

다층박막 거울을 이용한 단색 엑스선 획득

— Acquisition of Monochromatic X-ray Using Multilayer Mirror —

대구가톨릭대학교 방사선학과

천 권 수

— 국문초록 —

나노 공간분해능을 갖는 영상을 얻기 위한 경엑스선 현미경 시스템에서는 단색 엑스선이 요구된다. 엑스선관에서 발생하는 화이트 빔으로부터 8.4 keV의 텅스텐 L_{α} 특성방사선을 84% 이상 반사시킬 수 있는 5.65 nm의 단위막 두께를 가지는 C/W 다층박막 거울을 설계하였고, 이온빔 스파터링 장치를 이용하여 50×50 mm 크기로 제작하였다. 제작된 C/W 다층박막 거울은 99.5% 이상의 균일도(Uniformity)를 가지며, TEM 사진을 이용해 그 구조를 확인하였다. 8.05 keV의 구리 특성방사선을 광원으로 하는 엑스선 반사율 측정 장치를 이용한 다층박막 거울의 반사율을 측정함으로써 C/W 다층박막 거울의 8.4 keV에서의 반사율을 예상할 수 있었다. 제작된 C/W 다층박막 거울과 엑스선관을 이용하여 8.4 keV의 특성방사선을 획득함으로써 단색 엑스선을 획득하였다. 이때의 반사율은 77.1%였고, 단색 엑스선의 반치폭은 0.21 keV이었다.

엑스선관에서 높은 효율로 단색 엑스선을 획득할 수 있어 실험실 규모의 경엑스선 현미경 장치의 광원으로 사용될 수 있는 가능성을 확인하였고, 다층박막 거울의 단위막 두께를 수 나노미터로 제작한다면 17.5 keV의 폴리브텐 특성방사선에 해당하는 단색 엑스선을 얻어 유방촬영에도 적용할 수 있을 것이다.

중심 단어: 단색 엑스선, 엑스선관, 특성방사선, 다층박막 거울, 엑스선 반사율

I. 서 론

최근 나노 공간분해능을 갖는 엑스선 영상에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다¹⁾. 특히, 방사광가속기 및 레이저 발생 엑스선 광원을 이용하여 살아있는 세포의 나노 공간분해능을 갖는 영상과²⁾, 단일 세포의 고분해능 3차원 토모그래피(Tomography) 영상을 얻고 있다³⁾. 이들 연구에서는 물에 대한 세포 조직의 대비도(Contrast)가 높은

연엑스선(Soft X-ray) 영역의 광자가 사용되고 있다⁴⁾. 연엑스선 영역에서 물질(공기)의 흡수율은 매우 크기 때문에 영상 획득 시 진공이라는 특수 환경이 필요하다. 이러한 환경은 영상획득에 많은 제한을 준다. 최근 15 nm의 공간분해능을 갖는 엑스선 영상이 방사광(Synchrotron Radiation)의 빔라인(Beamline) 엑스선 현미경 장치에서 얻어졌다⁵⁾. 한편, 상대적으로 광자의 에너지가 높은 8 keV 근방의 경엑스선(Hard X-ray)에서는 대략 30 nm의 공간분해능이 달성되고 있다⁶⁾. 수십 나노미터의 공간분해능을 갖는 엑스선 영상을 획득하기 위한 장치에서는, 고휘도(High Brightness)의 단색 엑스선(Monochromatic X-ray)이 필수적으로 요구된다. 방사광을 사용하는 대신에 사용이 편리하고 구조가 간단한 실험실 규모 크기의 나노 공간분해능 달성이 가능한 장치도 꾸준히

*접수일(2010년 7월 24일), 심사일(2010년 8월 9일), 확정일(2010년 9월 6일)
- 이 논문은 2010년도 대구가톨릭대학교 교내연구비 지원에 의한 것임.

교신저자: 천권수, (712-702) 경북 경산시 하양읍 금락1리 330번지
대구가톨릭대학교 방사선학과
TEL: 053-850-3437, HP: 010-5154-5293
FAX: 053-850-3292, E-mail: kschon@cu.ac.kr

연구되고 있다⁷⁾.

