

경 엑스선 존 플레이트(Zone Plate) 설계 및 제작

천권수

대구가톨릭대학교 방사선학과

Design and Fabrication of Hard X-ray Zone Plate

Kwon Su Chon

Department of Radiological Science, Catholic University of Daegu

요 약

엑스선 영상의 공간분해능은 영상획득 장치에 사용되는 광학소자의 성능에 의해 결정된다. 8.5keV에서 높은 공간분해능 달성이 가능한 존 플레이트를 설계하였다. 방사광을 이용하는 대신 엑스선 튜브를 사용하는 영상시스템에서는 80nm의 공간분해능을 달성할 수 있음을 광선추적 기법을 이용하여 예측하였다. 전자빔 석판인쇄술을 이용하여 최외곽 폭 40nm를 갖는 존 플레이트가 제작하였다.

Abstract

Spatial resolution is determined by the performance of x-ray optics used in the x-ray imaging system. A zone plate was designed for obtaining a high spatial resolution image at x-ray energy of 8.5keV. A spatial resolution of 80 nm was estimated by the ray tracing when an x-ray tube of tungsten target was used instead of synchrotron radiation. The designed zone plate of outermost zone width of 40nm was successfully fabricated by the electron-beam lithography.

Key Word :Hard x-ray, Zone plate, Spatial resolution, Electron-beam lithography

I. 서 론

나노 공간분해능을 갖는 엑스선 영상을 얻기 위한 시스템이 활발히 연구되고 있고, 생물, 의학, 재료, 환경 등의 분야로 빠르게 응용이 발전하고 있다^[1]. 대부분은 3세대 방사광가속기의 높은 휘도를 갖는 엑스선을 이용한 빔라인(beamline)에서 고배율의 영상을 얻도록 고안된 엑스선 광학소자를 적용한 영상 시스템이 주를 이루고 있다. 최근에는 연 엑스선(soft x-ray)에서 15nm의 공간분해능을 갖는 영상이 얻어졌고^[2], 경 엑

스선에서는 30nm의 공간분해능을 갖는 엑스선 영상이 얻어졌다^[3]. 두 실험에서 각각 연 엑스선과 경 엑스선용 존 플레이트 광학소자를 사용하였다. 이와 같이 나노 분해능의 영상이 얻어질 수 있었던 것은 고 배율의 초미세 존 플레이트(zone plate)^[4]의 제작이 가능했기 때문이다. 존 플레이트를 이용한 엑스선 현미경 장치에서 영상의 공간분해능은 주로 대물렌즈로 사용되는 존 플레이트의 최외곽 폭(outermost zone width)으로 결정된다^[5]. 따라서 수십 나노미터 이하의 공간분해능을 갖는 엑스선 영상을 얻기 위해서는 존 플레이트의 최

외곽 폭 역시 수십 나노미터 이하로 제작할 필요가 있다. 전자빔 석판인쇄술(electron-beam lithography)을 이용하면 수십 나노미터의 폭을 갖는 나노 구조물을 만들 수 있다⁶⁾. 본 논문은 8.4keV에서 동작하는 존 플레이트를 설계하고, 전자빔 석판인쇄술을 이용한 존 플레이트의 제작에 대해 다루고, 엑스선 튜브의 광원을 사용할 경우에 대해 존 플레이트를 이용하여 획득할 수 있는 공간분해능에 대해 살펴본다.

II. 존 플레이트(Zone plate) 설계

생물(세포 또는 미세 조직) 및 산업용 시료(반도체 칩)를 분석하기에 유용한 8.4keV의 경 엑스선(hard x-ray)을 고려하였다. 이 엑스선 에너지는 텅스텐 타겟(target)을 갖는 엑스선 튜브에서 발생될 수 있다. 즉 8.4keV는 텅스텐 $L_{\alpha 1}$ 특성방사선에 해당된다.

존 플레이트는 원점을 중심으로 격자가 원형 대칭 구조를 가지도록 되어 있으면 격자의 반지름이 증가할수록 격자와 격자 사이의 간격은 점차 줄어드는 구조로 되어 있다⁷⁾. 존 플레이트의 존의 반지름은 다양한 파라미터들로 표현 가능 하나 최종적으로는 4개의 독립 변수에 의해서 결정되어 진다. 엑스선 현미경은 시료의 위치와 검출기의 위치가 정해져 있으므로 대물광학소자로 사용되는 존 플레이트의 배율(M)과 시료와 존 플레이트 사이의 거리(g), 및 존의 개수(n)에 의해서 결정될 수 있다. 원점에서 격자와의 반지름(r)은 식(1)과 같이 쓸 수 있다.

$$r_n = \frac{\sqrt{n\lambda(4g+n\lambda)(4Mg+n\lambda)}}{8(1+M)g+4n\lambda} \times \sqrt{4(1+M)g+n\lambda} \quad (1)$$

