

# 1-kHz CPA 레이저 시스템의 절대위상 안정화

## Carrier-envelope phase stabilization of 1-kHz CPA laser system

이용수, T. Imran, L. Vetrivel, 남창희  
한국과학기술원 물리학과 및 걸맞는 X선 연구단  
dragon94@kaist.ac.kr

보다 더 짧은 레이저 펄스를 만들기 위한 극초단 레이저 기술의 발전으로 수 펨토초의 펄스폭을 가지는 레이저의 발생이 용이해졌다. 처프 거울을 이용해서 내부 분산을 정밀하게 보정한 공진기에서 직접적으로 5 펨토초 레이저 펄스를 생성할 수 있으며, CPA 방법을 이용해서 증폭 한 경우에도 추가적인 Self-Phase-Modulation (SPM)을 이용해서 높은 출력의 5 펨토초 레이저를 생성할 수 있다.<sup>(1,2)</sup> 5 펨토초 펄스는 중심 파장의 2 주기를 채 포함하지 않는다. 많은 주기를 포함하는 레이저 펄스와 달리 한두 주기만을 포함하는 레이저 펄스는 운반자와 포락선의 봉우리 사이의 위상 (Carrier-Envelope Phase), 즉 절대위상에 따라서 펄스 모양이 크게 달라지기 때문에 빛-매질 상호작용에서 중요한 변수로 작용한다.

티타늄 사파이어 공진기에서 나오는 레이저 펄스열은 공진기 내부의 군속도와 위상속도 차이에 의해서 펄스 간에 일정한 위상 미끄러짐이 일어난다. 그리고 여러 요인으로 인해서 위상 미끄러짐 양도 요동을 가진다. 절대위상 안정화란 펄스 간 위상 미끄러짐 양을 일정하게 만드는 것을 말한다. 펄스 간 위상 미끄러짐은 공진기 내부의 군속도와 위상속도를 능동적으로 조절함으로써 일정하게 만들 수 있다. 우리는 시간영역에서 맥놀이 신호를 되먹임 신호로 이용하는 직접 잠금 방법 (Direct Locking Method)<sup>(3)</sup>을 이용해서 펄스 간 위상 미끄러짐을 영으로 만들었다. 이 경우 공진기에서 나오는 모든 레이저 펄스는 같은 절대위상을 가지게 된다. 아래 그림1은 절대위상이 안정화된 결과를 보여주고 있다. 되먹임을 통해서 펄스 간 위상 미끄러짐을 나타내는 맥놀이 신호를 DC 신호로 만들었다. DC 신호는 펄스 간 위상 미끄러짐이 영이 되었음을 의미한다. 그리고 맥놀이 신호의 봉우리 값과 DC 신호의 표준편차를 이용해서 계산된 위상의 떨림 값은 0.058 rad이고 이는 레이저 펄스가 25 아토초 내에서 안정화되었음을 의미한다.

이와 같이 공진기에서 나오는 레이저 펄스열의 절대위상이 안정화 되었다 해도 침투 출력이 약해서 빛-매질 상호작용을 통한 절대위상의 효과를 확인하기가 어렵다. 절대위상의 효과를 확인하기 위해서는 절대위상이 안정화된 고출력 수 펨토초의 레이저 펄스가 필요하다. 절대위상이 안정화된 펄스를 증폭할 때 추가적인 절대위상의 요동이 발생한다. CPA 방법을 통해서 증폭된 레이저 펄스의 절대위상 안정화를 위해서는 증폭 과정에서 발생한 위상의 변화를 보상해야한다. 증폭된 펄스의 절대위상 변화는 스펙트럼 간섭계 (Spectral Interferometry)<sup>(4)</sup>를 통해서 측정할 수 있다. 그림 2는 스펙트럼의 간섭 신호를 보여준다. 간섭무늬 봉우리의 움직임을 통해서 증폭된 펄스의 절대위상 변화를 확인할 수 있다. 그림 2의 오른쪽 그래프는 공진기의 절대위상이 안정화 된 경우와 안정화 되지 않은 경우를 연속적으로 보여주고 있다. 절대위상이 안정화된 경우에 그렇지 않은 경우보다 간섭무늬의 요동이 작음을 확인할 수 있다. 우리는 이러한 스펙트럼 간섭 신호를 이용해서 추가적인 절대위상의 요동을 보상해서 1-kHz CPA 레이저 펄스의 절대위상을 안정화하고자한다.

