

고차조화파를 이용한 60 아토초 펄스열 생성

Generation of a 60-as Pulse Train from High Harmonic Generation

고동혁, 김경택*, 박주윤, 남창희

카이스트 물리학과/ 결맞는 X선 연구단, *광주과학기술원 고등광기술연구소 펨토과학연구실
e-mail: dhko@kaist.ac.kr

Abstract High-order harmonics from gaseous atoms driven by an intense femtosecond laser pulse can form an attosecond pulse train. By selecting suitable harmonic generation conditions, the harmonic spectrum can be broad enough to form sub-hundred attoseconds. One serious limitation, however, comes from the inherent attosecond chirp originating from the harmonic generation process. We have proposed to compensate for the positive attosecond chirp by making use of negative group delay dispersion of a metallic x-ray filter or a gaseous medium. We generated 240-as pulses from neon and compressed them to 60 as after propagating through argon, close to the transform-limited duration of 47 as.

고출력 펨토초 레이저를 이용하여 기체 원자에서 발생된 고차조화파는 그 펄스폭이 아토초 영역에 이르는 새로운 연엑스선 광원이다. 이러한 고차조화파는 빗살 모양의 구조로 넓은 스펙트럼 영역에서 발생하기 때문에 아토초 펄스를 생성할 수 있다. 수소 원자 내부의 전자가 원자핵 주변을 대략 150 아토초 주기로 공전하므로, 100 아토초 이내의 펄스를 얻을 수 있다면 수소 원자 내부에서 전자의 상태를 시분해 분광을 통해 관찰할 수 있다. 그러나 고차조화파로부터 생성된 아토초 펄스는 본질적으로 양의 처프를 가지고 있기 때문에, 비록 스펙트럼 영역이 100 아토초 이내의 펄스를 만들만큼 충분히 넓더라도 실제 펄스폭은 200 아토초 이상인 펄스를 얻게 된다. 고차조화파를 통해 생성한 아토초 펄스가 본질적으로 양의 처프(아토초 처프라 불림)를 갖는 것은 준고전적 이론인 3단계 모델을 통해 잘 설명될 수 있다⁽¹⁾. 따라서 100 아토초에 근접한 극초단 펄스를 얻기 위해서는 이러한 양의 아토초 처프를 보상해야 한다.

연엑스선 영역에서는 기존에 가시광선 영역에서 적용되던 방법과는 다른 방법을 써야한다. 에돌이발, 처프 거울, 혹은 프리즘을 이용하여 처프를 보상하는 방법은 극자외선 영역에서 적용하기 힘들기 때문에, 변환한계 영역의 아토초 펄스 생성을 위해서는 새로운 방법을 찾아야 한다. 이를 위해 알루미늄 박막과 같은 얇은 고체 박막이 갖고 있는 음의 군지연분산을 이용하여 아토초 펄스를 압축하는 방법이 제시되었다⁽²⁾. 하지만 아토초 펄스의 처프를 충분히 보상하기 위해서는 박막의 두께가 상당히 두꺼워야하고 금속 박막의 산화로 인하여, 연엑스선 영역에서 아주 낮은 투과율을 가지게 된다. 다행히, 아르곤, 크립톤, 제논과 같은 비활성 기체가 관심 있는 스펙트럼 영역에서 큰 음의 군지연분산을 가지며 높은 투과율을 지니기 때문에, 아토초 펄스를 압축하는데 유용하게 사용할 수 있다. 아르곤의 경우를 살펴보면, 25차 이상의 고차조화파에서 80% 이상의 높은 투과율과 큰 음의 군지연분산을 가지고 있다⁽³⁾. 또한 얇은 고체 박막을 통해 처프를 보상하는 방법과는 달리, 기체를 이용한 아토초 펄스의 압축은 실험을 진행하는 중에 펄스를 압축하는 기체의 압력을 바꿔줌으로써 보상되는 처프의 양을 쉽게 조절할 수 있는 장점이 있다.

