

## 고차조화파를 이용한 아토초펄스의 생성과 측정

### Generation and characterization of attosecond pulses obtained from high-order harmonics

김경택, 강경식, 고동혁, Tayyb Imran, G. Umesh\*, 남창희

한국과학기술원 물리학과 결맞는 엑스선 연구단

\*Physics Department, National Institute of Technology Karnataka, India

kyungtaec@kaist.ac.kr

강력한 레이저장( $10^{13} \sim 10^{15} \text{ W/cm}^2$ )이 원자 혹은 분자에 조사될 때 고차조화파가 생성된다. 생성된 고차조화파로부터 펄스폭이 1 fs 미만인 아토초( $1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$ ) 영역의 극자외선 혹은 연엑스선 펄스의 생성이 가능하다. 아토초펄스는 그 짧은 펄스폭 때문에 앞으로의 초고속 분광학에 응용에 매우 유용하게 쓰일 수 있다. 한편, 아토초 펄스열 자체가 초강력 레이저와 원자 혹은 분자와의 상호작용에 대한 결과물로서, 초강력 레이저장 내에서 원자 혹은 분자의 상태에 대한 정보를 가지고 있다. 따라서 아토초펄스의 정확한 진단은 앞으로의 응용뿐만 아니라 그 자체로서도 중요한 의미를 가진다고 할 수 있다.

이 연구에서는 극히 짧은 아토초펄스를 만들기 위한 방법과 아토초펄스의 진단 방법에 대한 토의를 할 것이다. 짧은 펄스폭을 가지는 아토초펄스를 만들기 위해서는 아토초펄스가 가지는 고유의 처프를 제거 할 필요가 있다. 이것은 음의 군분산을 가지는 물질을 통과시킴으로서 가능하다. 본 연구단에서는 음의 군분산 물질을 가지는 물질로서 엑스선 필터가 사용될 수 있음을 제안한 바 있으며<sup>(1)</sup>, 실험적으로도 관측되었다<sup>(2)</sup>. 한편 고차조화파가 생성되는 물질이 음의 군분산을 가지는 경우에는 아토초펄스의 생성과 압축이 하나의 매질에서 이루어질 수 있음을 보일 것이다.<sup>(3)</sup>

아토초펄스에 대한 실험적 측정에 대한 많은 연구가 이루어 졌다. 그러나 극자외선 혹은 연엑스선 영역에서는 거의 모든 물질이 빛을 흡수하여 기존의 레이저 진단 방법을 그대로 연장시키기에는 무리가 있다. 이에 따라, 아토초펄스와 레이저 장에 의해 이온화 되는 광전자를 이용하는 방법으로 아토초 펄스열을 측정하는 방법들이 제시되고 있다. 이러한 방법을 이용해 주파수 위상을 측정하는 RABITT (Reconstruction of attosecond beating of two photon transition) 방법이 있다. 한단계 진보된 방법으로 광주파수 분해 방법을 사용하는 방법도 제시 되었다. 이 방법에서는 아토초펄스와 레이저의 시간 지연에 따른 2차원 광전자 스펙트럼을 얻은 후, 두 개의 펄스를 역변환 알고리즘에 의해 찾는 방법으로, FROG CRAB (Frequency-resolved Optical Gating for the complete reconstruction of attosecond bursts) 이라 불리운다.

아토초펄스의 자기압축 실험을 위해 그림 1과 같이 1 kHz로 동작하는 30 fs, 815 nm, 3mJ의 티타늄 사파이어 레이저를 사용하였다. 레이저빔은 두 개로 나뉘어 한쪽에서는 아토초펄스를 생성하며, 다른 한쪽의 레이저는 RABITT 실험을 위한 프로브빔으로 사용된다. 두 빔은 토로이달 미러를 이용해 시간비행분광기로 집속되며, 두 빔간의 시간지연을 조절하며 광전자 스펙트럼을 측정한다. 측정된 광전자 스펙트럼에는 고차조화파에 의한 광전자 피크의 사이에 사이드 밴드라 불리는 이광자 흡수 피크가 형성된다. 사이드밴드의 진폭의 변화로부터 고차조화파의 주파수 위상을 알 수 있으므로, 아토초펄스의 재구성이 가능하다.

실험은 12mm의 아르곤 가스셀로부터 생성되는 고차조화파를 압력의 변화에 따라 측정하였으며 재구성된 아토초펄스의 모양은 그림 2에 표시하였다. 압력의 증가에 따라서 아토초펄스가 가지는 처프가 점점 상쇄되어 40 torr가 되었을 때는 이차 주파수 위상 (second order spectral phase) 이 완전히 상쇄되어 가장 짧은 펄스폭을 얻을 수 있었다. 변환한계(transform-limited)인 200 아토초와 거의 가까운 206 아토초펄스가 측정되었다.

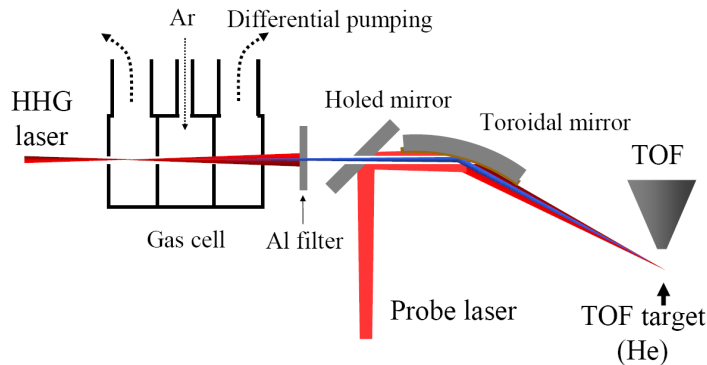


그림 1. RABITT 측정을 위한 실험 장치의 개략도

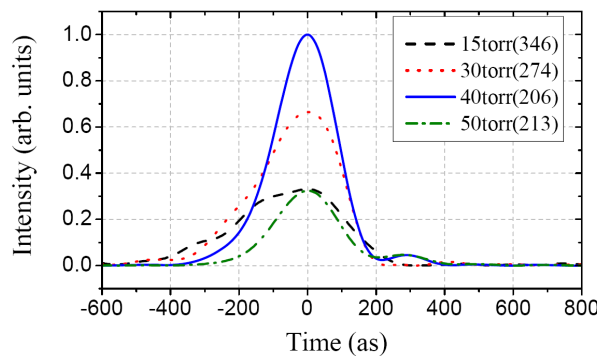


그림 2. RABITT 실험으로 측정된 아토초펄스 모양. 가스셀 압력은 범례에 표시되었으며, 측정된 펄스폭은 괄호 안에 표시하였다.

1. K. T. Kim, C. M. Kim, M. G. Baik, G. Umesh, and C. H. Nam, "Single sub-50-attosecond pulse generation from chirp-compensated harmonic radiation using material dispersion", *Phys. Rev. A* **69**, 051805(R) (2004).
2. R. L. Martens, K. Varju, P. Johnsson, J. Mauritsson, Y. Mairesse, P. Salieres, M. B. Gaarde, K. J. Schafer, A. Persson, S. Svanberg, C. G. Wahlstrom, and A. L'Huillier, "Amplitude and Phase Control of Attosecond Light Pulses," *Phys. Rev. Lett* **94**, 033001 (2005).
3. K. Taec Kim, K. S. Kang, M. N. Park, T. Imran, G. Umesh, and C. H. Nam, "Self-Compression of Attosecond High-order Harmonic Pulses," submitted (2006).