여기서 m 은 n 번째 존의 반지름이고 λ 는 8.4keV의 포톤이 가지는 파장이다. 최외곽 존을 결정하기 위해서는 또 하나의 구속조건이 필요하다. 통상 이는 현미경의 집광소자의 개구(numerical aperture)에 의해서 결정된다. 여기서는 개구가 0.00184가 되도록 하였다. 이 개구수는 모세관 광학소자(capillary optic)⁷⁾에 의해서 집광될 수 있는 엑스선의 조사(illumination)에 해당된다. 표1은 $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ 의 픽셀 크기를 갖는 검출기를

사용하여 49nm의 공간분해능을 달성할 수 있는 존 플레이트의 사양을 나타낸 것이다. 이 공간분해능은 이상적인 에너지를 가지는 경우에 해당된다. 그러나 존 플레이트는 매우 강한 색수차를 나타내기 때문에⁸⁾ 엑스선 튜브에서 발생하는 텅스텐의 특성방사선의 단색 특성에 따라 그 분해능을 떨어지게 된다. 따라서 실제 설계는 텅스텐 타겟을 갖는 엑스선 튜브를 사용하는 것으로 했을 때 80nm의 공간분해능이 얻어 질 수 있도록 하였다. 단색의 엑스선을 얻기 위해서 엑스선 튜브 앞에 모노크로메터를 설치할 필요가 있고, 다층박막 거울은 모노크로메터 역할을 수행할 수 있으며 텅스텐 특성방사선을 높은 효율로 단색화 할 수 있다. 배율은 시스템의 길이와 검출기의 검출면적과 분해하고자하는 해상도와 검출기 픽셀을 고려하여 결정하였다.

표1. 텅스텐 특성방사선 8.4keV에 대한 존 플레이의 설계 사양

구분	$W_{L_{\alpha}}$
에너지(파장)	8.4keV(0.148nm)
배율	338×
공간분해능	80nm
초점심도	43 μm
개구수 (NA)	0.00184
최외각 존 폭	40nm
존 개수	153
직경	24.48 μm
초점 길이	6.65mm

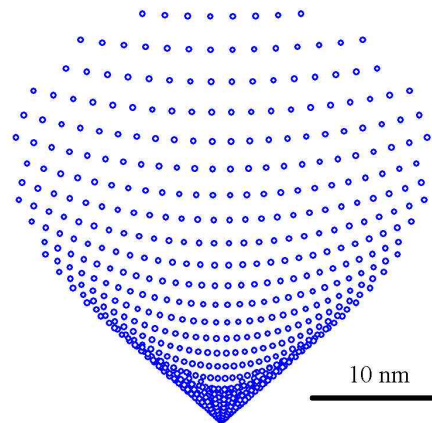


그림1. 비축 $15\mu\text{m}$ 떨어진 점 광원에서 출발한 광선에 대한 스팟 다이어그램

그림1은 설계된 존 플레이트에 대한 광선추적(ray tracing)에 의한 스팟 다이어그램(spot diagram)을 표시한 것이다. 광축에서 출발한 광선들은 존 플레이트를 통과한 후 스크린에서 한 점으로 수렴된다. 그러나 비축 광원에서 출발한 광선들(여기서는 15 μm 의 비축 거리에 위치한 점광원)은 코마수차(coma aberration)가 나타난다는 것을 알 수 있다. 광선추적을 통한 스팟 다이어그램으로부터 rms blur circle을 계산함으로써 달성할 수 있는 공간분해능을 예상할 수 있다^[9].

존 플레이트는 어떤 다른 수차보다 색수차에 민감하다. 그림1에서 나타나는 코마수차는 색수차에 비하면 무시할 수 있다. 그림2는 색수차에 의한 광선추적 결과를 나타낸 스팟 다이어그램이다. 내부 스팟들(“x”)은 단색화 정도가 $\Delta E/E=0.01$ 인 경우이고, 외부 스팟들(“+”)은 $\Delta E/E=0.046$ 인 경우(8.4keV 보다 에너지가 높은 경우)이다. 이때 달성 가능한 공간분해능은 80nm이다. 49nm의 레일리(Rayleigh) 해상도는 $|\Delta E/E| \leq 0.028$ 에서 얻어 질 수 있다. 텅스텐 특성방사선 $L_{\alpha 1}$ 인 8.376keV를 중심으로 -38.3eV에서 39.2eV의 에너지를 갖는 엑스선에 대해서는 광선추적 결과 80nm의 공간분해능을 갖는 것으로 평가되었다. 한편 텅스텐 튜브에서는 $L_{\alpha 1}$ 뿐만 아니라 $L_{\alpha 2}$ (8.3352keV)도 동시에 발생되고 겹쳐있다. 두 특성방사선의 에너지 간격은 62.4eV이다. 따라서 두 에너지 간격이 80nm를 얻기 위한 77.5eV 보다 작기 때문에 두 특성방사선이 겹쳐진 특성방사선을 이용하면 80nm의 공간분해능을 갖는 영상을 획득할 수 있을 것이다.

