펨토초 레이저를 이용한 결맞음 다중 광원 개발 및 결맞음 밀도 포획

Coherent multi-frequency optical source generation using a femto-second laser and its application for coherent population trapping

문한섭, 박상언*, 김억봉*

부산대학교 물리학과, *한국표준과학연구원 기반표준부

hsmoon@pusan.ac.kr

모드 잠금된 펨토초 레이저는 펨토초 펄스 폭을 가지고 일정한 시간간격으로 발진하는 펄스 레이저이다. 모드 잠금된 펄스 레이저는 주파수 영역에서는 일정한 주파수 간격을 가진 여러 주파수 성분들로 변환할 수 있다. 주파수 영역에서 모드 잠금된 펨토초 레이저는 펄스 레이저의 반복률과 같은 주파수 간격을 가지고 이 특성을 광주파수 절대 측정 연구에 응용하는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 지금까지는 펨토초 레이저의 주파수 영역의 특징 중에서 일정한 주파수 간격을 갖는 특성을 이용하여 절대 주파수를 측정하는 것에 연구에 초점이 맞추어져 있었다. 하지만, 주파수 영역에서 모드 잠금된 펨토초 레이저는 일정한 주파수 간격을 갖는다는 특징과 함께 각각의 주파수 성분들은 서로 위상결맞는 연속 발진 레이저 광원들로 구성되어 있다는 매우 중요한 특성을 가지고 있다. 이 흥미로운 특성을 이용한다면 모드 잠금된 펨토초 레이저를 이용하여 광 주파수 차이를 갖는 연속 발진하는 위상 결맞음 다중 주파수 광원들을 얻을 수 있을 것이다.

위상 결맞음 다중 주파수 광원은 광주파수 영역에서의 광주파수 표준 연구에 매우 중요하다. 최근에 광주파수 표준연구는 광 격자 상태의 alkaline earth-like 원자를 이용한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 하지만, 이 원자들의 동위원소 중에서 짝수와 홀수 동위원소를 광주파수 표준으로 사용했을 때 장단점을 가지고 있다. 특별히 짝수 동위원소의 경우는 홀수 동위원소가 가지고 있는 시계 전이선의 에너지 준위 이동을 최소화할 수 있다는 장점을 가지고 있으나 시계 전이선에 대한 전이률이 0 라는 문제점이 있기 때문에 짝수 동위원소를 이용한 광주파수 표준 실현에 어려움이 있었다. 최근에 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 그림 1과 같은 다중 에너지 구도를 이용한 방법이 거의 동시에 제안되었다. 그림 1(a)는 R. Santra *et al.* 에 의해서 제안된 3준위 원자계를 이용한 방법이고[(1)], 그림 1(b)는 T. Hong *et al.* 에 의해서 제안된 4준위 원자계를 이용한 방법이다[(2)]. 하지만 그림 1과 같은 방법을 실현하기 위해서는 연구에서 사용하는 광원들은 서로 위상 결맞음 광원이 되어야 한다.

본 연구에서는 그림 1과 같은 구도를 실현하기 위하여 결맞음 다중 주파수 광원 생성 기술(coherent multi-frequency source generation technique)을 제안하고자 한다. 결맞음 다중 주파수 광원 생성 기술의 핵심 아이디어는 모드 잠금된 펨토초 레이저에서 얻어진 광주파수 빗에서 필요한 주파수 성분을 동시에 선택하는 것이다. 최근에 우리는 광주파수 빗에서 원하는 주파수 성분을 선택하고 증폭할 수 있는 펨토초 레이저 주파수 잠금법 (femto-second laser injection-locking; FSLIL) 을 개발하

였다[3]. 우리는 FSLIL를 두 개 이상의 성분을 선택하는데 이용함으로써 위상결맞는 다중 주파수 광원을 개발하였다. 그림 2는 결맞음 다중 주파수 광원 생성을 위해서 두 반도체 레이저에 동시에 FSLIL을 수행하는 실험 도식도이다.