엑스선관에서 발생하는 엑스선은 백색광(White Beam) 특성을 가진다⁸⁾. 엑스선관으로부터 단색 엑스선을 획득하기 위해 방사광가속기의 빔라인에서 사용되는 단결정 모노크로메터(Single Crystal Monochromator)를 사용해왔다⁹⁾. 단결정 모노크로메터는 엑스선의 회절 성질을 이용한 광학소자로 효율이 대략 1% 미만이기 때문에 단색 엑스선 획득시 단결정 모노크로메터를 이용하면 세기(Intensity)가 크게 떨어지는 단점이 있다. 따라서 단결정 모노크로메터를 이용해서 단색 엑스선 영상을 획득하기 위해서는 장시간 노출(Exposure)이 가능한 고효율의 엑스선관이 필요하다.

엑스선관으로부터 높은 선속(Flux)을 가지는 단색 엑스선을 획득하면 다양한 분야의 응용이 가능하다. 8.4 keV 근방의 단색 엑스선은 산업용 시료(예, IC 칩의 구리 배선) 및 바이오 시료(단일 세포) 검사에 유용하고⁷⁾, 유방촬영(Mammography)에 사용되는 17.5 keV의 몰리브덴 특성방사선은 영상의 대조도 향상과 환자의 방사선 피폭 저하를 동시에 실현할 수 있을 것이다¹⁰⁾.

본 연구는 다층박막 거울¹¹⁾(Multilayer Mirror)을 이용하여 엑스선관의 화이트 빔에서 높은 효율로 8.4 keV의 단색 엑스선을 획득하기 위한 것으로, 다층박막 거울은 효율이 낮은 단결정 모노크로메터의 단점을 극복할 수 있을 것이다.

II. 다층박막 거울의 설계 및 제작

1. 단색 엑스선

다층박막 거울은 두께 d_L 인 경원소(Low Z Material) 층과 d_H 인 중원소(High Z Material)의 층이 하나의 쌍이 되어 단위막을 형성하고, N 개의 단위막이 기판(Substrate) 위에 적층되어 있는 구조로 되어 있다¹²⁾. 다양한 파장을 가진 화이트 빔이 입사각 θ 를 가지고 다층박막 거울에 입사되면, 경원소 및 중원소 층의 경계에서 굴절, 반사되고, 이 빔들이 상쇄, 보강 간섭하여 최종적으로 브래그 조건(Bragg Condition)을 만족하는 엑스선 파장만이 다층박막 거울에서 반사 된다¹³⁾. 따라서 경원소와 중원소 층으로 구성된 쌍(단위막)의 두께(d -spacing)와 입사 각도를 조절함으로써 엑스선의 파장을 선택적으로 골라낼 수 있다. 선택적으로 반사되는 엑스선의 반사율(Reflectivity)은 입사각도, 단위막의 두께($d = d_L + d_H$),

두께비(d_H/d), 층과 층 사이의 계면거칠기(Interfacial Roughness), 단위막의 개수(Number of Bilayers)에 의존하게 된다¹⁴⁾. 특히, 파장이 짧은 경엑스선의 경우 계면 거칠기에 의한 강한 산란(Scattering)이 발생하기 때문에 50% 이상의 높은 반사율을 얻기 위해서는 계면거칠기가 대략 0.3 nm 이하가 되어야 한다.

엑스선의 에너지는 측정 시료에 따라 최적의 대조도를 나타낼 수 있도록 선정 되어야 하고, 엑스선을 발생 시킬 수 있는 엑스선관을 동시에 고려해야 한다. 엑스선관에서 발생하는 전체 엑스선 광자 중에 획득하고자 하는 단색 엑스선 광자의 개수는 일부분이기 때문에 최대의 광자를 얻기 위해서 본 연구에서는 연속적으로 발생하는 낮은 제동복사 부분을 선택하지 않고 높은 강도 분포를 갖는 특성 방사선만을 선택적으로 골라내도록 하였다. Fig. 1은 텅스텐과 몰리브덴 특성방사선이 동시에 방출되는 엑스선관의 스펙트럼을 나타낸 것이다. 엑스선관의 운전 조건은 관전압 40 kVp와 관전류 0.5 mA이었고, Si-PIN 다이오드 검출기를 이용하여 스펙트럼을 측정하였다. 8.4 keV의 텅스텐 L_{α} 특성방사선의 강도가 가장 높다는 것을 알 수 있다.