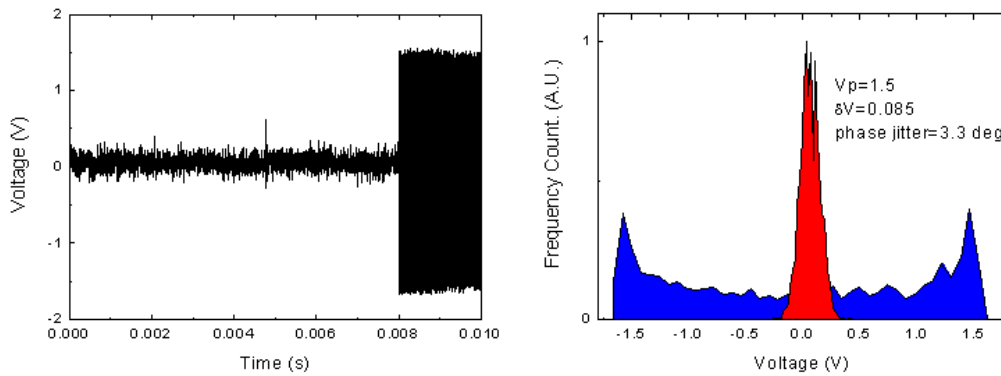


그림 1. 티타늄 사파이어 레이저 공진기의 절대위상 안정화. 공진기에 되먹임이 가해졌을 때 절대위상이 안정화 되어 맥놀이 신호는 0 볼트 근처에서 DC 신호가 되었고 되먹임을 멈췄을 때 펄스 간 위상 미끄러짐으로 맥놀이 신호를 볼 수 있다. 절대위상이 안정화된 경우에 측정된 위상의 떨림은 0.058 rad이다.

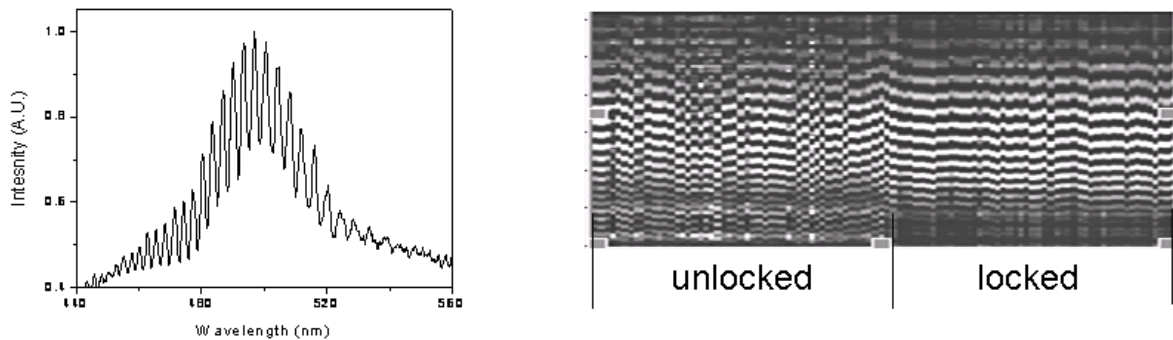


그림 2. 스펙트럼 간섭계를 이용한 증폭된 펄스의 절대위상의 요동 측정. 공진기에서 나오는 레이저 펄스의 절대위상이 안정된 경우가 안정되지 않은 경우에 비해서 절대위상의 요동이 작음을 확인할 수 있다.

**참고문헌**

1. U. Morgner, F. X. Kartner, S. H. Cho, Y. Chen, H. A. Haus, J. G. Fujimoto, E. P. Ippen, V. Scheuer, G. Angelow, and T. Tschudi, "Sub-two-cycle pulses from a Kerr-lens mode-locked Ti:sapphire laser," *Opt. Lett.* **24**, 411-413 (1999).
2. J. H. Sung, J. Y. Park, T. Imran, Y. S. Lee, and C. H. Nam, "Generation of 0.2-TW5.5-fs optical pulses at 1 kHz using a differentially pumped hollow-fiber chirped-mirror compressor," *Appl. Phys. B* **82**, 5-8 (2006).
3. Y. S. Lee, J. H. Sung, C. H. Nam, T. J. Yu, and K.-H. Hong, "Novel method for carrier-envelope-phase stabilization of femtosecond laser pulses," *Opt. Express* **13**, 2969 (2005).
4. M. Kakehata, H. Takada, Y. Kobayashi, and K. Torizuka, "Single-shot measurement of carrier-envelope phase changes by spectral interferometry," *Opt. Lett.* **26**, 1436-1438 (2001).