

긴 가스 매질을 이용한 13 nm 파장의 고회도 고차조화파 발생

Generation of Bright High-order Harmonic at 13 nm using a Long Gas Medium

김형택, 김이중, 홍경한, 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.^(1,2) 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 고회도의 고차조화파 발생이 필수적이라고 할 수 있다. 또한 13 nm 파장 영역은 Mo:Si 거울의 고 반사율을 사용할 수 있기 때문에 극자외선 영역의 결맞은 광원으로 매우 유용하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 긴 네온 기체 매질을 이용하여 13 nm 파장영역에서 고차조화파 발생 효율을 증대시키고 발산각을 감소시켜 고회도의 고차조화파 발생을 실현하였다.

초강력 극초단 레이저 펄스가 이온화되는 긴 매질을 지나는 경우, 이온화에 의한 자체 발산(self-defocusing) 현상이 일어나 고차조화파의 발생을 저해한다⁽³⁾. 그러나 기체 매질을 초점 전 ($z < 0$)에 놓게 되면 레이저 빔의 집속과 이온화에 의한 자체 발산이 균형을 이루어 자체 유도(self guiding)⁽⁴⁾가 일어난다. 자체 유도가 일어나는 경우, 레이저 빔은 긴 기체 매질 전체에서 고차조화파를 발생시키며 발생면적도 증가하는 효과를 가져와 고회도 고차조화파의 발생하게 한다.

실험에는 중심파장이 827 nm 이고, 음의 처프를 가지며 펄스폭이 42 fs 인 Ti:Sapphire 레이저를 사용하였으며, 레이저 펄스당 에너지는 5 mJ 이었다. 레이저 빔은 1.2 m 오목 거울($f/170$)에 의해 기체 매질에 집속 되었고 기체 매질은 9 mm 길이의 노즐에서 뿜어져 나오는 침두 밀도 40 Torr의 네온 매질을 사용하였다.

그림 1에서 보는 것과 같이 매질이 초점 전 20 mm($z = -20$ mm)에 있는 경우 자체 유도가 일어나 전체 매질에 균일한 플라즈마 형광이 형성되는 것을 알 수 있다. 반면 매질이 초점에 있는 경우는 매질의 시작 부분에 밝은 형광을 형성하다가 약 2 mm 진행 후 이온화에 의한 자체 발산으로 급격히 형광이 약해지는 것을 확인 할 수 있다. 이는 그림 2에서 보듯이 기체 매질을 통과한 레이저 빔의 단면으로도 확인 할 수 있다. 자체 유도가 일어나는 경우는 기체 매질을 지난 후에도 레이저의 세기가 유지되고 중심 부분이 평평해 졌음을 알 수 있다. 그러나 매질이 초점에 있는 경우는 레이저 빔이 약해지고 퍼져 있음을 알 수 있다.

이와 같은 매질 위치에 따른 매질 속에서의 레이저 진행의 변화는 그림 3에서와 같이 고차조화파의 회도 변화로 나타났다. 자체유도가 일어나서 고차조화파가 최고 회도를 나타내는 조건에서 61차 고차조화파의 발생 효율은 10^{-7} 이고 발산각은 0.6 mrad이었다. 61차 조화파의 시간 폭을 10 fs, 발생 단면 반지름을 60 μm 로 계산하였을 경우, 회도는 10^{15} W/cm²srad에 가까울 정도로 높았다. 61차 조화파는 파장이

13.5 nm로 Mo:Si 극자외선 거울의 최대 반사율을 보이는 파장과 동일하다.

이 결과는 긴 매질 속을 진행하는 레이저 빔의 특성을 보여 줄 뿐만 아니라, 이를 이용하여 고휘도 고차-조화파를 발생시킬 수 있음을 보여준다. 긴 네온 매질과 자체 유도현상을 통한 고휘도 61차 조화파는 앞으로 극자외선 리소그래피용 광학소자인 Mo:Si 거울의 표면 검사 등에 쓰일 수 있을 것으로 예상된다.

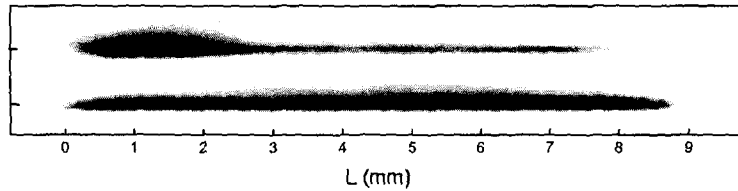


그림 1 긴 매질 속을 진행하는 레이저 빔에 의한 플라즈마 이미지

- (ㄱ) 매질 중심이 빔 초점에 있는 경우
- (ㄴ) 매질 중심이 초점 전 20 mm에 있는 경우

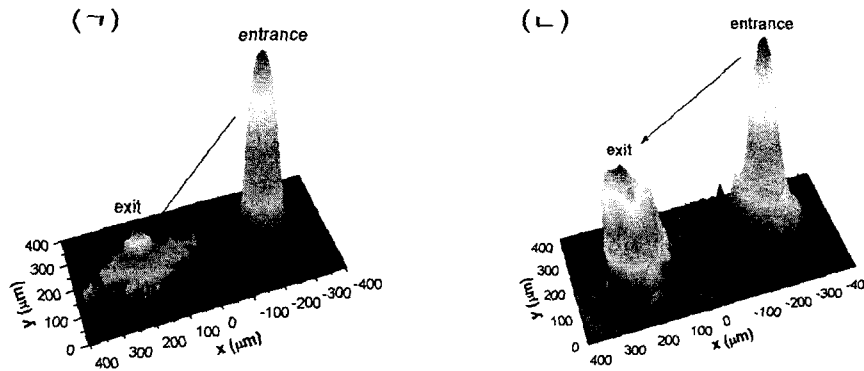


그림 2 매질을 지난 후에 레이저의 빔 단면

- (ㄱ) 매질 중심이 빔 초점에 있는 경우
- (ㄴ) 매질 중심이 초점 전 20 mm에 있는 경우

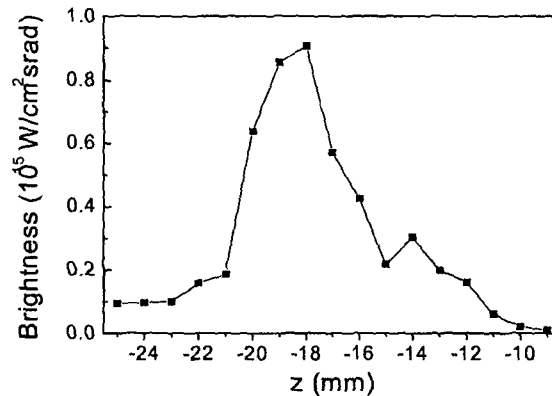


그림 3 매질 위치에 따른 61차 조화파 휘도의 변화

참고 문헌

1. P. B. Corkum, Phys. Rev. Lett. 71 1994 (1993).
2. M. Lewenstein et al., Phys. Rev. A 49, 2117 (1994).
3. M. Bellini et al., Phys Rev A 64, 023411(2001).
4. D. G. Lee et al., Appl. Phys. Lett. 81 3726 (2002).