

펨토초 레이저 펄스의 시간특성 측정과 제어

Measurement and Control of the Temporal Characteristics of Femtosecond Laser Pulses

홍경한*, 이용수, 성재희, 남창희

한국과학기술원 물리학과 및 걸맞는 X선 연구단

pman@bomun.kaist.ac.kr

펨토초 레이저의 개발은 커렌즈 모드록킹 (Kerr-lens mode-locking; KLM) 기술이 티타늄사파이어 이득매질에 적용되면서 1990년대에 들어 급격하게 이루어졌다. 구조가 간단하면서 안정적인 KLM 티타늄사파이어 레이저는 현재 펨토초 레이저 광원의 표준을 이루고 있으며, 처프펄스 증폭 (chirped-pulse amplification; CPA) 방식을 이용하여 소규모의 테라와트급 고출력 펨토초 레이저 제작에도 이용되고 있다. 특히, 1990년대 말에는 CPA 증폭단을 갖춘 KLM 티타늄사파이어 레이저가 상용화되면서 물리, 화학과 같은 기초 분야에서뿐만 아니라 의료용, 산업용으로도 활용이 확대되고 있다. 이와 같은 광범위한 펨토초 레이저 펄스의 응용에 있어서 선행되어야 할 가장 중요한 요소는 레이저 펄스의 시간폭과 위상 등의 시간특성을 정확히 진단하고 이를 제어하는 일이다. 본 발표논문에서는 펨토초 레이저 펄스를 진단하는 방법들을 알아보고 새로운 방법을 제시하며, 레이저의 위상 특성과 관련하여 주파수 처프와 절대위상을 제어하는 방법들을 기술한다.

펨토초 시간 영역의 신호는 전자장비들의 시간상수 특성상 직접적으로 진단하는 것이 불가능하므로 자기자신을 참조하는 (self-referencing) 방식인 자체상관계를 이용하여 진단하여왔으며, 1990년대에 개발된 주파수분해 광게이팅(frequency-resolved optical gating; FROG)⁽¹⁾와 주파수 위상 간섭계(spectral-phase interferometry for direct electric-field reconstruction; SPIDER)⁽²⁾와 같은 방법들도 자체상관계와 흡사한 광학적 구조를 가지고 있다. 자체상관계는 펄스폭을 알아내기 위하여 펄스의 모양을 가정하는 방법을 사용하였기 때문에 펄스폭이 짧아질수록 오차가 심해지는 단점이 있는 반면, FROG와 SPIDER 방법들은 자체상관계의 이러한 단점을 보강하여 정확한 펄스의 진단이 가능하게 하였다. 그러나, 최근 들어 자체상관신호로부터 펄스의 모양과 위상을 알아내는 방법들이 연구되어 실험적으로도 사용되고 있다. 그림 1에서는 진화 알고리즘을 이용한 간섭형 자체상관신호로부터 펄스의 위상 복원법⁽³⁾ (evolutionary phase retrieval from interferometric autocorrelation; EPRIAC)으로 10 펨토초 미만의 펄스를 진단한 결과를 보여준다. 이러한 결과는 실험적으로 간단한 자체상관계로 펄스를 정확히 진단할 수 있음을 보여주며 펄스의 진단 방법에 있어서 선택의 폭을 넓혀준다.

한편, 다양한 방법으로 레이저 펄스의 위상을 제어하여 펄스를 압축하거나 펄스폭을 조정할 수 있는데, 에델이발 쌍이나 프리즘 쌍, 처프거울 등의 수동적인 소자를 이용하는 방법과 음향광학적 소자, 변형거울, 액정 소자 등의 능동적 소자를 이용하는 방법으로 크게 나눌 수 있다. 수동적으로 레이저 펄스를 제어하는 좋은 예는 CPA 레이저의 펄스 압축기에서 찾을 수 있다. 펄스 압축기는 양의 처프되어 시간폭이 매우 길어진 상태로 증폭된 펄스에 음의 분산을 줌으로써 처프를 없애 펄스폭을 줄이는 역할을 하며 주로 에델이발 쌍으로 구성되어 있다. 이 과정에서 펄스 압축기의 에델이발 쌍 간의 거리를 조절해 줌으로써 선형적인 처프와 펄스폭을 조정할 수 있으며⁽⁴⁾ 이렇게 발생된 펄스를 이용하여 위상에 민감한 물리, 화학적 현상들을 걸맞게 제어할 수 있다.⁽⁵⁾ 한편, 능동적인 소자로는 다양한 모양의 펄스들을 만들 수 있어 보다 미세한 제어가 가능한 장점이 있다. 특히, 변형거울의 경우 경제적이면서도 높은 반사율을

갖는 능동소자이므로 손실이 낮은 펄스 변형기로 사용하기에 적합하다.

