

이색 펨토초 레이저 펄스를 이용한 고차조화파 발생효율 향상에 관한 연구

Strong enhancement of high-order harmonic generation from atoms in two-color femtosecond laser field

김이종⁽¹⁾, 김철민⁽¹⁾, 김형택⁽²⁾, 이계황⁽¹⁾, 이용수⁽¹⁾, 박주윤⁽¹⁾, 남창희⁽¹⁾

KAIST 물리학과/결맞는 X선 연구단⁽¹⁾

GIST/고등광기술연구소 펨토과학 연구실⁽²⁾

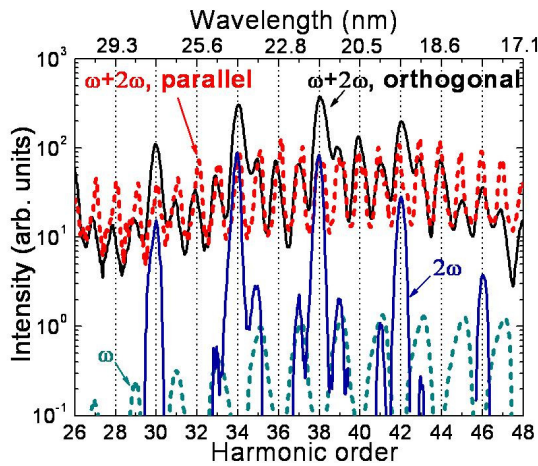
본 연구에서는 펨토초 레이저 펄스와 그것의 이차조화파를 합한 합성 레이저 장인 이색 펄스(two-color)를 이용, 편광과 상대위상을 변화시켜 원자에 가해지는 입사 레이저 장 자체의 구조를 다양하게 바꿈으로써 이에 따른 전자궤도의 임의적인 조절을 통해 이전까지의 단색펄스(one-color)에서 보여주지 못한 다양하고 재미있는 특성들을 보여주고 있다. 특히 레이저장의 반전 대칭성(inversion symmetry)이 깨짐으로 인해 기존의 홀수차 조화파(odd-order harmonics)에 짝수차 조화파(even-order harmonics)의 발생이 이루어져 모든 차수에서 고차조화파가 발생할 수 있음을 확인할 수 있었다. 이 때 입사한 이색 펄스간의 편광은 서로 수직을 이루고 있어 발생된 고차조화파 역시 짝수와 홀수차 간의 편광 방향은 서로 수직이 된다. 실제로 이색 펄스간의 편광과 상대위상을 조절하기 위해 반파장판(half wave plate)과 얇은 유리판(glass plate)을 이용, 편광이 서로 수직인 경우와 평행인 두 경우에서 발생된 고차조화파와 상대위상의 조절에 따른 이의 변화 양상을 확인하였다. 그 결과 단색펄스에 비해 17~30 nm 영역에서 100배 이상의 효율 향상을 이루었다 [그림1]. 특히 두 펄스간의 편광 방향이 수직인 경우는 이웃한 차수들에 비해서 이차조화파 펄스의 홀수차에 해당하는 $2(2n+1)$ 차에서 보다 강한 세기의 고차조화파를 얻을 수 있었다. 편광방향이 평행한 경우와 이차조화파만에 의해 발생된 결과와 비교해 수직 편광된 이색 펄스에 의해 $2(2n+1)$ 차 조화파에서 가장 강한 세기의 고차조화파를 얻을 수 있었다. 특히 상대위상의 조절을 통해서 그 주기성이 π 임을 확인할 수 있었고, 2배 이상의 추가적인 효율향상에 힘입어 38차 (21.6 nm) 고차조화파의 경우, 그 변환 효율은 5×10^{-5} 에 이르렀다 [1].

이러한 급격한 효율향상의 이론적 근거는 이색 펄스 내에서 단원자 계산을 통한 전자궤도의 운동양상을 분석함으로써 이루어졌다. 편광 방향이 서로 수직인 이색 펄스 내에서 상대위상의 적절한 선택을 통해 단색 펄스의 경우처럼 원자로 재결합하는 전자궤도가 형성되도록 조절하였다. 이 때 전자궤도는 레이저의 세기변화에 둔감한 짧은 전자궤도(short trajectory)를 선택하게 되고 재결합하는 전자 파속(electron wave packet)의 퍼짐(spreading) 현상이 줄어들게 된다. 또한 상대적으로 단색 펄스에 비해 이색 펄스의 경우 이 영역에서 상대적으로 높은 이온화율로 인해서 전자의 파속은 밀해진다. 즉 높은 밀도의 전자파속을 지닌 짧은 전자궤도의 발생으로 인해 매우 강한 고차조화파의 발생 효율을 이루게 된다 [1, 2].

