

100 TW급 티타늄 사파이어 레이저 시스템을 위한 펄스 확장기와 펄스 압축기의 설계

Design of Pulse Stretcher and Pulse Compressor for 100 TW Ti:sapphire Laser System

최일우, 유태준, 노영철, 고도경, 이종민
광주과학기술원, 고등광기술연구소
e-mail : iwchoi@apri.gist.ac.kr

새로운 개념의 레이저 증폭기술인 CPA(chirped pulse amplification)⁽¹⁾ 기술이 1980년대 중반부터 개발되면서, 레이저 증폭기 및 광학부품의 손상이 없이 극초단 초고출력 레이저 시스템을 제작할 수 있게 되었다.⁽²⁾ 발전선 폭이 넓은 티타늄 사파이어 레이저 증폭기에 CPA 기술을 적용하여, 실험실 규모의 공간 안에 수십 TW 이상의 첨두출력을 가지는 fs급 고출력 레이저를 설치할 수 있게 되었다. 이러한 기술의 발전에 따라 2003년 초에는 일본원자력연구소에서 첨두출력 850 TW의 PW급 티타늄 사파이어 레이저 개발에 성공하였다.⁽³⁾ CPA 기술을 적용하는 레이저 시스템은 극초단 레이저 펄스 발진기, 펄스 확장기, 레이저 증폭기, 펄스 압축기로 구성된다. 레이저 발진기에서 나온 극초단 레이저 펄스는 펄스 확장기에 의해 펄스폭이 수백 ps 이상으로 확장되어, 레이저 증폭기에 의해 에너지가 증폭된 후, 펄스 압축기에 의해 발진기의 원래 펄스폭과 비슷한 정도로 압축된다.

국내에서는 2004년 7월 광주과학기술원 고등광기술연구소에, 펄스폭이 30 fs 이하이고 첨두출력이 25 TW인 티타늄 사파이어 레이저 시스템이 구축되었고, 2005년 6월까지 100 TW급의 티타늄 사파이어 레이저 시스템이 구축될 예정이다. 현재 구축된 25 TW 레이저 시스템은 레이저 발진기, 펄스 확장기, 재생 증폭기와 2단의 다중통과 증폭기(multi-pass amplifier)로 구성되어 있다. 100 TW급 레이저 시스템에서는 25 TW 레이저 시스템의 최종 증폭기에 다중통과 증폭기를 하나 더 설치하여 5 J 이상의 에너지를 얻고, 펄스 압축기를 사용하여 30 fs급으로 레이저 펄스를 압축할 예정이다. 본 논문에서는 이 100 TW급 레이저 시스템에 사용될 펄스 확장기와 펄스 압축기의 설계 내용이 소개된다. 펄스 확장기는 한 개의 회절격자, 곡률중심이 일치하도록 배열된 오목거울과 볼록거울, 그리고 루프거울(roof mirror)로 구성된 Öffner triplet형 펄스 확장기이다.⁽⁴⁾ 사용되는 회절격자의 홈수(groove number)는 1200 grooves/mm, 오목거울의 초점거리는 300 mm이다. 펄스 압축기는 평행하게 배치된 홈수가 1480 grooves/mm인 두개의 회절격자와 루프거울로 구성된 Treacy형 펄스 압축기이다.⁽⁵⁾ 펄스 압축기를 통과한 레이저 펄스가 그 스펙트럼에 해당하는 변환 제한된(transform-limited) 펄스폭을 가지려면, 레이저 펄스가 통과하는 펄스 확장기, 각종 광학부품 및 레이저 결정, 펄스 압축기 안에서 발생하는 군지연이 레이저 펄스 스펙트럼에 걸쳐 거의 일정한 값을 가져야 한다.

레이저 시스템의 구성요소 중 양의 군지연 분산을 가지는 펄스 확장기, 각종 광학부품 및 레이저 결정과 음의 군지연 분산을 펄스 압축기에서 발생하는 위상지연을 합산하여 총 위상지연 $\phi(w)$ 를 계산하였다. 레이저 발진기에서 나오는 레이저 펄스의 시간분포가 $E_{in}(t)$, 레이저 시스템 전체의 주파수에 따른 투과도가 $T(w)$ 이면, 압축된 펄스의 시간분포는

$$E_{out}(t) = \mathbb{F}^{-1}\{\mathbb{F}\{E_{in}(t)\} \cdot T(w) \cdot e^{i\phi(w)}\} \quad (1)$$

로 표현된다. 여기서, $\mathbb{F}\{\}$ 는 푸리에 변환, $\mathbb{F}^{-1}\{\}$ 는 푸리에 역변환을 의미한다. 레이저 펄스가 통과하는 각종 광학부품 및 레이저 결정의 길이는 정해져 있으므로, 압축된 펄스폭이 최소가 되는 펄스 확장기와 펄스 압축기의

