

1. 서론

원자 크기의 분해능을 갖는 엑스선 이미징(영상) 가능성은 100여년 전 Laue 등에 의해서 엑스선의 단파장 성질을 이해하기 시작한 이래로 모든 연구자들이 꿈꾸던 기술이다^[1]. 최근에 와서, 나노미터 스케일 크기를 갖는 다양한 형태의 나노 구조체들이 반도체 소자, 에너지, 디스플레이, 바이오, 의료 산업 등 전반에 걸쳐 연구, 응용되기 시작하면서부터 전자기 방사(electromagnetic radiation)의 원자 크기로의 집속이 과학적으로 매우 중요하게 자리매김 하기 시작하였다. 그 중에서도 특히 엑스선 현미경 기술은 그 고유의 특성으로 인하여 -특정 물질의 흡수 및 투과력, 다양한 에너지 스펙트럼, 정확한 화학적, 구조 정보 제공 등- 광학 현미경이나 전자 현미경이 제공하지 못했던 물질의 상보적 정보를 제공할 수 있

는데, 현재까지 10-20 keV의 에너지를 갖는 엑스선을 25-50 nm 크기로 집속할 수 있는 광학계들이 보고되어 있다.

여기에서 소개하는 다층박막 라우에 렌즈(multilayer Laue lens, MLL)는 미국 아르곤 국립 연구소에서 필자가 박사후 연구원으로 재직했던 MLL 팀에 의하여 개발된 새로운 형태의 경 엑스선 나노집속 광학계로서 현재까지 가장 작은 크기의 엑스선을 집속할 수 있는 것으로 알려져 있다^[6-10]. MLL팀은 Maser 박사, Stephenson 박사, Macrander 박사가 주축인 아르곤 연구소의 나노 센터 엑스선 연구 집단이다. 본 기술은 2005년 미국의 100대 기술에 해당하는 "R&D 100 award"를 수상하였다. 이곳에서 소개하는 내용들은 참고문헌 6-10에 발표한 내용을 요약하여 정리한 것이다. 아울러 최근의 실험 및 이론 연구 결과들을 소개하도록 한다.

특집 X-ray 광학

Multilayer Laue Lens : 경 엑스선 나노 집속 렌즈

강현철*

을 것으로 기대를 모으고 있다. Rayleigh 가설($R=0.5\lambda/NA$, R =분해능, λ =파장, NA =numerical aperture)에 의하면 엑스선은 원칙적으로 엑스선의 파장(0.1 nm)과 비슷한 크기로 집속할 수 있다. 그러나 엑스선을 집속할 수 있는 광학계(optics)를 제조하는 어려움으로 인하여 현재까지 이러한 한계에 도달하지 못하고 있을 뿐만 아니라, 이론적으로 어떤 형태의 광학계가 효과적인지 아직까지 연구되지 못하고 있는 실정이다^[2]. 대표적인 엑스선 나노 집속 광학계로는 Kirkpatrick-Baez 거울(K-B mirror)^[3], 프레넬 존 플레이트(Fresnel zone plate)^[4], 화합물 굴절 렌즈(compound refractive lens)^[5] 등이 있

2. 다층박막 라우에 렌즈(multilayer Laue lens, MLL) 개념

엑스선 집속 광학계는 엑스선의 고유한 성질, 즉 굴절률이 1보다 작고 파장영역이 매우 짧기 때문에 일반 광학계와는 매우 다르다. 즉, 물질과의 상호작용이 매우 작게 되어, 아주 작은 각도만이 굴절하거나 반사한다. 다시 말하면 큰 NA를 얻기 힘들고, 엑스선의 집속도도 매우 낮아지게 되어, 실제적으로 나노미터 스케일의 엑스선 빔을 얻는데 어려움이 많다. 전 세계적으로 미국의 Advanced Photon Source 등 거대 싱크로트론(방사광가속기)의 출

