

이색 펨토초 레이저장을 이용한 강한 아토초 고차조화파 발생

Strong Attosecond High-order Harmonic Generation Using Two-color Femtosecond Laser Field

김철민*, 김이중, 남창희
 한국과학기술원 물리학과 결맞는 엑스선 연구단
 *qed00@hanmail.net

원자나 분자 내에서 일어나는 빠른 동역학적 과정들을 살펴보기 위해서는 그 과정보다 짧은 펄스폭을 갖는 펄스가 필요하다. 강한 펨토초 레이저 펄스와 원자와의 상호작용으로부터 발생하는 고차조화파는 펨토초보다 짧은 펄스폭 (~수백 아토초)을 갖는 펄스열로 이루어져 있으므로, 이러한 초고속 과정을 살펴보기 위한 도구로 큰 관심의 대상이 되고 있다.⁽¹⁾ 보통 고차조화파는 선형편광된 단색 레이저장을 이용하여 발생시키지만, 본 연구에서는 선형편광된 기본파와 그것의 이차조화파로 이루어진 이색 레이저장 (two-color laser field)을 이용하여 고차조화파를 발생시키는 문제를 다뤘다. 이색파에 의해 발생하는 고차조화파의 특징을 살펴본 후, 두 주파수 성분의 조절을 통해, 선형편광된 단색광을 사용할 때보다 강하고 규칙적인 아토초 펄스열을 발생시킬 수 있음을 보였다.

이색파를 사용하는 경우, 선형 편광된 기본파만 사용하여 고차조화파를 발생시키는 경우와는 달리, 이온화된 전자가 2차원 평면에서 움직이게 되고, 원자를 구동하는 레이저장은 각 주파수 성분의 편광 방향 사이의 각도, 상대 위상, 그리고 상대적인 세기와 같은 새로운 자유도를 갖게 된다. 양자 역학적인 전산 시뮬을 통해 이들 자유도가 바뀔 때 따라 고차조화파가 어떻게 변하는지 알아보았고, 고차조화파의 준고전적 모형에서 얻어지는 전자 궤도를 이용하여 변화 양상을 설명하였다. 또한 원자와 이색파가 가진 대칭성을 분석하여 편광 방향에 따라 차수가 달라질 수 있다는 것과 상대 위상이 π 만큼 바뀔 때마다 고차조화파의 발생양상이 반복된다는 것을 밝혔다.

이러한 분석의 응용으로서, 이색파를 사용하면서 얻게 된 새로운 자유도들을 활용하여 보다 나은 성질을 가진 아토초 펄스를 발생시키는 문제를 탐구하였다. 두 주파수 성분에 적절한 상대 위상을 주면, 같은 세기의 기본파만 사용한 경우보다 짧은 궤도를 더 세게 발생시킬 수 있고, 이는 강하고 규칙적인 아토초 펄스열을 만들어 낸다 (그림 1).⁽²⁾ 게다가 이차조화파의 편광 방향을 조절하면, 같은 세기의 기본파를 사용한 경우보다 이온화를 줄일 수 있는데, 이는 원자 집단에서 발생하는 고차조화파의 위상 정합을 개선할 수 있으므로 실제 실험에서 발생 효율을 획기적으로 향상시킬 수 있다 (그림 2).⁽³⁾

이렇게 얻어진 강한 아토초 펄스는 원자나 분자에서 일어나는 초고속 과정을 탐구하는 데에 유용하게 쓰일 수 있다.

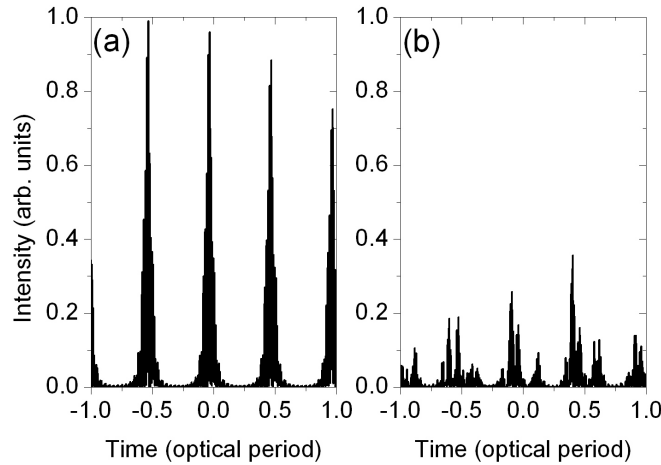


그림 1. 이색파와 단색파를 사용한 경우에 계산을 통해 얻어진 아토초 펄스열. 30차부터 60차까지의 스펙트럼만 이용. (a) 이색파를 사용한 경우 ($I_{\omega} = 6 \times 10^{14} W/cm^2$, $I_{2\omega} = 3 \times 10^{14} W/cm^2$, $\varphi = \frac{\pi}{2}$) 와 (b) 단색파를 사용한 경우 ($I_{\omega} = 9 \times 10^{14} W/cm^2$).

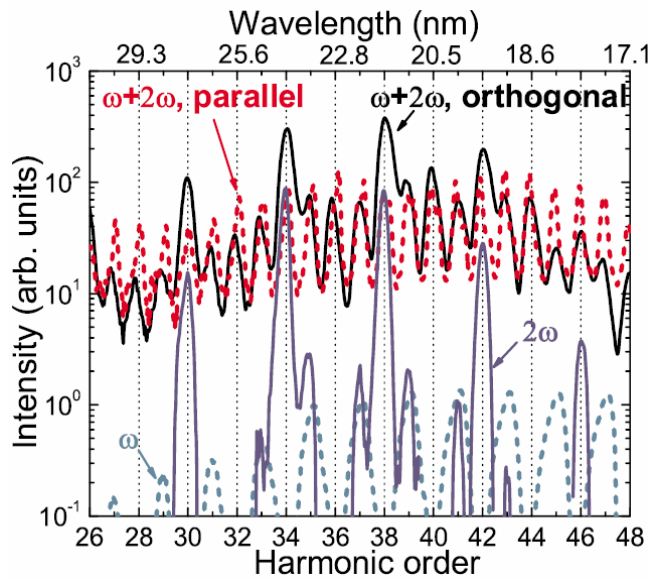


그림 2. He를 이용한 실험에서 얻어진 고차조화파의 스펙트럼.

1. F. Krausz, "Tracking Light Oscillations: Attosecond Spectroscopy Comes of Age," *Opt. Photonics News* **13**, 62 (2002).
2. C. M. Kim, I J. Kim, and C. H. Nam, "Generation of a strong attosecond pulse train with an orthogonally polarized two-color laser field," *Phys. Rev. A* **72**, 033817 (2005).
3. I J. Kim, C. M. Kim, H. T. Kim, G. H. Lee, Y. S. Lee, J. Y. Park, D. J. Cho, and C. H. Nam, "Highly Efficient High-Harmonic Generation in an Orthogonally Polarized Two-Color Laser Field," *Phys. Rev. Lett.* **94**, 243901 (2005).