본 연구는 네온으로부터 생성한 고차조화파를 아르곤을 이용하여 아토초 처프를 보상하였다. 그림 1에 나타난 바와 같이 중심 파장 815 nm에 펄스폭이 32 fs인 티타늄사파이어 레이저를 20 Torr 압력으로 채워진 3 mm 길이의 네온 가스셀에 집속하여 25차에서 73차까지 고차조화파를 생성한 후 25 Torr 압력으로 채운 9 mm 길이의 아르곤 가스셀을 통해 펄스를 압축하였다. 고차조화파는 시간지연을 준 적외선 펄스와 중첩하여 time-of-flight 분광기로 광전자 스펙트럼을 얻은 후, RABITT 방법을 통해 시간영역에서 아토초 펄스를 복원하여 펄스폭을 측정하였다⁽⁴⁾. 아르곤이 없을 경우 네온으로부터 생성한 고차조화파는 240 아토초 펄스폭을 갖고 있으나, 이를 아토초 처프를 아르곤으로 보상하여 변환한계값인 47 아토초에 가까운 60 아토초의 펄스를 생성하였다. 그림 2에 네온으로부터 생성한 고차조화파를 아르곤을 통해 처프를 보상하여 얻은 60 아토초 펄스의 측정 결과를 보여주며, 이 펄스폭 60 아토초 안에는 1.5 사이클 수준의 광펄스가 존재한다. 아르곤의 압력을 더욱 최적화하여 50 아토초 수준의 펄스를 생성하는 연구를 진행 중이며, 현재의 결과를 더욱 발전시켜 앞으로 100 아토초 미만의 단일 아토초 펄스를 생성하고 이를 응용하기 위한 연구도 진행되고 있다.

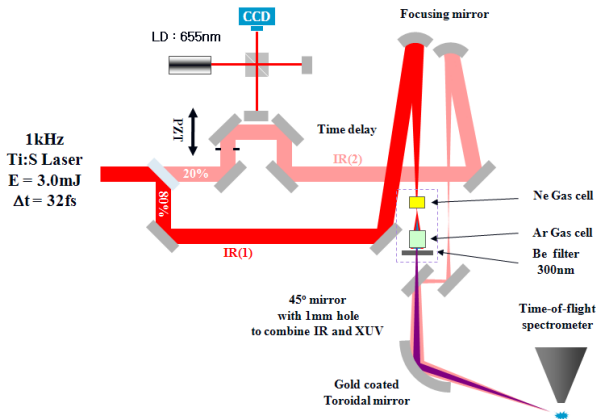


Fig. 1. Experimental setup with a time-of-flight spectrometer.

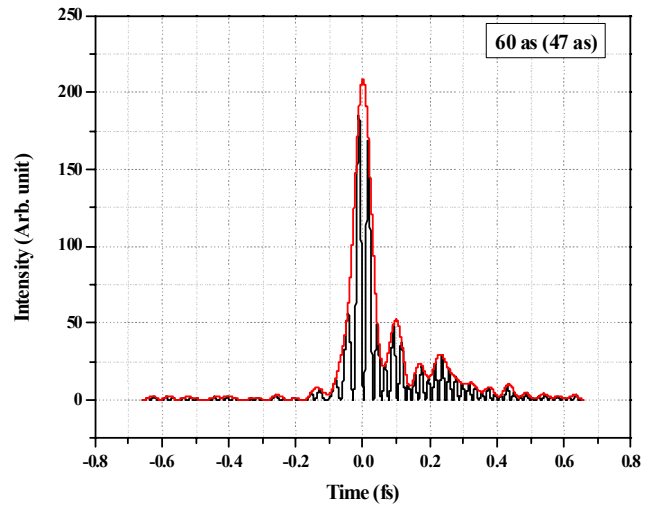


Fig. 2. Temporal profile of an attosecond pulse train reconstructed using the RABITT method.

참고문헌

1. P. B. Corkum, Phys. Rev. Lett. **71**, 1994 (1993).
2. K. T. Kim *et al.*, Phys. Rev. A **69**, 051805 (2004).
3. K. T. Kim *et al.*, Phys. Rev. Lett. **99**, 223904 (2007).
4. Y. Mairesse *et al.*, Science **302**, 1540 (2003).