* 광주과학기술원 고등광기술연구소

현과 함께 엑스선 나노 집속 광학계에 대한 다양한 시도가 있었는데, 2005년에 Berkeley 그룹에서 발표한 엑스선용 프레넬 존 플레이트는 15 nm의 분해능을 갖도록 제작되어 이미징에 성공하였다^[1]. 경 엑스선용 프레넬 존 플레이트는 30 nm 분해능이 획득되었는데, 이는 3차 회절을 이용한 것으로 대만의 싱크로트론에서 시연되었다^[4]. 또한 전반사를 이용하여 큰 NA를 얻을 수 있는 반사거울 형태의 엑스선 나노 집속 광학계(K-B mirror)는 오사카대학의 연구팀의 주도로 일본의 SPring-8에서 개발되었는데, 현재까지 25 nm의 일차원적 집속을 갖는 엑스선 나노 빔을 발표하였다^[3]. 화합물 굴절 렌즈는 유럽 연합의 ESRF에서 시연되었는데, 약 47 nm의 크기를 갖는 엑스선 나노 빔을 발표하여 다양한 엑스선 현미경 기법이 시도되고 있다^[6]. 이상의 경 엑스선 광학계는 10-20 keV(파장=0.06-0.1 nm)의 엑스선 에너지 영역에서 사용되고 있다.

MLL은 그림 1(b)에서 보는 바와 같이 다층박막에서 회절하여 엑스선을 집속하는 형태로써, 프레넬 존 플레이트와 비슷한 형태이다. 그림 1(a)은 일반적인 프레넬 존 플레이트의 예시이다. 프레넬 존 플레이트는 원형 투과 격자(grating) 형태이고, 엑스선이 투과할 수 있는 투명한 층과 위상을 바꾸는 역할을 하는 흡수층이 교대로 위치하게 된다. 이때 각각의 층에서 엑스선은 $\lambda/2$ 만큼씩 위상이 달라져, 하나의 초점에 빔이 모아지게 된다. 각각의 층은 아래와 같은 프레넬 형식에 의하여 원점으로부터의 거리에 위치하게 된다.

$$r_n^2 = n\lambda f + n^2 \lambda^2 / 4,$$

여기에서 r_n 은 n 번째 층의 위치이고, f 는 초점거리이다. 두 번째 항은 $n\lambda \ll f$ 일 때 생략할 수 있다. 최외각층의 두께 Δr 은 $r_n - r_{n-1}$ 이다. 프레넬 존 플레이트의 분해능은 최외각층의 두께와 거의 같다(원형 존 플레이트의 경우는 $R=1.22\Delta r$, 선형일 경우는 $R=\Delta r$). 또한, 투과층과 흡수층 사이의 광학적 대비, 투과 깊이(빔 진행방향으로의 광학계의 크기), 각 층의 정확도, 입사빔의 근원 크기, 결맞음성 등이 분해능을 결정하는 주요한 요인이 된다.

일반적으로 프레넬 존 플레이트는 전자빔 리소그래피(lithography)와 패턴전사(pattern transfer) 기술로 제조된다. 존 플레이트의 집속 효율은 최외각층 두께, 물질,

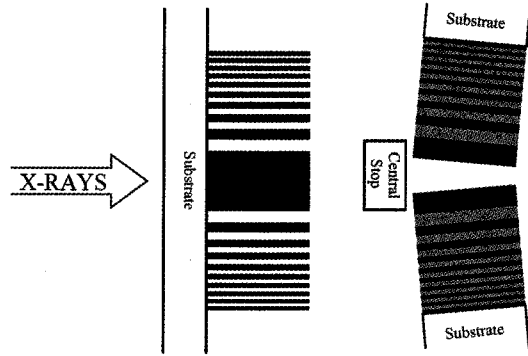


그림 1. (a) 일반적인 프레넬 존 플레이트의 개념도. (b) MLL의 개념도. 두개의 MLL section이 마주하여 완전한 MLL을 이루게 된다.