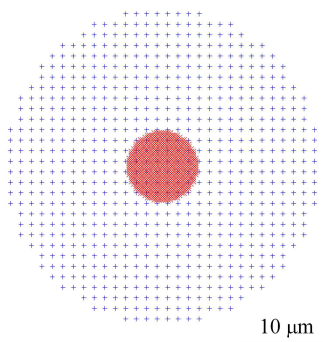


그림2. 단색화 정도에 따른 스팟 다이어그램. 내부 스팟(“x”)은 $\Delta E/E=0.01$ 인 경우이고, 외부 스팟(“+”)은 $\Delta E/E=0.046$ 이다.

III. 존 플레이트(Zone plate) 제작

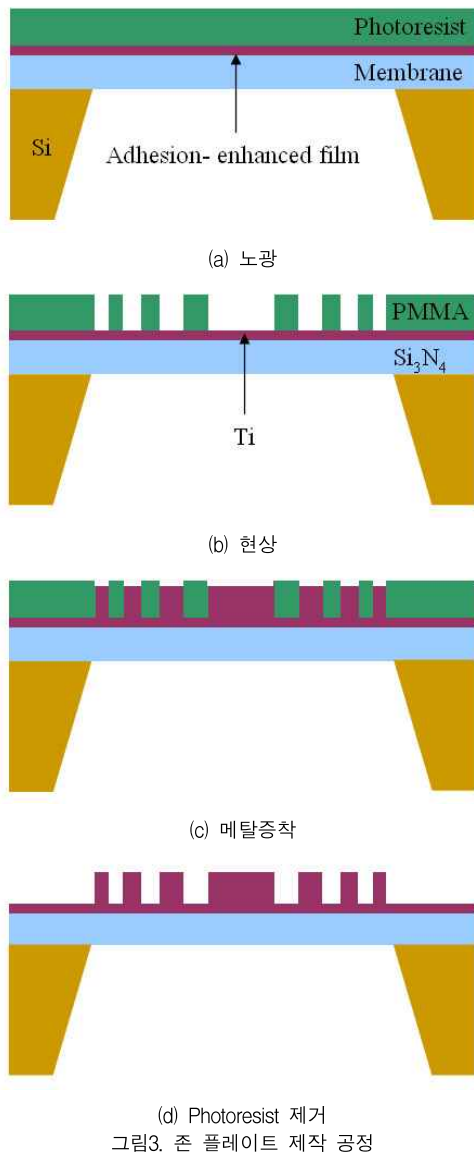
설계된 존 플레이트를 제작하기 위하여 전자빔 식판인쇄기법을 사용하였다. 우선 E-beam writer를 이용하여 초미세 패턴 공정을 위하여 설계된 값을 이용하여 존 플레이트용 패턴 데이터(GDS 파일)를 작성하였다. 기판은 실리콘 웨이퍼 사용하였다. 실리콘 기판위에 메탈 증착을 용이하게 하고 접착을 유지하기 위하여 Ti 5nm를 코팅하였다. 그리고 그 위에 두께 250nm의 positive photoresist (PMMA)를 spin coating 하였다. 표2는 존 플레이트 제작을 위해 photoresist 코팅에 대한 조건을 표시하였다. 그림3은 존 플레이트 제작을 위한 공정을 표시한 것으로 노광(exposure), 현상(develope), 메탈증착(metal deposition), 및 photoresist 제거(lift-off) 단계로 구성되어 있다.

표2. Zone plate 제작을 위한 Photoresist 코팅 조건

구분		Photoresist 조건
Mode		Positive
Photoresist		PMMA
Base coating		HMDS 4000rpm
Spin coating	Thickness	250nm
	Rotation	4000rpm
Baking	Temperature	160° C
	Time	300sec

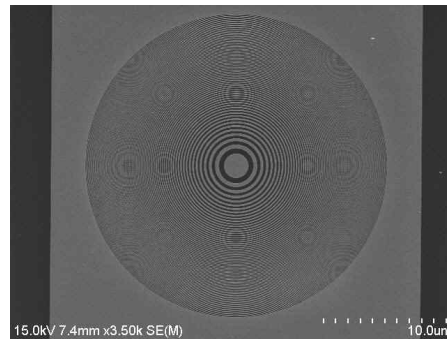
노광은 패턴의 최외곽 폭을 결정하는 데 매우 중요하다. 초미세 패턴 제작을 위하여 100kV E-beam writer를 이용하여 1nm focused beam으로 1200J/cm²의 도즈(dose)를 주어 writing하였다. 현상은 시간을 정확히 맞추는 것이 중요하다. PMMA인 경우 MIBK : IPA = 3 : 1 환경에서 90초 동안 현상을 수행했다. 금속 패턴을 형성하기 위해 metal deposition을 하였다. 증착을 위해서 E-beam evaporator를 사용하였고, 금속으로는 Au를 사용하였으면 증착두께는 100nm로 하였다. 비록

