13 nm 파장의 고차조화파와 Fresnel zone plate를 이용한 연엑스선 현미경 제작

Construction of soft x-ray microscope using 13 nm high harmonic beam and Fresnel zone plate

박종주, 김득수, 박주윤, 남창희
결맞는 엑스선 연구단, 한국과학기술원 물리학과
jjpark@kaist.ac.kr

고출력 펨토초 레이저와 기체 매질의 상호작용으로 발생하는 고차조화파는 극자외선에서 연엑스선에 이르는 넓은 스펙트럼을 가지며, 레이저에 필적하는 우수한 공간적 결맞음성을 갖는다[(1)]. 또한 펄스폭이 펨토초 혹은 아토초이므로 원자, 분자의 초고속 현상을 탐구하기 알맞은 광원이다[(2)]. 나노기술이 급속히 발전함에 따라서 기존의 가시광선, 자외선을 사용한 물체의 정밀측정 한계를 벗어나고, 전자빔이나 싱크로트론에서 발생하는 경엑스선을 이용한 측정은 원자 크기 수준의 정밀성을 얻을 수 있지만 샘플에 부가적인 준비과정이 필요하거나 접근성이 용이하지 않다. 따라서 광학 테이블 크기 수준의 연엑스선 광원을 이용한 홀로그래피, 마이크로스코피가 최근 많은 관심을 얻고 있다[(3,4)].

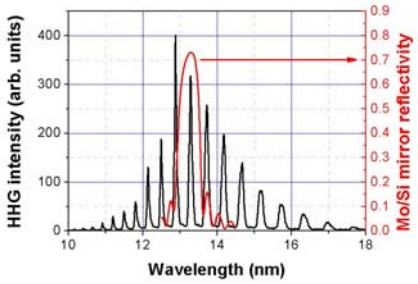

그림 1. 3 mm 가스셀에 채워진 30 Torr 네온기체와 30 fs, 1 mJ 티타늄 사파이어 레이저의 상호작용으로 발생한 고차조화파 스펙트럼 (검은 선)과 Mo/Si 다층박막 거울의 반사율 (빨간 선).

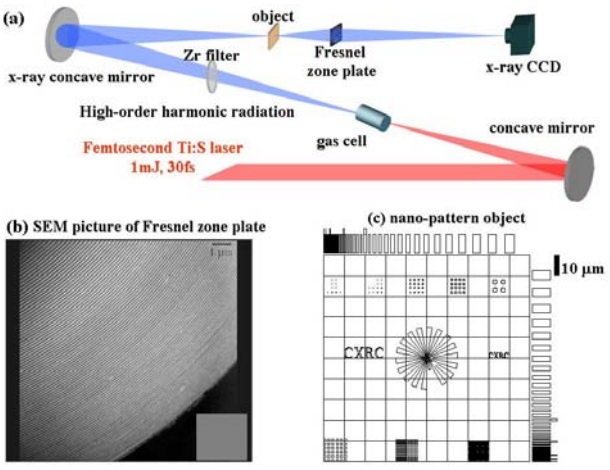

그림 2. (a) 고차조화파 연엑스선 빔과 Fresnel zone plate를 이용한 연엑스선 현미경 구성도. (b) 최소선폭 40 nm의 Fresnel zone plate SEM 사진. (c) 관측한 나노패턴 물체.

본 연구에서는 30 fs의 펄스폭과 1 mJ 에너지를 갖고 1 kHz 반복률로 작동하는 티타늄 사파이어 레이저를 네온 기체에 집속시켜 고차조화파를 발생시켰다. 네온 기체는 길이 3 mm의 가스셀에 30 Torr로 채웠다. 미국 Lawrence Berkeley National Laboratory의 Center for X-ray Optics에서 제작된 Mo/Si 다층박막 거울을 이용해 13.3 nm 파장의 고차조화파만을 선택하여 연엑스선 현미경으로 입사되게