엑스선 에너지 등에 영향을 받는데, 그 중에서도 특히 aspect ratio(최외각층 두께와 투과 깊이의 비)에 의해 크게 좌우된다. 큰 aspect ratio를 얻기 위하여 Si_3N_4 membrane 위에 코팅한 감광제(PMMA, ZEP 등)에 존 플레이트 패턴을 전자빔 리소그래피를 이용하여 제조한 후, 전기 도금법에 의하여 Au를 증착하여 존 플레이트를 완성한다. 최근의 나노 과학의 발전과 아울러 전자빔 리소그래피 기술의 발전이 거듭됨에 따라, 프레넬 존 플레이트 최외각층 두께는 약 5 nm의 한계까지 제조할 수 있는 것으로 보고되어 있다. 그러나 전자빔의 원천 크기, 감광제의 분해능, 진동 등 장치의 안정도 등으로 인하여 실제로 리소그래피를 이용하여 제작한 존 플레이트의 최외각층 두께는 현재 15 nm가 가장 작은 크기이다(이때의 투과 깊이는 200 nm 정도이다.). 또한, 집속 효율을 결정하는 투과 깊이는 전기도금 방법을 이용할 경우 실제로 약 1-2 μm 으로 제한되어, 경 엑스선에 사용되는 프레넬 존 플레이트의 집속효율은 수 %로 매우 작다. 그림 2는 다양한 형태의 다층박막 라우에 렌즈의 투과 깊이(section depth)의 변화에 따른 집속효율의 변화를 나타낸다. 최외각층의 두께는 5 nm 이고, tilted MLL의 경우 최적의 투과깊이는 약 10 μm 이다. 최적의 투과깊이는 최외각층의 두께에 따라 달라지고, 엑스선 에너지에 비례한다.

MLL은 존 플레이트 형태를 기존의 리소그래피 방법이 아닌, 박막의 증착(deposition) 및 절단 연마(cross-sectioning)에 의하여 제조하는 새로운 기법이다. 존에 해당하는 수백 개 혹은 수천 개의 박막 층을 스퍼터링 방법에 의하여 정확한 두께만큼 증착한 후, 이를 잘라서 연

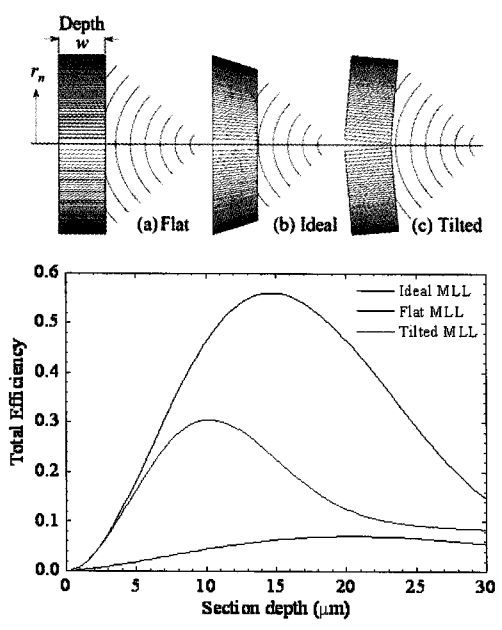
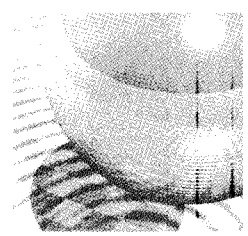


그림 2. 다양한 형태의 다층박막 라우에 렌즈의 투과 깊이(section depth)에 대한 이론적인 집속 효율의 변화. 엑스선 에너지는 19.5 keV이다. Flat MLL은 일반적인 프레넬 존 플레이트이다. 존 플레이트의 tilt에 의하여 집속효율이 급격하게 증가함을 알 수 있다.

마하여 엑스선을 투과시키면 회절에 의하여 엑스선 빔이 초점에 모이게 된다. 증착은 가장 작은 두께를 가지는 최외각층을 먼저 증착하기 때문에 집속을 결정하는 가장 중요한 부분의 결함이 최소화되도록 한다. 두 개의 다층박막 section을 서로 마주 보게 하여 하나의 존 플레이트를 완성하게 된다. 이때 Bragg 회절 각만큼($\theta_B = 0.05-0.3$ 도) 회전하게 되면(tilted MLL) flat MLL보다 큰 집속 효율을 얻을 수 있다. 또한 절단 연마를 통하여 빔이 통과 되는 투과 깊이를 결정할 경우 매우 큰 aspect ratio - 5 nm의 최외각층과 10 μm의 투과 깊이의 경우 aspect ratio는 2000임 - 를 얻을 수 있어 집속 효율이 일반적인 프레넬 존 플레이트보다 수십 배 이상 증가하게 된다. 기본적으로 MLL은 일차원적 집속 렌즈이기 때문에 점 집속을 위해서 두 개의 MLL을 서로 교차하여 설치하여야 한다.

