

고차조화파 발생의 시공간상 최적화

Optimization of high-order harmonic generation in the space and time domains

김형택, 김이중, V. Tosa, 이계황, 이용수, 남창희
한국과학기술원 물리학과
htkim@mail.kaist.ac.kr

강한 세기의 레이저가 원자에 입사하여, 조사된 레이저 파장의 홀수 배에 해당하는 파장을 가진 빛이 여러 차수에 걸쳐 발생하는 것을 고차조화파(high-order harmonics)라고 한다. 고차조화파를 이용하면 고가의 방사광 가속기로 발생시키는 연엑스선 영역의 빛을 작은 비용과 작은 규모의 장비로 발생시킬 수 있으며, 더욱이 짧은 시간 폭과 우수한 결맞음성을 가지고 있어 많은 주목을 받고 있다. 고차조화파를 실제적인 응용분야에 폭넓게 사용하기 위해서는 고휘도의 고차조화파 발생이 필수적이라고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 고차조화파를 시공간상에서 최적화하는 방안에 대하여 연구하였다.

고차조화파는 발생 과정에서 매질의 이온화를 동반하므로 이온화에 의한 입사 레이저의 왜곡은 고차조화파 발생에 지대한 영향을 미친다. 고차조화파 발생을 최적화하기 위해서는 이온화되는 매질을 통과하는 레이저의 특성을 고차조화파 발생에 적합하도록 조절해야 한다. 이온화되는 매질을 진행하는 레이저 펄스는 자체위상변조(self-phase modulation)에 의해 시간적인 변화를 겪는다⁽¹⁾. 레이저의 세기가 광이온화 포화세기(optical-filed-ionization (OFI) saturation intensity)보다 클 경우 고차조화파가 주로 발생하는 펄스의 앞 단은 자체위상변조에 의해 양의 처프(chirp)를 가지게 된다. 이 자체위상변조에 의한 양의 처프가 고차조화파의 동적 음의 처프(dynamically induced negative chirp)를 넘어서게 되면 고차조화파의 분광구조는 자체위상변조에 의해 왜곡된다. 본 연구에서는 여러 가지 레이저 세기에 알맞은 레이저 처프 조건을 찾아 선폭이 좁고 강한 분광선을 가지는 고차조화파 발생에 성공하였다. 또한 네온과 헬륨의 기체매질을 사용하여 기체매질 변화에 따른 고차조화파 처프구조의 변화를 연구하였으며 이를 통해 자체위상변조에 기체매질의 이온화 포텐셜이 미치는 영향이 분석하였다⁽²⁾. 또한 레이저 처프 조절 기술을 고차조화파 파장의 연속가변에 응용하여, 고차조화파의 파장을 분광구조의 왜곡이 없이 연속적으로 가변하는 데에 성공하였다⁽³⁾. 매질의 이온화가 레이저 펄스 진행에 미치는 시간적 효과를 분석하기 위하여, TADPOLE (temporal analysis by dispersing a pair of light electric-field) 방법을 이용하여 이온화되는 매질을 지나는 레이저 펄스의 시간적 특성 변화를 조사하였다. 이 조사를 통해 레이저의 세기가 광이온화 포화세기와 비슷할 때 자체위상변조가 레이저 펄스의 시간적 특성에 큰 영향을 미치는 것이 실험적으로 관측되었다.