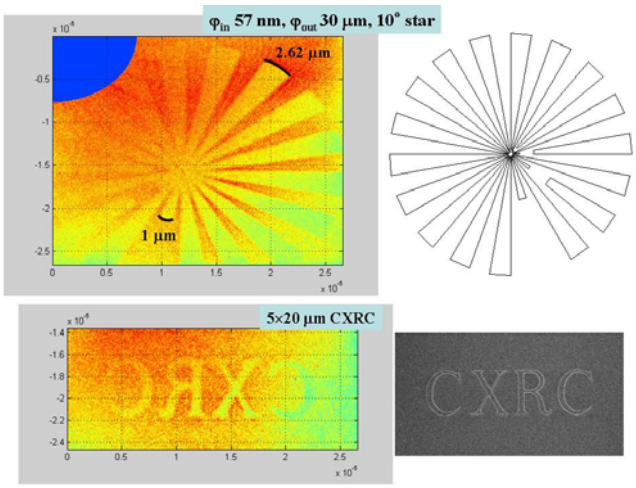

그림 3. Fresnel zone plate를 통해 얻은 나노패턴의 이미지.

하였고, 티타늄 사파이어 레이저의 적외선 빛은 200 nm 두께의 지르코늄 필터 3장을 써서 막았다. 그림 1에 발생된 고차조화파의 스펙트럼과 Mo/Si 거울의 반사율을 나타냈다. 관측하고자 하는 물체는 한국과학기술원 내의 나노종합팹센터에서 제작되었으며, 최소 50 nm에서 최대 5 μm 의 여러 패턴을 포함하고 있다. 물체의 영상은 Fresnel zone plate를 통해 엑스선 CCD에 맺히게 하였다. Fresnel zone plate는 반복되는 동심원의 투과판과 불투명판으로 이루어져 있으며, 최소 선폭 40 nm, 지름 160 μm, 초점거리 0.48 mm를 갖는다. 그림 2에 실험에 사용한 나노패턴 물체와 Fresnel zone plate, 실험장치도를 그렸다.

고차조화파를 이용한 연엑스선 현미경으로 관측한 결과를 그림 3에 나타내었다. 500 nm 이하의 나노패턴을 구별할 수 있었으며, 배율은 약 520 배에 달한다. 그림 3의 왼쪽은 CCD를 통해 얻은 이미지이고, 오른쪽은 제작된 나노패턴 물체를 확대해 이미지와 비교해 보았다. Fresnel zone plate를 통해 좌우가 바뀐 이미지를 얻을 수 있었다. 차후 고차조화파의 광량 향상과 배율 확대를 통해 1000 배에 달하는 양질의 확대 이미지를 얻을 수 있겠다.

This work was supported by Creative Research Initiatives(CXRC) of MEST/KOSEF. We would like to thank Dr. Yanwei Liu (CXRO/LBNL) for the Mo/Si mirror fabrication, and Dr. H. S. Youn(PALS) for his helpful advice of the Fresnel zone plate and x-ray microscopy.

1. D. G. Lee, J. J. Park, J. H. Sung, and C. H. Nam, "Wave-front phase measurements of high-order harmonic beams by use of point-diffraction interferometry," Opt. Lett. **28** 480 (2003).
2. Kyung Taec Kim, Kyung Sik Kang, Mi Na Park, Tayyab Imran, G. Umesh, and Chang Hee Nam, "Self-Compression of Attosecond High-Order Harmonic Pulses," Phys. Rev. Lett. **99** 223904 (2007).
3. M. Wieland, Ch. Spielmann, U. Kleineberg, Th. Westerwalbesloh, U. Heinzmann, and T. Wilhein, "Toward time-resolved soft X-ray microscopy using pulsed fs-high-harmonic radiation," Ultramicroscopy **102** 93 (2005).
4. R. L. Sandberg, C. Song, P. W. Wachulak, D. A. Raymondson, A. Paul, B. Amirbekian, E. Lee, A. E. Sakdinawat, C. La-O-Vorakiat, M. C. Marconi, C. S. Menoni, M. M. Murnane, J. J. Rocca, H. C. Kapteyn, and J. Miao, "High numerical aperture tabletop soft x-ray diffraction microscopy with 70-nm resolution," Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. **105** 24 (2008).