MLL은 기본적으로 프레넬 존 플레이트와 같은 개념이지만, 그 제조 방법의 우수성으로 인하여 프레넬 존 플레이트의 한계를 뛰어 넘는 새로운 기법이다. 첫째로 분해능을 결정하는 최외각층의 두께는 현재의 전자빔 리소그라피 기법의 한계를 뛰어넘어 1 nm 이하의 두께를 증착

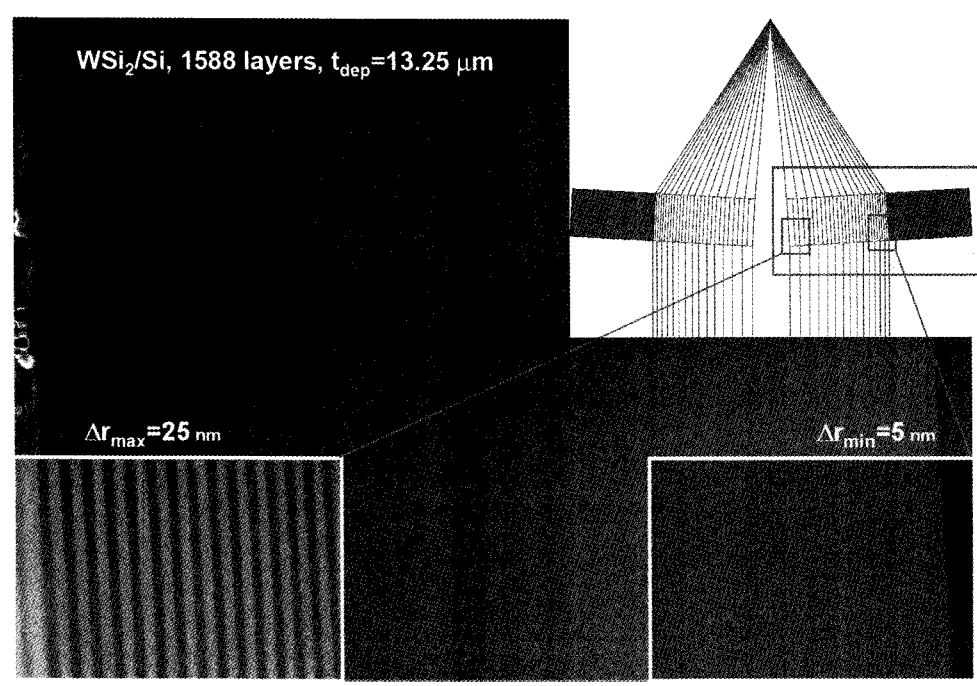


그림 3. MLL의 SEM 단면 사진. 첨가그림은 MLL의 개념도를 나타낸다. MLL의 가장 작은 두께층과 가장 두꺼운 두께층의 SEM 사진을 확대하여 삽입그림에 나타내었다. 흰 stripe는 WSi_2 다층박막층이고, 검은 stripe는 Si 다층박막층이다.

하는 것이 가능하다. 그림 3은 최외각층의 두께가 5 nm 인 MLL의 SEM 사진이다. 둘째로, 프레넬 존 플레이트를 경 엑스선 영역에서 사용하기 위해서는 aspect ratio가 매우 커야 하는데, 기존의 리소그라피 및 패터닝 전사 방법으로는 한계가 있어(aspect ratio는 약 20) 집속 효율이 5% 이하이다. 그러나 MLL은 절단 연마 방법에 의하여 section을 제작하기 때문에, aspect ratio는 한계가 없다. 그림 3의 MLL의 투과 깊이는 15 μm 이다. 따라서 aspect ratio는 3000이다. 셋째로 프레넬 존 플레이트는 대량 생산이 불가능해, 그 가격이 매우 비싸다(개당 1000만원-1억). 그러나 MLL은 2" Si wafer위에 다층박막을 증착하여 1 \times 2 mm²로 sectioning하는 과정을 거치므로 수백 개의 렌즈를 생산할 수 있다. 따라서 제조단가 또한 매우 낮아 경제적인 측면에서 프레넬 존 플레이트보다 월등하다.

