

고차조화파를 이용한 파장 가변 연엑스선 발생 연구

Tunable soft x-ray generation using high-order harmonics

김형택, 이동근, 김이종, 홍경한, 남창희
한국과학기술원
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 있으므로 많은 주목을 받고 있다. 고차조화파는 기본적으로 원자의 공간적인 대칭성과 레이저 전기장의 시간적 주기성에 의해 홀수 차수에서 발생하게 된다. 고차조화파의 실제적인 응용에 있어 기본 레이저 파장의 두 배에 해당하는 파장 간격을 파장 가변 시키는 것은 응용에 필요한 파장의 연엑스선 광원을 얻는데 중요한 과제라고 할 수 있다. 이 연구에서는 고차조화파의 청색 변이⁽³⁾와 chirp 조절⁽⁴⁾을 이용하여 좁은 선폭과 강한 세기의 파장 가변 고차조화파 발생을 실현하였다.

고차조화파의 청색 변이는 자기 위상 변조(self-phase-modulation)과 비점진적 청색변이(nonadiabatic blueshift)의 두 가지 원인을 갖는다. 레이저의 첨두 세기가 강해질수록 고차조화파의 청색 변이는 강하게 발생하므로, 레이저의 입사 강도를 조절하여 고차조화파의 파장을 가변시킬 수 있다. 그러나 고차조화파는 발생 과정에서 처프를 가지게 되므로 각 차수의 조화파는 스펙트럼 영역에서 선폭이 넓어져 강도가 약해진다. 이는 입사 레이저의 처프를 조절하여 좁은 선폭의 강한 고차조화파를 발생시킬 수 있다. 레이저의 첨두 세기가 포화 세기(saturation intensity) 이상에서는 자기 위상 변조에 의한 양의 처프가 강하므로 음의 chirp된 입사 레이저 펄스를 사용하면 고차조화파의 처프를 보상할 수 있고, 반대로 포화 세기 이하에서는 고차조화파는 음의 처프를 가지므로 양으로 처프된 레이저 펄스를 이용하여 좁고 강한 스펙트럼을 얻을 수 있다. 이 두 가지 현상을 이용하여 레이저 첨두 세기와 입사 레이저의 처프에 따라 선폭과 세기가 최적화된 파장 가변 고차조화파를 얻을 수 있다.

실험에는 중심파장 824 nm, 26 fs의 시간폭을 가지는 테라와트 Ti:Sapphire 레이저가 사용되었다. 입사 레이저 펄스의 처프의 양은 펄스 압축기의 에틀리발 쌍의 간격을 조절하여 조정하였다. 입사 레이저의 에너지는 반파장판과 편광기를 이용하여 조절하였다. 기체 매질로는 헬륨을 사용하였으며 최대 기체 밀도는 $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 였다.

[그림 1]은 레이저 에너지와 처프의 양이 바뀔 때 다른 헬륨에서 발생한 고차조화파의 파장 가변 스펙트럼이다. 79차(약 10 nm) 이상의 고차조화파가 입사 선폭의 변화가 거의 없이 기본파장의 두 배 이상이 가변 되는 것을 확인 할 수 있다. 여기에서 각 스펙트럼은 동일한 파장 간격을 가지고 가변 되도록 레이저 에너지와 처프의 양을 조정하였다. 이 결과는 레이저의 에너지와 처프를 조정하여 고차조화파 스펙트럼의 약해짐이나 넓어짐이 없이 레이저 기본 파장의 2배(홀수 차수의 스펙트럼 간격) 이상을 연속적으로 파장 가변할 수 있음을 보여 준다. 또한 네온이나 아르곤 기체매질을 이용하여 다른 파장 영역의 연엑스선 영역의 고차조화파의 파장 가변성도 조사하였다.

이 결과는 종래에 방사광 가속기를 통해 발생 시켜온 연속적인 연엑스선 스펙트럼을 고차조화파를 이용하여 얻을 수 있음을 나타낸다. 실험실 수준의 고출력 펨토초 레이저를 통해 발생하는 고차조화파는 연엑스선 영역에서 방사광 가속기에 의한 것 보다 시간폭이나 결맞음성등 많은 장점을 가지고 있으므로, 앞으로 이를 이용한 응용분야에서 폭넓게 활용될 것으로 기대된다.

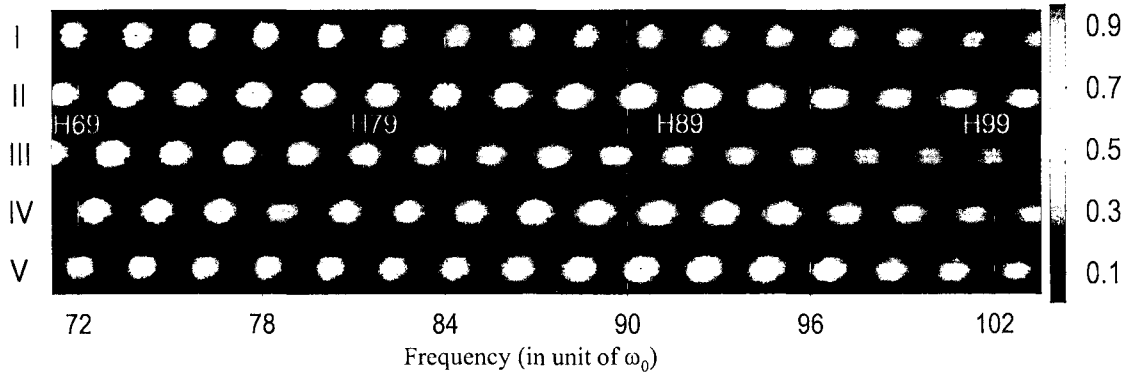


그림 1 헬륨에서 발생된 고차조화파의 파장 가변
 각 경우의 레이저의 에너지와 시간폭 (부호는 처프의 방향)

I. 11 mJ, -110 fs II. 5.9 mJ, -87 fs III. 4.1 mJ, -47 fs IV. 1.8 mJ, 26 fs V. 1.0 mJ, +44 fs

참고문헌

1. P. B. Corkum, Phy. Rev. Lett. **71**, 1994 (1993)
2. M. Lewenstein et al., Phys. Rev. A **49**, 2117 (1994)
3. H. J. Shin, et al, Phys. Rev. Lett. **83**, 2544 (1999)
4. D. G. Lee, et al, Phys. Rev. Lett. **87**, 243902(2001).