레이저 다이오드로 펄핑하여 모드록킹하는 경우가 플래시 램프로 펄핑하여 모드록킹하는 경우보다 훨씬 짧은 펄스폭을 얻을 수 있으며, APM 방법을 쓰는 경우 2 ps 이하의 펄스를 얻을 수 있다.

Nd:YLF 이득 매질은 792 nm와 797 nm에 강한 흡수선이 있기 때문에, 790-800 nm 영역의 GaAlAs 레이저 다이오드를 이용하여 효과적으로 펄핑할 수 있다. 3 W GaAlAs 레이저 다이오드를 Nd:YLF의 최대 흡수선인 792 nm에 맞추어 광펄핑하는 경우, 별도의 냉각 장치없이 Nd:YLF 매질을 사용할 수 있기 때문에 플래시 램프 펄핑때 보다 훨씬 간단하

고 안정된 레이저를 제작할 수 있다. 연속 발진 Nd:YLF 레이저에서 2.8 W 의 LD 펌핑으로 1.1 W 의 출력을 얻어 전체 효율이 39 % 인 집힌 형태 공진기를 구성할 수 있었다.^[5]

APM 방법은 수동형 모드록킹의 한 방법으로 연속 발진하는 주 공진기와 비선형 매질을 포함하는 외부 공진기가 결합되어 이루어진다. 즉, 광섬유와 같은 비선형 매질에서 일어나는 자기 위상 변조 (Self-phase modulation) 된 외부 공진기의 펄스와 주 공진기에서 증폭된 펄스가 서로 간섭을 일으킴으로서, 출력거울이 세기 의존성 거울 (intensity-dependent mirror)과 같이 동작하여 극초단 펄스를 생성하는 것이 APM 방법이다. 반사율이 r 인 출력 거울의 유효 반사 계수의 크기, $|\Gamma|$, 는 외부 공진기의 길이가 주공진기의 정수배인 경우,

$$|\Gamma| \approx r + L(1-r^2)\Phi$$

로 표현된다. 여기서 L 은 비선형 매질을 포함하는 외부 공진기에서의 감쇄 비율이고 Φ 는 세기의 의존성을 갖는 비선형성에 의한 위상차를 나타낸다. 출력거울에서 주공진기 쪽으로 반사되는 펄스는 중심부에서 Φ 값이 크므로 강하게 반사되고 가장자리에서는 약하게 반사 되어 결과적으로 펄스폭이 축소되는 효과를 갖게 된다.

비선형 매질로 사용되는 광섬유에서 발생된 군속도 분산을 보상하기 위해 주공진기 내에 프리즘 쌍을 설치한 APM Nd:YLF 레이저의 구성도가 그림1에 나타나 있다. Brewster 각으로 되어 있는 Nd:YLF 봉에서 발생된 비점수차를 보정하기 위하여 집힌 형태의 공진기를 구성하였으며, 비선형 매질로는 1.2 m 의 단일모드 광섬유를 사용하였다. 장시간 동안 주공진기와 외부 공진기의 광학적 길이가 정수배로 일치할 수 있도록 하기 위해, 광섬유를 원통형 PZT 에 감아서 PZT 에 인가된 전압을 조절하여 외부 공진기의 광학적 길이를 주공진기의 광학적 길이와 일치시켜 주는 방법을 사용하였다. 모드록킹된 레이저 출력이 최대가 되도록 되막입 안정기로 PZT 에 인가된 전압을 조절하여 이 레이저의 안정성을 얻었다. 100 MHz 로 작동되는 Nd:YLF 레이저에서 3 W 로 펌핑할때 최고 215 mW 의 모드록킹된 평균 출력을 얻었으며, 1시간 정도 재시작 없이 모드록킹을 유지할 수 있었다. 자체상관계로 측정된 펄스폭은 1.5 ps 정도 이었으며, 선폭은 0.6 nm 이었다.

B. KLM Ti:S 레이저

Ti:S 레이저는 680-1130 nm 의 광범위한 영역에

서 펄드초의 극초단 레이저로서 많은 연구가 되어 왔다.^[1] Ti:S 는 레이저 발진 윗 준위의 수명이 3 μ s 정도로 짧아서 플래시 램프 펌핑에 의해 광펄핑을 하기 어려운 점이 있기 때문에, Ar⁺ 레이저나 Nd:YAG 의 제2조화파로 광펄핑하는 방법이 주로 사용된다. Ti:S 레이저의 모드록킹은 동기화 펌핑이나 특별한 모드록킹 장치없이 모드록킹이 일어나는 KLM 방법이 주로 이용되며, 30 fs 이하의 펄스를 얻을 수 있다. 최근에는 특별히 설계된 분산 거울을 이용하여 ~10 fs 의 펄스를 얻은 결과도 보고되고 있다.^[6]