기체 매질의 이온화는 레이저 펄스를 공간적으로 왜곡하여 플라즈마 헤짐(plasma defocusing) 현상을 일으킨다. 고차조화파 발생에 미치는 플라즈마 헤짐의 영향을 제거하기 위해서 레이저의 자체인도(self-guiding) 현상을 이용하였다. 본 실험에서는 강한 고차조화파 발생을 위하여 긴 가스매질을 사용하였다. 이와 같이 긴 가스매질을 사용하는 경우, 플라즈마 헤짐 현상도 강하게 일어나므로 자체인도 현상을 반드시 이용해야 한다. 자체인도

현상은 레이저 초점에 대한 가스매질의 위치를 조절하여 일으킬 수 있고, 이런 자체유도는 레이저 분포의 평탄화(profile flattening)와 같이 일어난다. 이에 가스매질 직후의 근접 영상을 촬영을 통하여 자체유도가 일어나는 조건에서 레이저 세기가 평탄화되는 것을 실험적으로 관측하였다⁽⁴⁾. 이렇게 자체인도된 레이저 펄스를 사용하면 강하고 발산(divergence)이 작은 고차조화파를 발생시킬 수 있다. 본 실험에서는 레이저의 자체인도 조건을 유지한 채 레이저 처프를 조절하는 데 성공하여 강하고 발산이 작으며 선폭이 좁은 고차조화파를 발생시켰다. 최적 조건에서 네온으로부터 발생한 61차 고차조화파는 $1 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2/\text{srad}$ 의 휘도를 가졌으며, 0.5 mrad의 작은 발산각과 0.07 nm의 좁은 선폭을 가지고 있었다. 이는 기체매질의 이온화가 레이저 펄스 특성에 미치는 영향을 시공간상에서 조절하여 고차조화파의 발생을 시공간상에서 최적화한 결과라고 할 수 있다.

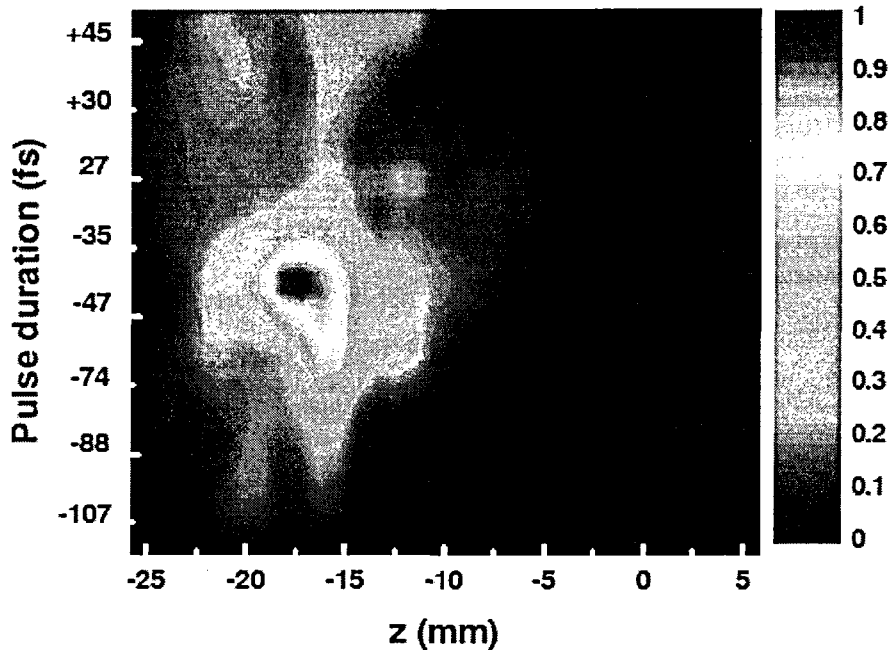


그림 1 기체매질의 위치와 레이저 처프에 따른 고차조화파 휘도의 변화

참고 문헌

1. J.-H. Kim and C. H. Nam, Phys. Rev. A. 65, 033801 (2002).
2. H. T. Kim, et al., J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 37, 1141 (2004); D. G. Lee et al., Phys. Rev. Lett. 87, 243902(2001).
3. H. T. Kim, et al., Phys. Rev. A 67, R051801 (2003).
4. H. T. Kim, et al., Phys. Rev. A 69, R031805 (2004); H. T. Kim, et al., Appl. Phys. B-Lasers Opt. 78, 863 (2004).

T
E