레이저 펄스의 폭이 10 펨토초 미만이면 펄스 싸개(envelope) 안에 광학주기가 2-3개 밖 존재하지 않게 되는데, 이러한 경우에는 싸개의 봉우리와 광운반자(carrier)의 봉우리가 일치하는지의 여부에 따라 펄스의 모양이 달라지게 되며 빛과 물질의 상호작용에도 영향을 준다. 두 봉우리간의 위상 차이를 운반자 싸개 위상(carrir-envelope phase; CEP)라고 하며 위상의 상수항에 해당하므로 절대위상이라고도 한다. 따라서 10 펨토초 레이저 펄스의 진단에는 CEP 값도 측정해야만 하는데, 최근 들어 펄스 간 CEP 변화의 측정과 안정화에도 많은 연구가 진행되었다.⁽⁶⁾ 그림 2는 KLM 티타늄사파이어 레이저 내부의 프리즘을 조정하여 펄스 간 CEP 변화량이 바뀌는 것을 보여준다.⁽⁷⁾ CEP를 안정화함으로써 펄스폭 뿐만 아니라 펄스 내의 광운반자의 모양도 같은 펄스들을 생성할 수 있다.

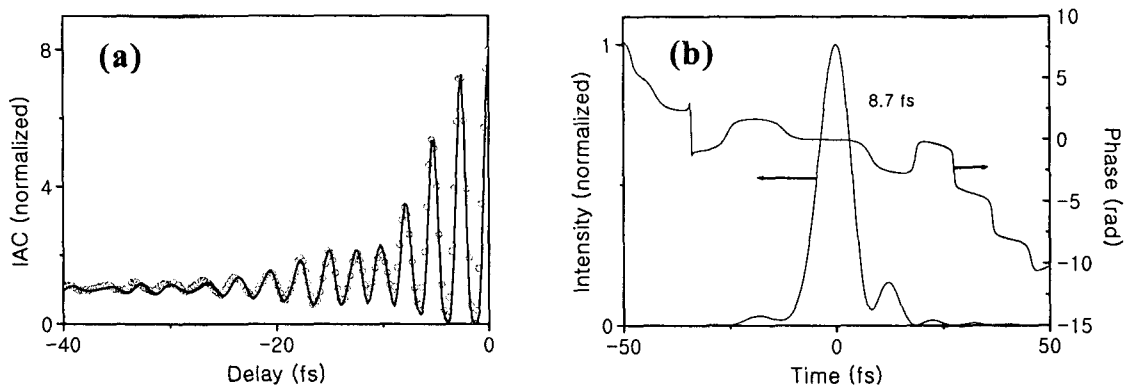


그림 1 측정된 간섭형 자체상관신호(a의 원)와 복원된 자체상관신호(a의 선) 및 전기장(b)

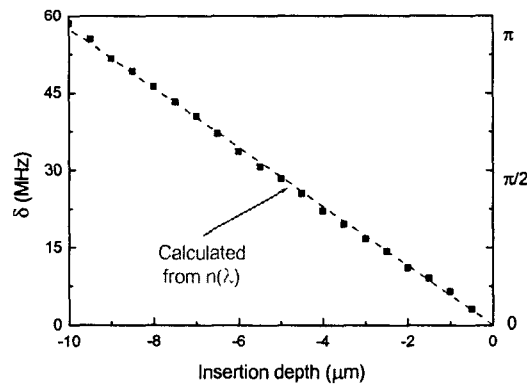


그림 2 공진기 내부 프리즘 삽입량에 따른 펄스 간 CEP 차이의 변화

참고문헌

1. E. Trebino and D. J. Kane, J. Opt. Soc. Am A **10**, 1101 (1993).
2. C. Iaconis and I. Walmsley, Opt. Lett. **23**, 792 (1998).
3. K.-H. Hong, Y. S. Lee, and C. H. Nam, J. Opt. Soc. Am. B (submitted).
4. K.-H. Hong, J. H. Sung, Y. S. Lee, and C. H. Nam, Opt. Commun. **213**, 193 (2002).
5. D. G. Lee, J. -H. Kim, K.-H. Hong, and C. H. Nam, Phys. Rev. Lett. **87**, 243902 (2001).
6. A. Apolonski *et al.*, Phys. Rev. Lett **85**, 740 (2000); G. G. Paulus *et al.*, Nature **414**, 182 (2001); H. R. Telle *et al.*, Appl. Phys. B **69**, 327 (1999); D. J. Jones *et al.*, Science **288**, 635 (2000).
7. K.-H. Hong, T. J. Yu, Y. S. Lee, C. H. Nam, and R. S. Windeler, J. Kor. Phys. Soc. (2003. 1).