KLM 방법은 공진기 내에 존재하는 빛의 세기에 따라 공진기내의 손실 값이 다르도록 하는, 즉 세기가 센 빛만이 공진하도록 유도하는, 방법으로 모드록킹을 일으킨다. Ti:S 이득 매질 자체가 가지고 있는 비선형 굴절 현상인 광학적 Kerr 효과에 의한 자체 집속 (self-focusing) 을 이용하여 강한 레이저 모드만을 발진시키도록 하면, 모드록킹이 된 강한 세기의 빛이 형성 되는 경우가 모드록킹이 안된 빛에 우선하여 공진 조건을 만족하도록 유도할 수 있다.

이 방법은 1991년 Spence^[7] 등에 의하여 Ti:S 레이저에서 우연히 발견되어 수십 fs 의 극초단 펄스를 생성함을 보여 주었고, 더욱 짧은 극초단 펄스를 발생시키고자 하는 연구가 급속히 진행되었다. 최근에는 Cr:LiSAF, Cr:forsterite 및 Nd:YLF 레이저 등에서도 KLM 을 이용한 극초단 펄스 생성이 보고되고 있다.

1 ps 이하의 극초단 펄스가 매질을 통과할 때에는 군속도 분산 (Group velocity dispersion) 에 의하여 펄스 폭이 늘어나게 되므로, 이를 보상해 주는 것이 필요하다. 공진기 내의 이득 매질, 거울 등에서 양의 군속도 분산이 발생하므로, 이를 보상하기 위해 음의 군속도 분산을 주는 프리즘 쌍을 공진기 내에 설치하는 방법이 사용된다. 또한 50 fs 이하의 극초단 펄스를 생성하기 위해서는 3차 분산 효과도 펄스폭에 상당한 영향을 주는 것으로 보고되고 있다. 그러므로 3차 분산 효과를 최소로 만들기 위해서는 되도록 길이가 짧은 이득 매질과 3차 분산이 작은 프리즘을 사용해야 매우 짧은 펄스를 얻을 수 있다.

KLM Ti:S 레이저의 장치도가 그림2에 보여진다. 이득 매질은 Ti³⁺ 이온이 0.15 wt.% 도핑된 길이 4.75 mm 의 Ti:S 를 사용하였으며, 군속도 분산을 위한 프리즘은 용융실리카를 사용하였다. KLM 이 일어나기 위해 이득 매질에서 공진모드가 강하게 집속되어야 하므로, X형의 집힌 공진기 형태를 취했으

며, 5 W Ar⁺ 레이저를 펌핑했을때 반사율97%의 출력 거울을 사용하여 200mW의 모드록킹된 출력을 얻을 수 있었다.

펄스폭 측정을 위하여 간섭형 자체 상관기(interferometric autocorrelator)를 제작하였으며, 자체 상관기 내에서 펄스폭 확대가 일어나지 않도록 부품 선정에 유의 하였다. 측정된 펄스폭은 27 fs이며(그림3), 측정된 발전 선포는 36 nm 이었다. 이들로부터 계산된 time-bandwidth의 곱은 0.43이며, 이값은 sech² 펄스의 이론적인 값 0.315에 비해 약 1.4 배 큰 값으로 약간의 chirping이 존재하고 있음을 보여 주고 있다. 현재, 공진기의 최적화를 통해 20 fs 이하의 펄스를 얻기 위한 작업이 수행중에 있다.

III. 극초단 고출력 레이저

극초단 고출력 펄스를 효과적으로 증폭하려면 다음의 두가지 조건을 기본적으로 만족해야 한다. 첫째, 증폭기로 부터 최대 에너지를 얻기 위해 증폭기 내에서 레이저 펄스의 Fluence (F, 단위 면적당 에너지)가 포화 Fluence ($F_s = h\nu / 6:6 =$ 이득 단면적)에 접근해야 한다. 둘째, 증폭기 내에서 레이저의 세기가 비선형 현상에 의한 매질이나 광학 부품의 손상 한계보다 작아야 한다. 그러므로, 증폭기의 매질이나 광학 부품을 손상하지 않도록 하면서 최대한 증폭기에 저장된 에너지를 레이저에너지로 뽑아낼 수 있는 방법을 선택해야 한다.