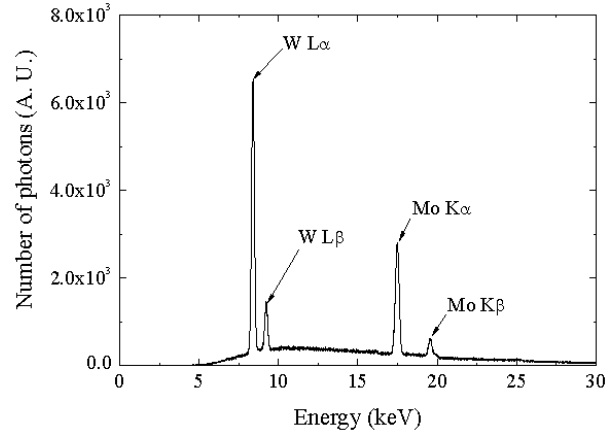


Fig. 1. X-ray spectrum generated from an x-ray tube

2. 다층박막 거울의 설계

엑스선관에서 발생하는 화이트 빔 중 텅스텐 L_{α} 특성 방사선에 해당하는 단색 엑스선을 얻기 위하여 Table 1과 같이 다층박막 거울을 설계하였다. 우선 8.4 keV의 텅스텐 특성방사선의 선속을 최대로 하기 위해 다층박막 거울의 브래그 각도를 0.8° 로 하였고, 경원소와 중원소는 각각 탄소(C)와 텅스텐(W)이 되도록 하였다. C/W 박막 조

Table 1. Design parameter for a C/W multilayer mirror

Design parameters	Values	Remarks
Bragg angle	0.8°	
Materials	C/W	Top material : C
d-spacing	5.65 nm	
Thickness ratio	0.36	
Number of bilayers	30	
Interfacial roughness	0.3 nm	Root mean square

합은 물리, 화학적으로 매우 안정하며¹⁵⁾, 특히 경엑스선 영역에서 높은 반사율을 나타낸다. C/W를 포함한 다양한 조합의 다층박막 거울이 경엑스선 천체망원경을 위한 광학소자로 많이 연구되고 있다¹⁶⁾. 경엑스선용 천체망원경 거울은 원통형 모양의 비구면 형상(Shape)을 가진다. 설계된 C/W 다층박막 거울은 평면 기판 위에 C와 W의 나노 박막이 증착되도록 하였다. 비구면 위에 C/W 나노 박막을 형성하는 것 보다 상대적으로 쉽게 제작할 수 있다. 한편 비슷한 에너지 영역에서 W/Si 다층박막 거울도 많이 사용된다. 엑스선회절 분석기(X-ray Diffractometer)에서는 W/Si 박막이 비구면 포물선위에 증착되어 있는 다층박막 거울을 이용하여 구리의 특성 방사선을 얻고 분석을 위한 광원으로 사용하고 있다.

다층박막 거울이 대기 중에 노출되기 때문에 최상위 층이 금속일 경우 산화되어 성능이 떨어질 가능성이 높기 때문에 이를 방지하기 위하여 탄소가 최상위 층이 되도록 하였고, 단위막의 개수는 20이 되도록 하였다. 이 때 C/W 조합의 총 두께는 8.4 keV의 엑스선의 침투 깊이(Penetration Depth) 보다 커서 다층박막 거울의 반사율은 기판인 실리콘의 영향을 거의 받지 않는다. Fig. 2는 Table 1과 같이 설계된 C/W 다층박막 거울에 대한 반사율을 에너지의 함수로 계산한¹⁷⁾ 것을 표시하였다. 브래그 각도(0.8°)에서 이상적인 반사율은 84%가 된다. 실제 제작에는 여러 가지 요인, 특히 계면거칠기에 의한 산란 때문에 측정되는 반사율은 이상적인 반사율 보다는 작아지게 된다. C/W 다층박막 거울은 8.4 keV에서 첫 번째 브래그 피크가 나타나고 16.2 keV에서 두 번째 피크가 나타난다. 두 번째 피크에 해당하는 16.2 keV는 8.4 keV 반사율의 36%이고 또 발생하는 엑스선 빔의 강도는 8.4 keV에서의 강도의 4.5%이므로 다층박막 거울에 의해 반사되어도 매우 작다. 그리고 8.4 keV에서 반사된 에너지의 반치폭(FWHM)은 0.82 keV이다. 그러나 엑스선관에서 발생하는 텅스텐 특성방사선의 반치폭은 0.26 keV로 0.82 keV