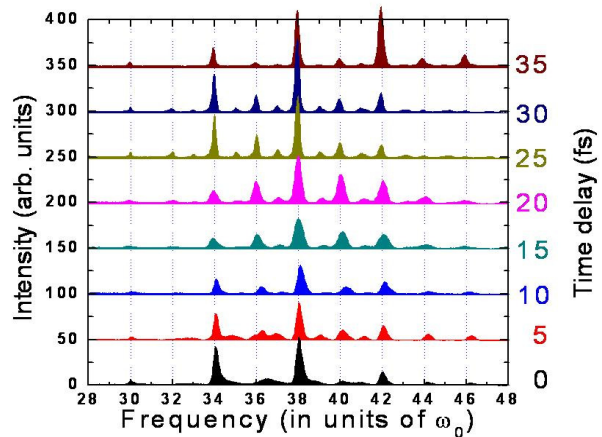
하지만 실험에 사용된 광학소자의 분산 효과로 인해서 군속도 차이에 따른 두 펄스 간의 시간 지연(time delay) 이 존재하고 있다. 이러한 이색 펄스 간의 시간적 겹침(temporal overlap)을 조절하기 위해 시간 판(time plate) 이라는 새로운 광학 소자를 도입하였다. 이 소자는 복굴절 현상을 이용한 것으로 파장이 서로 다른 두 펄스간의 시간 차이를 소자의 회전을 통해서 쉽게 조절할 수 있다. 이를 이용하여 이색 펄스 간의 시간 지연 조절을 통해서 고차조화파의 구조변화를 확인하였다. 특히 시간적 겹침

이 커질 때 이색 펄스 간의 섞임 효과(mixing effect) 만에 의해 나타나는 $2(2n)$ 차수는 $2(2n+1)$ 차 세기만큼 그 크기가 증가함을 확인할 수 있다 [그림2]. 이 경우 각 시간 지연 영역에서 상대위상의 조절을 통해서 얻은 고차조화파의 최대값을 선택하여 비교하였다. 또한 시간 지연의 정도에 관계없이 고차조화파의 세기는 상대 위상값이 π 의 주기성을 갖고 있음을 확인하였다.

최근에 이러한 이색 펄스를 이용한 고차조화파의 발생과 관련된 응용연구가 몇몇 그룹에서 시작되고 있다. 편광방향이 평행인 이색 펄스를 이용하여, 발생된 고차조화파로부터 잘림 영역(cut-off)에서의 초연속(supercontinuum) 스펙트럼 발생을 통한 하나의 아토초 발생과 관련된 실험이나 이론 [3], 그리고 보다 강한 이차조화파 펄스를 적용, 10 nm 이하에서 고차조화파의 강한 효율 향상을 이루었음이 보고되고 있다. 또한 아토초의 정밀도로 터널링된 전자의 궤적을 제어하기 위해 수직 편광된 이색 펄스를 이용하고 이를 통해 정렬된 분자(aligned molecule)에의 적용을 통한 양자간섭(quantum interference) [4] 등의 연구가 발표되었다. 이러한 이색 펄스를 이용한 고차조화파 발생은 강한 효율 향상뿐만 아니라 단색 펄스에서 나타나지 않는 재미있는 물리현상에 힘입어 아토초 물리를 포함한 초고속 원자 및 분자 분광학 등의 연구에 중요한 방법들 중의 하나가 될 것이다.



[그림1] 단색펄스(기본펄스와 이차조화파 펄스)와 이색펄스(수직 편광과 수평편광) 내에서 발생된 고차조화파의 스펙트럼의 세기 비교.



[그림2] 시간 편을 이용하여 두 펄스간의 시간 차 조절에 따른 고차조화파의 구조변화.

참고문헌

[1] I Jong Kim, Chul Min Kim, Hyung Taek Kim, Gae Hwang Lee, Yong Soo Lee, Ju Yun Park, David Jaeyun Cho and Chang Hee Nam, " Highly efficient high-harmonic generation in an orthogonally polarized two-color laser field," Phys. Rev. Lett. **94**, 243901 (2005)

[2] Chul Min Kim, I Jong Kim and Chang Hee Nam, "Generation of a strong attosecond pulse train with an orthogonally polarized two-color laser field," Phys. Rev. A **72**, 033817 (2005)

[3] T. Pfeifer, L. Gallmann, M. J. Abel, D. M. Neumark, and S. R. Leone, "Single attosecond pulse generation in the multicycle-driver regime by adding a weak second-harmonic field," Opt. Lett. **31**, 975 (2006)

[4] M. Kitzler and M. Lezius, "Spatial control of recollision wave packet with attosecond resolution," Phys. Rev. Lett, **95**, 253001 (2005)