

이색 레이저장 내에서 긴 가스젯을 이용한 고차 조화파의 흡수 한계 발생

Absorption limited generation of high-order harmonics using a long gas jet in a two-color laser field

김이종^{1,2}, 김철민¹, 이계황², 박승범², 이용수², 김태근², 남창희², Tomas Mocek³, 이종민¹

고등광기술연구소 펨토과학 연구실¹, 한국과학기술원 물리학과², Institute of Physics, Czech Republic³

ijkim@gist.ac.kr

고차조화파는 강한 펨토초 레이저와 원자 간의 상호작용에 의해 발생하는 매우 고차의 비선형 광학 현상으로, 연엑스선 영역에서의 우수한 공간적인 결맞음성과 아토초 시간 영역에 이르는 펄스폭을 가지고 있다. 고차조화파의 이같은 예외적인 특성들은 연 엑스선 영역에서의 비선형 광학, 엑스선 간섭계와 홀로그램, 고차조화파 주입 엑스선 레이저 혹은 자유 전자 레이저 등 새로운 영역으로 확대되고 있다. 하지만 이같은 실제적인 응용을 위해서는 고차조화파의 강하고 효율적인 발생이 필수적으로 요구된다. 고차조화파의 강한 발생을 위해 많은 방법들이 제시되었다. 그 중에서 긴 집속 거울 내에 긴 가스 셀을 두거나 guided 진행 모드 내에 긴 가스 젯을 위치킴으로써, 고차조화파 발생 부피를 극대화 시킬 수 있고 흡수 한계 영역에 도달할 수 있었다. 또한 이색 펄스를 이용하여 고차조화파 발생 효율을 극대화 시킬 수 있었다. 단색 펄스와 비교해 이색 펄스의 경우는 많은 조절 변수를 포함하기 때문에 매우 강한 고차조화파 발생을 위해 이같은 변수들의 최적화 과정이 필수적이다.

최근에 우리는 이색 펄스 내에서 긴 가스 매질을 사용하여 20 nm 근처에서 이전의 결과를 뛰어넘는 고차조화파의 극적인 효율 향상을 이루었다. 이제까지 μJ 수준의 에너지와 10^{-4} 수준의 변환효율을 가진 강한 고차조화파는 50 nm 근처 혹은 이보다 긴 파장 영역에서 이루어졌다. 특히 고차조화파 차수가 높아짐에 따라 변환 효율은 급격히 낮아져 30 nm 에서 2×10^{-5} , 13.5 nm 에서 5×10^{-7} 이 되었다. 이색 펄스를 이용한 이전의 우리 결과는 가스 매질의 길이가 짧은 원형 가스 젯을 사용했을 때 이미 이같은 경향성을 뛰어넘었다⁽¹⁾. 최근 연구에서는 긴 가스매질을 사용하고 이차조화파의 세기를 증가시킴으로써 고차조화파의 변환효율을 이전보다 더욱 끌어올릴 수 있었다⁽²⁾. 그 결과 21 nm 영역에서 2×10^{-4} 을 넘어서는 고차조화파의 변환효율은 50 nm 이하의 파장 영역에서 보고된 실험 결과들 중 가장 높은 수준이다.

이색 펄스를 이용한 고차조화파 발생은 가스 타겟과 레이저의 여러 파라미터들, 이를테면 타겟 길이와 위치 그리고 밀도 뿐만 아니라 레이저 세기, 상대위상, 그리고 편광 등에 의존한다. 그 중에서 합성 레이저 장의 형태를 결정짓는 중요한 파라미터는 상대위상이다. 상대위상은 전자궤도와 이로부터 발생하는 고차조화파의 세기에 중요한 영향을 미치게 된다. 이를 위해 이색 펄스가 발생하는 BBO 결정 뒤에 얇은 유리판을 두어 회전시켰을 때 파장에 따른 분산효과의 차이에 의해 상대위상을 조절하게 되고 그 결과 고차조화파의 세기는 Pi 주기성을 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 이색 펄스로부터 발생하는 고차조화파 역시 단색 펄스의 경우처럼 이온