Nd:glass 나 Ti:S 같은 매질은 높은 포화 fluence ($F_s \sim 1 \text{ J/cm}^2$)을 가지고 있어서 증폭기로서 알맞으나, 고체 레이저 매질이 가지고 있는 비선형성에 의한 손상 특성으로 인하여 영구적인 손상이 쉽게 가해질 수 있는 단점이 있다. 극초단 펄스들이와 같은 매질에서 그대로 증폭시키면 손실 문턱 세기 ($I_{th} \sim 5 \text{ GW/cm}^2$) 때문에 큰 출력으로 증폭시킬 수 없다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 CPA 방법이 개발되었다.⁽²⁾

CPA 방법은 첫째, 레이저 공진기에서 생성된 극초단 펄스를 100 ps - 1 ns 정도로 펄스 확대한 후에, 둘째, 증폭단에서 펄스폭이 확대된 펄스를 충분히 증폭 하며, 이를 다시 최종 단계에서 펄스 압축하여 원래의 펄스 폭으로 만들어 줌으로서 효율적인 극초단 고출력 레이저를 얻는 방법이다. APM Nd:YLF 레이저에서 생성된 1.5 ps의 펄스를 애돌이발 펄스 확대기 (grating pulse stretcher)를 통해 200 ps 정도로 펄스폭을 확대할 수 있었다. 이를 증폭하기 위하여 고리형 Nd:glass 재생 증폭기와 구

경 8 mm - 45 mm 인 일련의 Nd:glass 증폭기를 사용하려고 하고 있으며, 최종단에 한 쌍의 애돌이발을 써서 원래의 펄스폭으로 압축함으로써 1 TW 이상의 출력을 내는 극초단 고출력 레이저를 개발중에 있다.

IV. 결론

레이저 시스템의 전체적인 크기는 출력 에너지에 대략적으로 비례하므로, CPA 방법을 이용하여 고출력 레이저를 개발하면 적은 규모의 시스템으로 매우 높은 출력을 낼 수 있는 극초단 고출력 레이저 시스템을 실현할 수 있다. 이러한 시스템은 또한 적은 인원으로도 운영이 가능하므로, 대학규모의 실험실에서도 충분히 개발하여 여러가지 응용 연구에 활용할 수 있다. 본 연구에서 개발된 극초단 고출력 레이저를 이용하여 레이저와 물질의 상호작용, 극초단 광전자 발생, X-선 레이저 개발 등의 연구를 수행하려고 하고 있으며, 이에 필요한 10 - 400 A 영역의 XUV spectrograph를 자체 개발하였고 다른 진단 장치도 준비 중에 있다.

본 극초단 레이저와 극초단 고출력 레이저 개발을 위해 강용철, 이종무, 정태문, 양호순, 강영일, 차용호 등이 연구원으로 참여하고 있음을 밝힌다.

참고문헌

1. P.M.W. French, "The generation of ultrashort laser pulses," Rep. Prog. Phys. 58, 169(1995),
2. D. Strickland and G.Mourou, "Compression of amplified chirped optical pulses," Opt. Commun. 56, 219(1985).
3. 정태문, 이종무, 강용철, 남창희, "레이저 다이오드로 펌핑되는 Additive-pulse 모드록킹 Nd:YLF 레이저에서 1.8 ps 펄스의 생성," 새물리 (1995, 8월 발간 예정).
4. 차용호, 강영일, 남창희, "Kerr 렌즈 모드록킹된 Ti:Sapphire 레이저에서 27 fs의 극초단 펄스 발생," 새물리 (투고중).
5. 강용철, 이종무, 남창희, "레이저 다이오드로 펌핑되는 Nd:YLF 레이저의 발전 특성," 한국 광학 회지 4, 289(1993).
6. A. Stingl et al., "Sub-10-femtosecond, mirror-dispersion-controlled Ti:sapphire laser," Opt. Lett. 20, 602(1995).
7. D.E. Spence, P.N. Kear, and W. Sibbett, Opt. Lett. 16, 42(1991).