최적 정렬조건을 찾아야 한다. 펄스 확장기의 정렬조건에서 변화시킬 수 있는 조건은 회절격자에 대한 레이저 펄스의 입사각(α_1)과 회절격자와 오목거울 사이의 거리(s)이고, 펄스 압축기에서는 회절격자에 대한 입사각(α_2)과 두 회절격자 사이의 거리(L_2)이다. 실제의 계산에서 투과도 $T(w)$ 는 설정하기 어려운 값이므로, 그림 1과 같이 25 TW 레이저 시스템의 최종 증폭기에서 방출되는 스펙트럼 분포를 $\mathbb{F}\{E_{in}(t)\} \cdot T(w)$ 의 값으로 사용하였다. 펄스 확장기와 펄스 압축기의 정렬조건을 변화시키면서 식 (1)을 계산하여, 최소의 펄스폭을 생성하는 최적 정렬조건을 찾았다. 그림 2는 이 최적 정렬조건에서 식 (1)으로 계산된 레이저 펄스의 시간분포, $E_{out}(t)$ 와 25 TW 레이저 시스템의 최종 증폭기에서 방출되는 스펙트럼의 푸리에 역변환, $\mathbb{F}^{-1}\{\mathbb{F}\{E_{in}(t)\} \cdot T(w)\}$ 을 비교해 보여주고 있다. 결정된 정렬조건으로 펄스 확장기와 펄스 압축기를 정렬하면 30 fs급의 레이저 펄스를 얻을 수 있다. 본 논문에서는 향후 구축될 PW급 티타늄 사파이어 레이저 시스템에 사용될 펄스 확장기와 펄스 압축기의 최적 정렬조건도 소개될 예정이다.

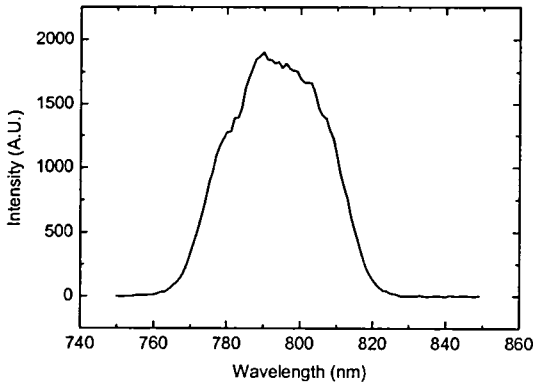


그림 1. 25 TW 티타늄 사파이어 레이저 시스템의 최종 증폭기에서 방출되는 레이저 스펙트럼.

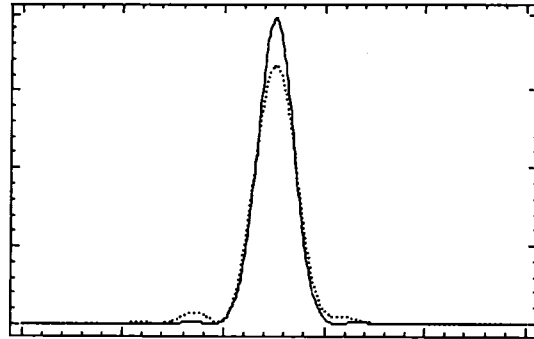


그림 2. 100 TW급 티타늄 사파이어 레이저용 펄스 확장기와 펄스 압축기의 최적 정렬조건에서 압축된 펄스의 모양(점선)과 25 TW 레이저 증폭 스펙트럼의 푸리에 역변환(실선).

1. D. Strickland and G. Mourou, "Compression of amplified chirped optical pulses," *Opt. Commun.* 56, 219-221 (1985).
2. M. D. Perry and G. Mourou, "Terawatt to petawatt subpicosecond lasers," *Science* 64, 917-924 (1994).
3. M. Aoyama, K. Yamakawa, Y. Akahane, J. Ma, N. Inoue, H. Ueda, and H. Kiriya, "0.85-PW, 33-fs Ti:sapphire laser," *Opt. Lett.* 28, 1594-1596 (2003).
4. G. Cheriaux, P. Rousseau, F. Salin, J. P. Chambaret, B. Walker, and L. F. Dimauro, "Aberration-free stretcher design for ultrashort-pulse amplification," *Opt. Lett.* 21, 414-416 (1996).
5. E. B. Treacy, "Optical pulse compression with diffraction grating," *IEEE J. Quantum Electron.* QE-5, 454-458 (1969).
6. J. Squier, C. P. J. Barty, F. Salin, C. L. Blanc, and S. Kane, "Use of mismatched grating pairs in chirped-pulse amplification systems," *Appl. Opt.* 37, 1638-1641 (1998).