photoresist의 두께가 250nm이지만 메탈 증착 후 제거하고자 하는 부분(photoresist) 위에 증착되는 메탈과 패턴을 형성하는 메탈이 서로 연결되지 않도록 하기 위해 100nm 정도로 하였다. 그리고 증착 후 남아있는 photoresist를 제거하기 위하여 lift-off를 실시하였다. 제작된 패턴을 SEM으로 관찰하였다. 그림4는 positive photoresist를 이용하여 제작한 zone plate를 나타낸다. 최외곽 폭이 40nm로 제작되었음을 알 수 있다.

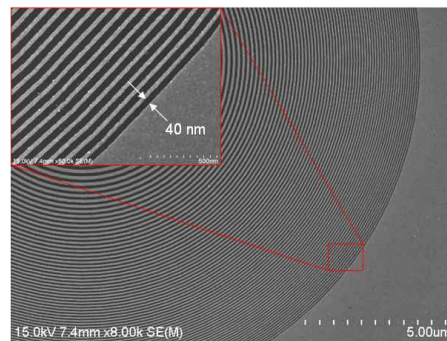


IV. 고찰

엑스선 튜브에서 발생되는 텅스텐 특성방사선 (8.5keV)을 이용한 고 해상도 영상을 얻기 위한 존 플레이트를 설계하고 제작하였다. 존 플레이트는 강한 색수차를 나타내기 때문에 존 플레이트에 입사되는 엑스선은 단색성이 보장되어야 한다. 텅스텐 타킷의 엑스선 튜브를 사용하면 발생하는 $L_{\alpha 1}$ 과 $L_{\alpha 2}$ 의 특성방사선의 겹침으로 80nm의 공간분해능을 갖는 영상이 획득이 가능할 것이다.



(a) 전체



(b) 외곽 존

그림4. 최외곽폭 40nm를 갖는 존 플레이트

전자빔 석판인쇄술을 사용하여 40nm의 최외곽 폭을 갖는 존 플레이트의 제작하였다. 존 플레이트는 8.5keV의 경 엑스선에서 동작하기 때문에 높은 중횡비가 요구된다. 단일 PMMA의 photoresist를 이용하는 제작 방법에서는 중횡비를 높이는데 제한이 있기 때문에 높은 중횡비를 갖는 존 플레이트를 제작하기 위해서는 추가적인 제작 공정 연구가 필요하다. 연 엑스선

용 존 플레이트는 경 엑스선에 비해 상대적으로 낮은 중
횡비에서도 잘 동작하기 때문에 본 논문의 제작 방법
을 이용하면 연 엑스선에서 실제 사용 가능한 존 플레
이트를 제작할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으
로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업
입(No.2010-0005661).

참고문헌

- [1] David C, Nolting F, Pfeiffer F, Quitmann C, Stampanoni M, 9th International Conference on X-Ray Microscopy, Journal of Physics Conference Series 186, Institute of Physics, Bristol, 2009
- [2] Chao W, Harteneck BH, Liddle JA, Anderson EH, Attwood DT, Soft X-ray Microscopy at Spatial Resolution Better than 15 nm, Nature 2005; 435; 1210-1213
- [3] Chen YT, Lo TN, Chu YS, Yi J, Liu CJ, Wang JY, Wang CL, Chiu CW, Hua TE, Hwu Y, Shen Q, Yin GC, Liang KS, Lin HM, Je JH, Margaritondo G, Full-field hard x-ray microscopy below 30 nm: a challenging nanofabrication achievement, Nanotechnology 2008; 19; 395302
- [4] Kirz J, Phase zone plates for X rays and the extreme UV, Journal of Optical Society of America 1974; 64; 301-309
- [5] Attwood D, Soft X-rays and Extreme Ultraviolet Radiation: Principles and Applications, Cambridge University Press, 1999
- [6] Shaver D, Flanders D, Ceglie N, Smith H, X-ray Zone Plates Fabricated Using Electron-Beam and X-ray Lithography, Journal of Vacuum Science and Technology 1979; 16; 1626-1630
- [7] Kumakhov MA, Channeling of photons and new X-ray optics, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B 1990; 48; 283-286
- [8] Young M, Zone plates and Their Aberrations, Journal of Optical Society of America 1972; 62; 972
- [9] Fischer RE, Tadic-Galeb B, Yoder PR, Optical System Design, SPIE Press, 2008