화에 의한 플라즈마 해짐을 레이저 집속에 의한 보상을 위한 가스 타겟의 위치에 매우 민감하였다. 그 결과 가스 켓의 위치를 레이저 집속 지점에서 10 mm 앞에 위치시켰을 때 최적화되었다. 그리고 가스 타겟의 길이 변화를 통한 guided propagation 효과에 의해 위상 정합된 고차조화파 발생 영역의 크기를 증가시킬 수 있었다. 가스 타겟의 길이를 늘림에 따라 고차조화파의 세기 역시 커지는데, 가스 매질에 의한 고차조화파의 재흡수 정도와 동일해질 때 까지 증가하게 된다. 그 결과 6 mm 가스켓에서 최대의 에너지를 얻을 수 있었고 최적화된 고차조화파 스펙트럼은 그림1 과 같다. 특히 38차 고차조화파의 경우 펄스당 0.6 μ J의 절대 광량과 2×10^{-4} 의 변환효율에 도달하였다. 실험에 사용된 He 100 torr의 경우에 38차 (21.6 nm) 에서 얻어지는 흡수 길이는 2 mm로, 최적화된 가스 매질의 길이는 흡수 길이의 3 배 이상이라는 E. Constant⁽³⁾의 계산 결과와 일치하고 있다. 결국 이색 레이저 장 내에서 긴 가스 켓을 이용한 고차조화파의 발생은 흡수한계 영역에서 이루어졌음을 확인할 수 있었다.

또한 38차 (21.6 nm) 고차조화파를 엑스선 거울로 집속하여 PMMA (polymethyl methacrylate)에 입사시켜 표면 변화와 용발(ablation)에 관한 흥미로운 실험 결과를 얻을 수 있었다 (그림2). 앞으로 발생된 강한 고차조화파의 집속을 통해 물질의 용발을 나노미터 수준의 크기로 제어할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 파장가변성을 지닌 이같은 고차조화파를 이용하여 엑스선 광학부품의 반사율을 정확히 측정할 것이다.

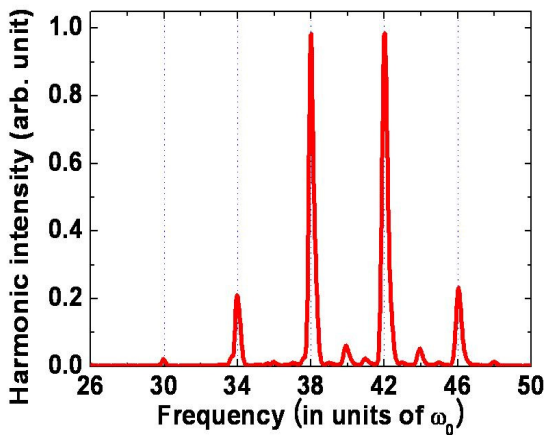


그림 1. 6 mm 길이의 가스켓으로 얻어진 최적화된 고차조화파 스펙트럼

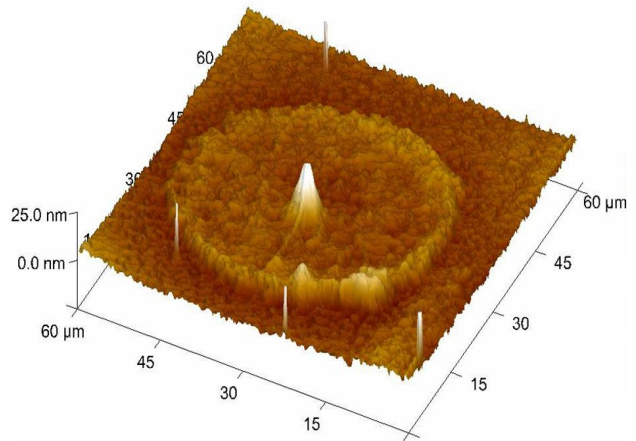


그림 2. Surface modification of PMMA driven by focused 38th high-harmonics

참고문헌

1. I J. Kim *et al.*, "Highly efficient high-harmonic generation in an orthogonally polarized two-color laser field," *Phys. Rev. Lett.* **94**, 243901 (2005)
2. I J. Kim *et al.*, "Generation of sub- μ J high-harmonics using a long gas jet in a two-color laser field," accepted to *Appl. Phys. Lett.*
3. E. Constant *et al.*, "Optimizing high harmonic generation in absorbing gases: model and experiment," *Phys. Rev. Lett.* **82**, 1668 (1999)