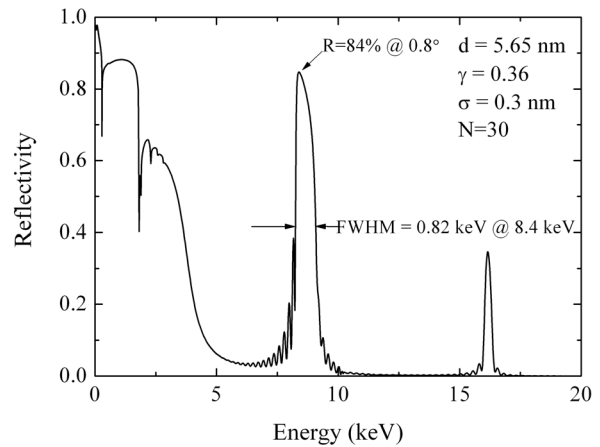


Fig. 2. Reflectivity as a function of incident X-ray energy for a C/W multilayer mirror

보다 작다. 따라서 설계된 다층박막 거울을 이용하면 엑스선관에서 발생하는 단색 특성의 특성방사선을 높은 반사율로 얻어 낼 수 있다.

3. 다층박막 거울의 제작

설계된 C/W 다층박막 거울은 두께 주기가 매우 작고, 요구되는 계면거칠기가 0.3 nm 이하로 제작 되어야 하기 때문에 나노미터 두께 주기를 갖는 나노박막의 증착이 가능한 초미세 박막 증착기를 사용해야 한다. 이온빔 스파터링 장치(Ion-Beam Sputtering System)를 사용하여 50×50 mm 크기의 실리콘 웨이퍼 위에 설계된 C/W 다층박막 거울을 제작하였다. 제작된 다층박막 거울의 반사율 측정은 Cu 타겟(8.047 keV)을 갖는 엑스선관을 사용한 반사율 측정 장치(X-ray Reflectometer)를 이용하였다. Fig. 3은 측정된 반사율과 이론적인 모델을 이용하여 피팅(Fitting)한 반사율을 표시한 것이다. 모델 피팅은 Trilayer 모델을 이용하였다. 이는 W와 C 사이(W-on-C의 경계)에 형성된 Interdiffusion Region이 새로운 층을 형성한다는 것을 의미하는 것이다¹⁷⁾. 두께 주기가 매우 작기 때문에 층 사이의 상호확산(Interdiffusion)이 물리적으로 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다. 그리고 이 새로운 층은 텅스텐카바이드(WC)로 밝혀졌고¹⁷⁾, 그 두께는 0.25 nm이었다. 그러나 C-on-W의 경계는 새로운 층으로 표시되기 보다는 0.2 nm의 계면거칠기를 갖는 단순 경계인 것으로 평가되었다. Table 2에 각 층에 대한 사양을 표시하였다. 제작된 다층박막 거울을 전자현미경(TEM)을 이용하여 단면을 관찰하였다(Fig. 4). 각 층이

Table 2. Layer properties of the fabricated C/W multilayer mirror

Parameters	d-spacing (nm)	Layer thickness (nm)			Density ratio (film/bulk)			Interfacial roughness (nm, rms)			Number of bilayers
		W	C	WC	W	C	WC	W	C	WC	
Design	5.65	2.03	3.62	0	1	1	0	0.3	0.3	0	30
Measurement	5.69	1.85	3.59	0.25	0.88	0.88	0.85	0.2	0.2	0.2	30

