

슬릿형 노즐을 이용한 고차조화파의 발생 효율 향상 연구

Efficient high-order harmonic generation using a slit nozzle

김형택, 이동근, 홍경한, 강용훈, 남창희
한국과학기술원
redlock@cais.kaist.ac.kr

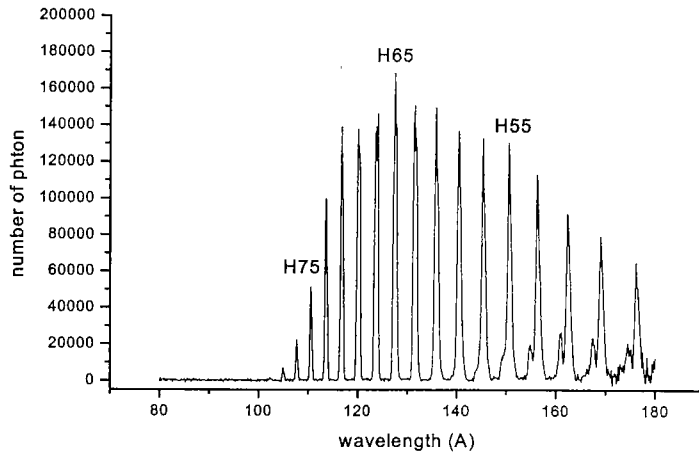
강한 세기의 레이저가 원자에 입사하여, 원래 레이저 파장의 홀수 배에 해당하는 파장을 가진 빛이 여러 차수에 걸쳐 발생하는 것을 고차조화파(high-order harmonics)라고 한다.^(1,2) 강한 레이저의 전기장에 의해 원자내의 전자가 이온화되고 가속운동을 하고 다시 원자와 결합하는 과정에 의해 고차조화파는 발생된다. 고차조화파를 이용하면 고가의 장비로 발생시킬 수밖에 없는 연엑스선 영역의 빛을 작은 비용과 작은 규모의 장비로 발생시킬 수 있으므로 많은 주목을 받고 있다. 그러나 좀 더 많은 분야에 적용되기 위해서는 고차조화파의 발생 세기가 향상되어야 한다. 본 연구에서는 슬릿형 노즐을 이용하여 13 nm 부근의 강한 고차조화파가 발생하는 조건과 특성을 연구하였다.

본 실험에는 CPA(chirped pulse amplification)방식에 자체 개발한 장파장 주입법⁽³⁾을 응용한 Ti:sapphire 레이저 펄스가 사용되었다. 레이저 펄스의 시간폭은 26 fs이고, 펄스당 에너지는 12.5 mJ이다. 레이저 빔의 집속을 위해서 $f = 1.2$ m의 구형 거울을 사용하였다. 기체 매질로는 He이 사용되었으며, 슬릿형 노즐의 폭은 0.5 mm, 길이는 6 mm이다. 고차조화파의 분광을 위해서 자체 개발한 극자외선용 분광기를 사용하였다.

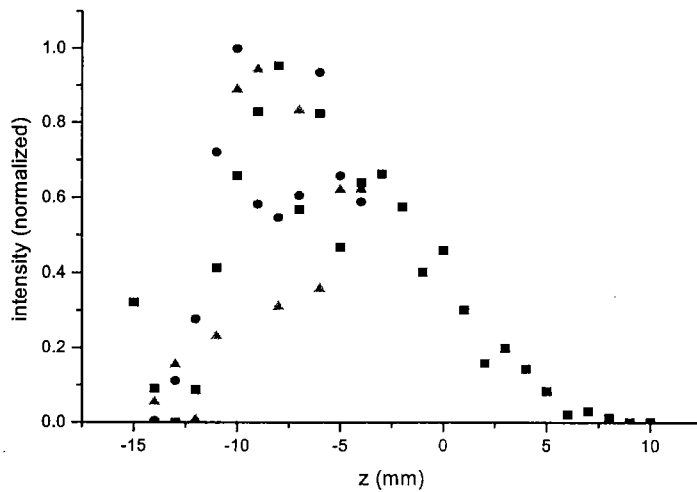
[그림 1]은 He 가스 젯에서 발생된 고차조화파의 스펙트럼이다. 이 스펙트럼은 레이저 펄스 하나에서 나온 스펙트럼으로 스펙트럼의 공간적인 분포는 적분하였다. 레이저의 펄스 당 에너지는 12.5 mJ이다. 이 때 He 기체의 최고 밀도는 $3 \times 10^{18}/cm^3$ 이고, slit nozzle의 중심은 레이저 진행 축 상에서 집속 위치 10 mm 전에 위치 ($z = -10$ mm)하고 있는 경우이다. [그림 1]에서 볼 수 있듯이 약 55차에서 71차의 고차조화파가 강하게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 가장 세게 발생된 조화파는 65차 조화파로 파장은 127.5 Å이고, 이 차수에서 발생된 총 발생 광자수는 약 10^7 개다. 이 광자수는 CCD에 관측된 신호 세기를 필터의 투과율, 분광기의 투과율⁽⁴⁾, CCD의 양자효율과 신호 증폭율을 고려하여 계산하였다.

[그림 2]는 레이저 집속 위치와 슬릿 중심 사이의 거리에 따른 65차 조화파의 세기의 변화를 나타낸 것으로 [그림 1]의 65차 조화파의 세기를 기준으로 표준화하였다. 슬릿의 중심이 레이저의 집속 위치에 있을 때보다 슬릿의 중심이 레이저 집속 위치보다 6~11 mm 앞서 위치하는 경우($z < 0$)에 65차 조화파가 강하게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 표상의 각 점은 단일 펄스마다 생성된 조화파의 세기를 나타낸다. 고차조화파가 강하게 발생하는 영역에서 발생하는 세기의 편차가 심한 것을 알 수 있다.

6 mm의 긴 매질을 사용하고, 기체매질의 위치를 레이저 집속 위치보다 앞쪽에 두었을 때 고차조화파가 강하게 발생한다는 것을 알 수 있다. 슬릿 노즐을 이용한 고차조화파의 발생은 비교적 높은 압력과 넓은 기체 면적에 많은 레이저 에너지를 주입할 수 있으므로 앞으로 이를 이용하여 고평자속(photon flux)의 고차조화파를 얻을 수 있을 것으로 기대하고 있다.



[그림 1] 긴 He 가스젯과 Ti:S 레이저와의 상호작용에 의해 생성된 고차조화파의 스펙트럼



[그림 2] 레이저 진행 축 상에서 슬릿 노즐 위치(z)에 따른 65차 조화파의 세기의 변화 (레이저 집속 위치 전[후]; $z < 0$ [$z > 0$])

참고문헌

1. P. B. Corkum, *Phy. Rev. Lett.* **71**, 1994 (1993)
2. M. Lewenstein et al., *Phys. Rev. A* **49**, 2117 (1994)
3. Y. H. Cha et al., *J. Opt. Soc. Am. B*, **16**, 1220 (1999)
4. 최일우, 박사학위논문, 한국과학기술원 (1997)