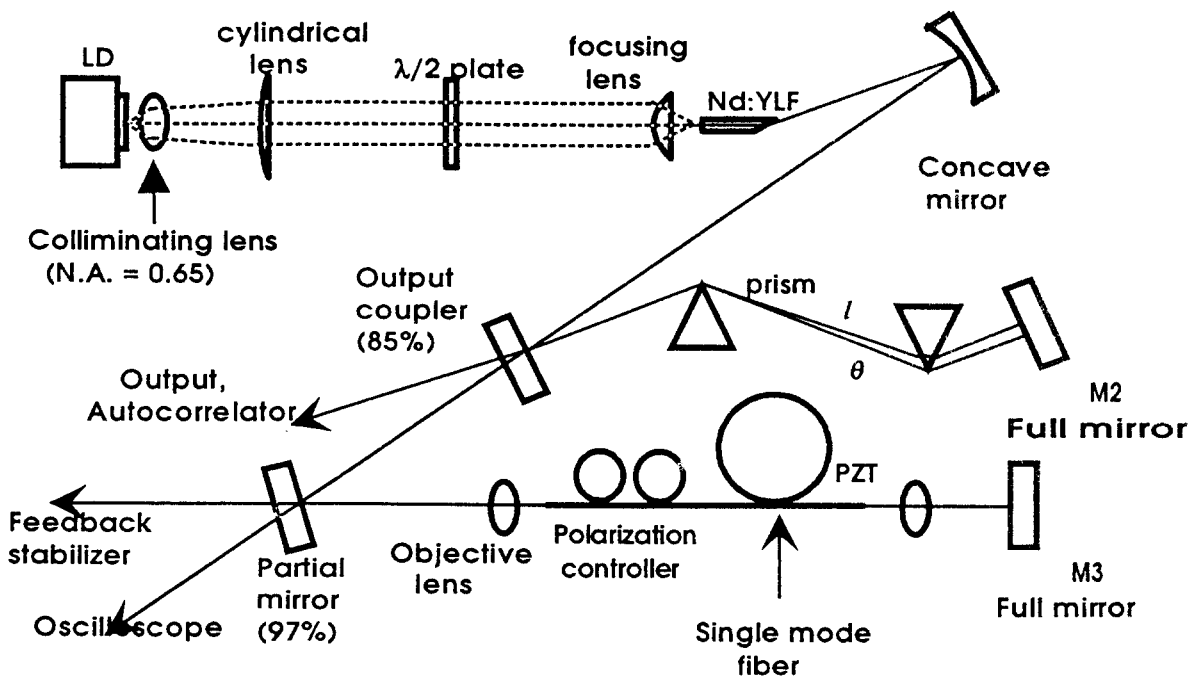


Fig. 1. Optical layout of LD-pumped APM Nd:YLF laser including SF19 prism pair for GVD compensation.

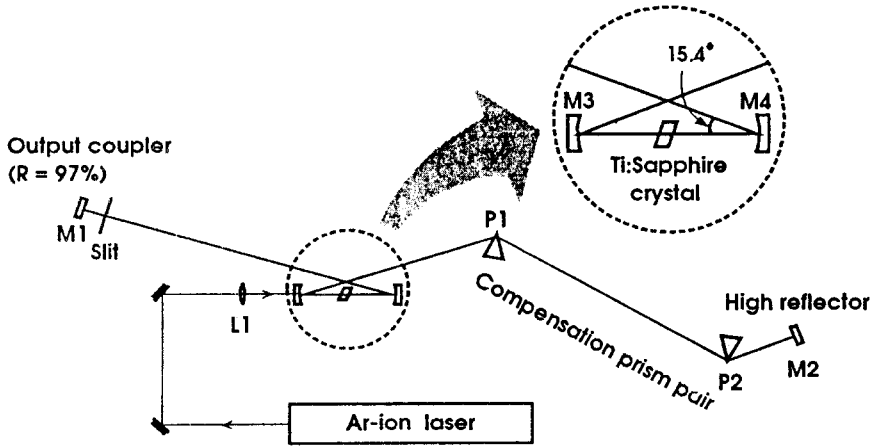


Fig. 2. Schematics of Ti:Sapphire laser with GVD compensation prism pair.

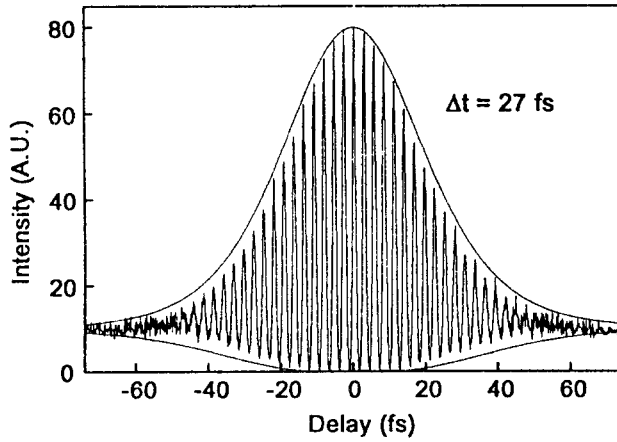


Fig. 3. Interferometric autocorrelation of mode-locked Ti:sapphire laser pulses.