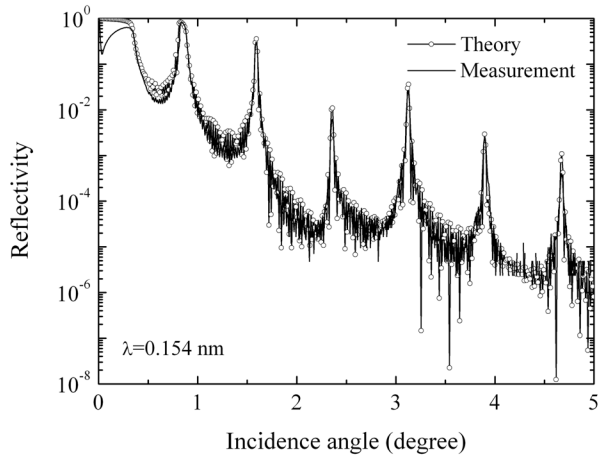


Fig. 3. X-ray reflectivity measurement for the fabricated C/W multilayer mirror using an X-ray reflectometer in X-ray energy of 8.04 keV

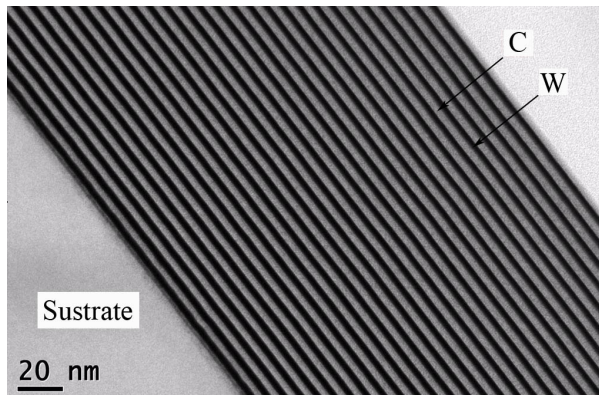


Fig. 4. TEM (Transmission Electron Microscope) cross section image of the C/W multilayer mirror. Black and gray parts of the multilayer coating show tungsten and carbon layers, respectively

매우 균일하게 적층되었다는 것을 확인할 수 있다. TEM 사진을 이용하면 두께 주기가 $5.7 \text{ nm} \pm 0.05 \text{ nm}$ 임을 알 수 있다. 이 값은 반사율 측정으로 구한 값과 매우 잘 일치

한다. 그리고 TEM 사진의 단면 프로파일을 조사해 보면 W-on-C의 경계(0.28 nm)가 C-on-W의 경계(0.19 nm)보다 더 넓은 것을 알 수 있다. 이는 반사율 측정으로 알려진 W-on-C의 경계가 새로운 텅스텐카바이드가 된다는 것을 간접적으로 알 수 있다.

III. 단색 엑스선 획득

반사율 측정에 사용된 Cu 특성방사선(8.047 keV)은 $W_{L\alpha}$ 특성방사선 에너지(8.398 keV)에 매우 가깝기 때문에 다층박막 거울의 반사율 및 단색성을 이해하는데 중요한 역할을 한다. Fig. 3에 나타난 것과 같이 첫 번째 브래그 피크의 반사율은 74.3%이다. 따라서 8.4 keV에서도 높은 반사율 값이 기대 된다. Fig. 5는 제작된 C/W 다층박막 거울을 이용하여 단색 엑스선을 획득하기 위한 장치 구성을 표시한 것이다. 엑스선관에서 발생된 다색 엑스선 (Polychromatic X-ray)이 다층박막 거울에 0.8도 각도로 입사하게 되고, 브래그 조건을 만족하는 단색 엑스선만이 반사되어 검출된다. 40 μm 의 초점 크기를 갖는 엑스선관을 사용하였기 때문에 초점의 유한한 크기에 의한 다층박막 거울에 입사하는 각도에 미소한 변화가 발생됨으로 텅스텐의 특성 방사선(8.398 keV)이 가지는 에너지 폭보다 대략 0.1 keV 보다 넓은 단색 엑스선이 얻어질 것이다. Fig. 6은 엑스선관에서 발생된 직접빔(Direct Beam)의 스펙트럼과 C/W 다층박막 거울 모노크로메터를 통과한 후의 스펙트럼을 비교한 것이다. 브래그 조건을 만족하지 않는 엑스선 파장들은 다층박막 거울의 내부에서 상쇄 간섭으로 모두 제거되고, 텅스텐의 특성방사선에 해당하는 8.4 keV의 단색 엑스선이 높은 반사율로 얻어진다. 특성을 알 수 있다. 특성방사선의 에너지 폭은 0.21 keV로 측정되었다. 동일한 측정 조건에서 C/W 다층박막 거울을 통과한 빔과 직접빔을 비교함으로써 C/W 다층박막 거울을 통과한 8.4 keV의 반사율을 측정할 수 있고,