우리는 모드 잠금된 펨토초 레이저로부터 위상결맞는 두 주파수 성분의 얻고, 세슘 D2 전이선을 이용하여 그림 3과 같은 구도에서 원자 결맞음 분광을 수행하였고, 그 결과 그림 4와 같이 약 1.4 kHz의 좁은 선폭을 가진 원자 결맞음 밀도 포획 분광 신호를 얻을 수 있었다[4]. 이 결과는 라디오 주파수 영역에서 결맞은 밀도 포획 (coherent population trapping ; CPT) 원자시계와 같은 개념을 광주파수 영역에서도 실현하는데 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

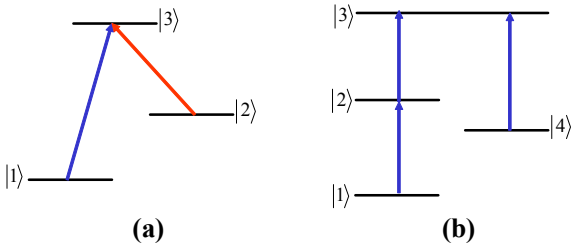

그림 1. 광주파수 표준 구현을 위한 다중 에너지 구도

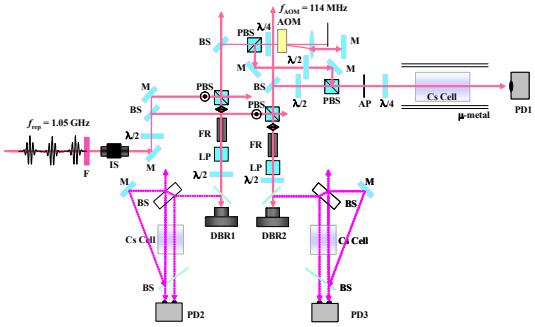

그림 2. 결맞음 다중 주파수 광원 생성을 위한 실험장치도

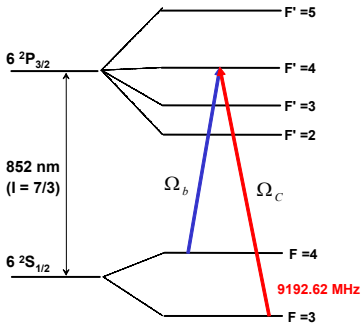

그림 3. 세슘 D2전이선에서 결맞음 밀도 포획 구도

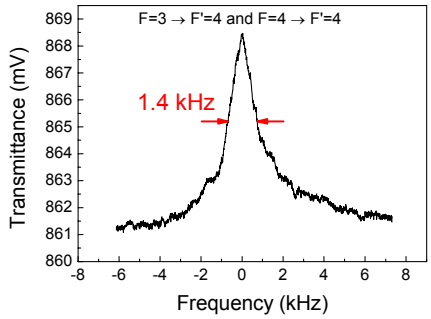

그림 4. 결맞음 밀도 포획 스펙트럼

1. R. Santra, E. Arimondo, T. Ido, C. Greene, and J. Ye, "High-accuracy optical clock via three-level coherence in neutral bosonic ^{88}Sr,"Phys. Rev. Lett. 94, 173002 (2005).
2. T. Hong, C. Cramer, W. Nagourney, and E. N. Fortson, "Optical clocks based on ultranarrow three-photon resonances in alkaline earth atoms," Phys. Rev. Lett. 94, 050801 (2005).
3. H. S. Moon, E. B. Kim, S. E. Park, and C. Y. Park, "Selection and amplification of modes of an optical frequency comb using a femtosecond laser injection-locking technique," Appl. Phys. Lett. 89, 181110 (2006).
4. H. S. Moon, S. E. Park, and E. B. Kim, "Selection and amplification of modes of an optical frequency comb using a femto-second laser injection-locking technique", Opt. Express, 15, 3265-3270 (2007).