

절대위상이 안정화된 티타늄 사파이어 레이저 펄스의 위상 안정도 측정

Out-of-loop measurement of the carrier- envelope-phase stabilized Ti:sapphire laser pulses

이용수*, 성재희, 남창희
한국과학기술원 물리학과 및 걸맞는 X선 연구단
dragon94@kaist.ac.kr
유태준
고등광기술 연구소

전기장은 중심 진동수를 가지고 진동하는 운반자와 이를 싸고 있는 포락선으로 구성된다. 운반자 봉우리와 포락선의 봉우리 사이의 위상을 운반자-포락선 위상(carrier-envelope phase CEP) 또는 절대위상(absolute phase)이라고 한다. 일반적으로 레이저와 물질의 상호작용에서 물질은 주로 포락선의 제곱에 비례하는 세기에만 영향을 받는다. 그러나 포락선이 단지 몇 개의 운반자 진동을 포함하는 극초단 고출력 레이저 펄스의 경우에는 레이저 펄스의 세기뿐만 아니라 절대위상도 중요한 변수가 된다⁽¹⁾.

극초단 레이저로 가장 널리 쓰이는 티타늄 사파이어 레이저는 커렌즈 모드잠금(Kerr lens mode-locking) 방법을 이용해서 10 펨토초 미만의 레이저⁽²⁾ 펄스를 쉽게 만들어 낼 수 있다. 이 경우 포락선은 단지 두 개 혹은 세 개의 운반자 진동을 포함하기 때문에 이러한 펄스를 이용하는 실험에서 절대위상의 제어는 중요하다. 모드잠금 방법에 의해서 만들어지는 레이저 펄스열은 임의의 절대위상을 가지고 있지만, 연속되는 펄스 사이의 절대위상 차이는 레이저 공진기내의 균속도와 위상속도 차이에 의해서 만들어지기 때문에 일정하게 유지된다. 그러나 공기나 온도의 요동과 공진기 떨림으로 인하여 절대위상의 차는 요동이 있다. 절대위상을 안정화하기 위해서는 먼저 연속되는 펄스의 절대위상 차를 측정해야만 한다. 이 값은 f-to-2f 간섭계 방법⁽³⁾을 이용해서 측정될 수 있으며 이 방법을 사용하기 위해서는 미세구조 광섬유에 레이저 펄스를 통과시켜 옥타브 스펙트럼을 만들어 내야한다. 여기서 측정된 값을 레이저 공진기에 되먹임 해서 절대위상을 안정화 할 수 있다. 거의 모든 연구 단체에서 주파수 영역에서의 되먹임을 이용해서 절대위상을 안정화 하고 있다. 그러나 이 경우 되먹임을 위한 시스템이 복잡하고 펄스간의 절대위상 차를 영으로 만들기 위해서는 음향광학 변조기를 f-to-2f 간섭계에 추가적으로 설치해야만 한다. 그러나 우리 연구단에서 고안한 시간 영역에서의 되먹임 방법을 이용하면 보다 간단한 시스템으로 펄스간 절대위상 차를 영으로 만들 수 있다⁽⁴⁾. 시간 영역에서의 되먹임 방법을 이용해서 안정화된 티타늄 사파이어 레이저의 절대위상 떨림은 3.6° (0.063 rad)로 매우 작다.

그러나 이렇게 안정화된 절대위상은 실제 레이저 펄스열의 안정화가 아니라 미세구조 광섬유, f-to-2f 간섭계에서 생겨난 위상 오차와 잠금 회로에서의 오차가 모두 포함된 안정

화이다⁽⁵⁾. 그래서 실제 레이저 펄스열의 절대위상 안정화를 확인하기 위해서 절대위상 잠금 고리 밖에서의 절대위상 측정이 필수적이다. 아래의 그림은 절대위상 잠금 고리 내에서의 절대위상을 나타내고 있다. 이 실험을 통해서 실제 레이저 펄스의 절대위상은 시간이 지남에 따라서 점차 표류함을 알 수 있었다. 그리고 이러한 표류 양은 레이저 펄스를 증폭하는 과정에서 추가로 발생하는 절대위상 표류 양과 더불어 이차 되먹임을 통해서 보 상할 수 있다.

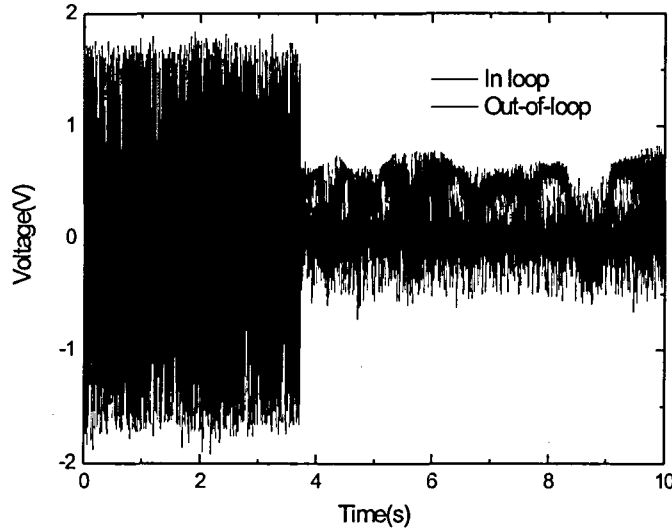


그림 1. 절대위상 잠금 고리 내에서의 절대위상.

참고문헌

1. A. Baltuska, Th. Udem, M. Uiberacker, M. Hentschel, E. Goulielmakis, Ch. Gohle, R. Holzwarth, V. S. Yakovlev, A. Scrinzi, T. W. Hansch, F. Krausz, "Attosecond control of electronic processes by intense light fields", Nature. 421, 611 (2003)
2. D. H. Sutter, G. Steinmeyer, L. Gallmann, N. Matuschek, F. Morier-Genoud, U. Keller, V. Scheuer, G. Angelow, and T. Tschudi, "Semiconductor saturable-absorber mirror-assisted Kerr-lens mode-locked Ti:sapphire laser producing pulses in the two-cycle regime", Opt. Lett. 24, 631 (1999)
3. H. R. Telle, G. Steinmeyer, A. E. Dunlop, J. Stenger, D. H. Sutter, and U. Keller, "Carrier-envelope offset phase control: A novel concept for absolute optical frequency measurement and ultrashort pulse generation", Appl. Phys. B. 69, 327 (1999)
4. Yong Soo LEE, Tae Jun Yu, Chang Hee Nam, "Stabilization of the carrier-envelope phase of femtosecond laser pulses using a time-domain feedback method" APLS 2004 (2004)
5. Tara M. Fortier, David J. Jones, Jun Ye, and Steven T. Cundiff, "Long-term carrier-envelope phase coherence", Opt. Lett. 27, 1436 (2002)