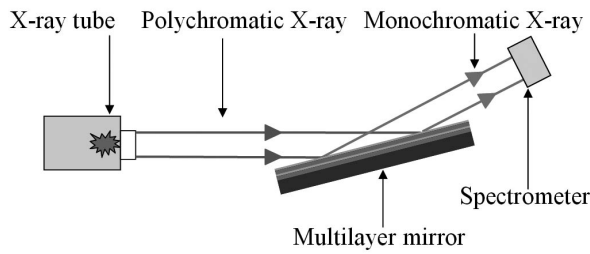


Fig. 5. System configuration for obtaining monochromatic X-ray from a tube source

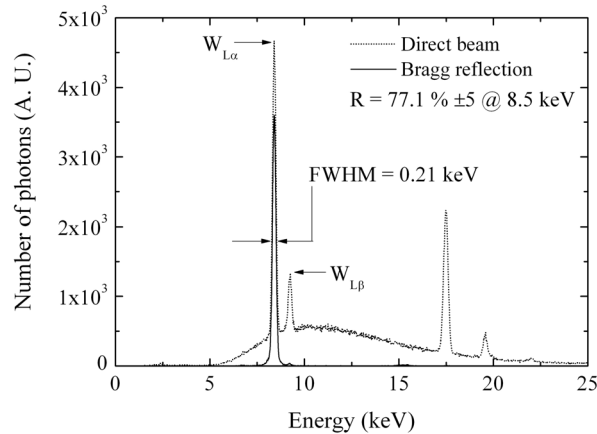


Fig. 6. X-ray spectra for the direct beam and the reflected beam by the C/W multilayer mirror

77.1%±5의 반사율이 얻어졌다. 이 값은 Fig. 3에서 얻어진 구리의 특성방사선에 대한 엑스선 반사율 74.3%와 매우 비슷하다.

IV. 결론 및 고찰

나노 다층박막 코팅 기술을 이용하여 C/W 다층박막 거울을 제작하여 엑스선관에서 발생하는 특성방사선을 획득함으로써 높은 효율로 단색 엑스선을 얻을 수 있었다. 다층박막 거울을 이용하면 단결정 모노크로메터의 매우 낮은 효율을 극복할 수 있다. 그러나 C/W 다층박막 거울의 단색성($\Delta E/E$)은 0.025(0.21 keV/8.4 keV)로 단결정 모노크로메터로 얻을 수 있는 단색성($\Delta E/E < \sim 0.005$)보다 대략 5배 이상 떨어지는 단점이 있다. 하지만 단색 엑스선의 휘도가 대략 70배 이상 세기 때문에 단색 엑스선 영상을 얻기 위한 경우에는 다층박막 거울을 사용하는 것이 바람직하다. 그리고 텅스텐 특성방사선으로부터 얻

어진 단색 엑스선의 단색성(~ 0.025)은 존 플레이트(zone plate)를 이용하는 실험실 규모의 고배율, 고해상도 엑스선 현미경 장치에서 100 nm의 나노 공간분해능을 갖는 영상을 획득하는 광원으로 사용될 수 있을 것이다.

유방촬영에 사용되는 17.5 keV의 특성방사선을 얻기 위한 다층박막 거울도 8.4 keV용 다층박막 거울의 나노 코팅 기술을 적용하면 제작할 수 있을 것이다. 그러나 17.5 keV의 엑스선은 8.4 keV의 파장보다 더 짧기 때문에 계면거칠기에 의한 산란효과를 줄이기 위해서 계면거칠기를 감소시키기 위한 연구가 추가적으로 필요하다.

참고 문헌

1. David C, Nolting F, Pfeiffer F, Quitmann C, Stampanoni: 9th International Conference on X-Ray Microscopy, Journal of Physics Conference Series, 186, 2009
2. Kim KW, Kwon Y, Nam KY *et al.*: Compact soft x-ray transmission microscopy with sub-50 nm spatial resolution, Physics in Medicine and Biology, 51, N99-N107, 2006
3. Larabell CA, Le Gros MA: X-ray Tomography Generates 3-D Reconstructions of Yeast, Saccharomyces cerevisiae, at 60-nm Resolution, Molecular Biology of the Cell, 15(3), 956-962, 2004
4. Kirz J, Jacobsen C, Howells M: Soft X-ray microscopes and their biological applications, Quarterly Reviews of Biophysics, 28(1), 33-130, 1995
5. Choa W, Harteneck BH, Liddle JA, Anderson EH, Attwood DT: Soft X-ray Microscopy at Spatial Resolution Better than 15 nm, Nature, 435, 1210-1213, 2005
6. Chen YT, Lo TN, Chu YS *et al.*: Full-field hard x-ray microscopy below 30 nm: a challenging nanofabrication achievement, Nanotechnology, 19, 395302, 2008
7. Tkachuk A, Duerwer F, Cui H, Feser M, Wang S, Yun W: X-ray computed tomography in Zernike phase contrast mode at 8 keV with 50-nm resolution using Cu rotating anode X-ray source,

- Zeitschrift Kristallographie, 222, 650–655, 2007
8. Bushberg JT, Seibert JA, Leidhold Jr. EM, Boone JM: The essential physics of medical imaging, 2nd ed., Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, 2001
 9. Millar JJ, Barnea Z: A simple x-ray crystal monochromator, Journal of Physics E: Scientific Instrument, 3, 570–571, 1970
 10. Carroll FE: Tunable Monochromatic X Rays: A New Paradigm in Medicine, American Journal of Roentgenology, 179, 583–590, 2002
 11. Spillar E: Soft X-ray Optics, SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, 1994
 12. Barbee Jr. TW: Multilayers for x-ray optics, Optical Engineering, 25(8), 898–915, 1986
 13. Batterman BW, Cole H: Dynamical Diffraction of X-ray by Perfect Crystal, Review of Modern Physics, 36, 681–717, 1964
 14. Chon KS, Namba Y, Yoon KH: Wolter type I X-ray focusing mirror using multilayer coatings, Applied Optics, 45(9), 4609–4616, 2006
 15. Windt DL, Donguy S, Seely JF, *et al.*: EUV multilayers for solar physics, Proceedings of SPIE, 5168, 1–11, 2004
 16. Tawara Y, Yamashita Y, Kunieda H *et al.*: Development of multilayer suppermirror for hard x-ray telescopes, Proc. SPIE, 3444, 569–575, 1998
 17. Chon KS, Yoon KH: Interdiffusion Region in a Tungsten–Carbon Multilayer Coating of Small d-spacing, Journal of the Korean Physics Society, 54(1), 23–28, 2009

• Abstract

Acquisition of Monochromatic X-ray Using Multilayer Mirror

Kwon-Su Chon

Department of Radiological Science, Daegu Catholic University

A hard X-ray microscope system for obtaining images of nano-spatial resolution has been widely studied and requires monochromatic X-ray. A multilayer mirror of 84% reflectivity was designed to acquire tungsten characteristic X-ray of 8.4 keV from the white beam generated from an X-ray tube, and the C/W multilayer mirror of 50×50 mm size and 5.65 nm d-spacing was fabricated by the ion-beam sputtering system. The C/W multilayer had a uniformity of 99.5%, and the structure of the multilayer mirror was verified by a TEM image. The obtainable x-ray reflectivity for the C/W multilayer mirror at 8.4 keV was estimated from measuring the X-ray reflectivity using the copper characteristic X-ray of 8.05 keV. Monochromatic X-ray of 8.4 keV was generated by combining a X-ray tube, and the reflectivity and monochromaticity were 77.1% and 0.21 keV, respectively.

Monochromatic X-ray generated from the combination of an X-ray tube and an C/W multilayer mirror has enough potential to use X-ray source for hard X-ray microscope system of laboratory size. If the C/W multilayer mirror of d-spacing of a few nanometers can be fabricated, monochromatic X-ray corresponded to 17.5 keV, molybdenum characteristic X-ray, can be obtained and applied to mammography in the medical application.

Key Words: Monochromatic X-ray, X-ray tube, Characteristic X-ray, Multilayer mirror, X-ray reflectivity