3. MLL 특성 평가

그림 3의 MLL은 1588개의 박막층으로 이루어져 있다. 1588개의 박막층이 정확하게 프레넬 형식에 맞게 위치하여 있는지 평가하여야 한다. 그렇지 않다면 초점에서 엑스선의 위상이 맞지 않아 나노 빔의 크기가 이론적인 값보다 훨씬 더 크게 된다. 이를 위하여 SEM 이미지의 박막층 위치(line profile)를 분석하여 각각의 박막층의 위치를 그림 4와 같이 나타내었다. 앞서 설명한 프레넬 형식에 의하면, 초점거리가 엑스선의 파장보다 훨씬 크다면 그림 4의 그래프의 기울기는 $2/\lambda$ 이다. 만약 그래프가 직선이 아니라면 초점 부근에서 간섭 현상이 일어나 수많은 작은 초점들이 나타나게 된다. 즉 일차원 line profile은 제작한 MLL의 집속 능력을 간접적으로 평가하는 지표가 된다. MLL의 박막층이 프레넬 형식에서 벗어나면(직선 그래프가 아니라 2차원적 곡선 그래프라면), 참고 문헌 12에서 밝힌바와 같이 주된 1차 초점(primary focus) 주변에 수많은 간섭 무늬가 나타나게 된다¹²⁾.

MLL은 아주 정밀한 다이아몬드 절단기에 의하여 1 \times 2 mm²의 크기로 바둑판 모양의 수백 개의 작은 렌즈로 만들어진다. 이후 다이아몬드 필름을 이용하여 MLL의 투과 깊이가 수~수십 μm 가 되도록 연마한다. 이런 일련의 과정들을 겪으면서 어쩔 수 없이 MLL은 부분적으로 파

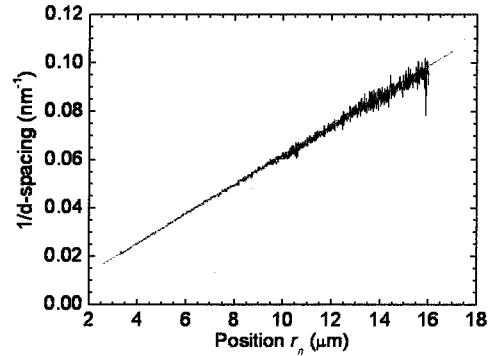


그림 4. 측정된 1/d-spacing 과 박막층의 위치 관계. 직선 그래프는 MLL의 박막층 위치가 프레넬 형식에 맞게 증착되었음을 나타낼 뿐만 아니라 엑스선 집속 정도 또한 유추할 수 있다.

괴되고, 박막층이 스트레스를 받는 등 결국 많은 결함 영역이 생기게 된다. 이렇게 절단과 연마 과정 중에 생긴 결함들은 렌즈가 제대로 작동하지 못하게 한다. 이러한 결함 영역은 이온 빔 스퍼터링에 의하여 제거되고 마지막으로 수동으로 연마실에서 다이아몬드 가루를 이용하여 연마하게 되면 그림 5(a)에서 보는 바와 같이 아주 깨끗한 표면을 얻게 된다. 그림 5(a)는 제작한 MLL의 양 측면의 AFM 표면 형상을 나타낸다. 그림 5(b)는 표면 형상의 일차원 그래프를 나타내고, RMS 표면거칠기를 계산하면 약 0.8 nm로서 잘 정돈된 표면임을 나타낸다. WSi₂와 Si의 연마 속도 차이로 인하여 표면에 격자 무늬가 나타나는데, 피크는 WSi₂이고 계곡은 Si이다. 그림 5(c)는 단일 슬릿의 Fraunhofer 회절 무늬와 같은 MLL의 Laue 투과 형태의 회절형태를 나타낸다. 이는 첫 번째 Bragg 점에서 θ -rocking을 통하여 얻은 것으로 MLL section의 연마한 양 끝단이 원자적으로 잘 정렬되어 있다는 것을 보여준다. 5(c)의 간섭무늬의 주기는 $2\pi/\Delta Q_x$ 의 관계에 의하여 MLL의 투과깊이에 해당한다⁷⁾.

MLL의 집속 효율을 간접적으로 측정할 수 있는 방법이 그림 6의 MLL의 라우에 투과 형태의 국부적 회절 강도 측정 방법이다. 위치 r_n 은 빔의 원점으로부터 MLL의 각 박막 층까지의 거리를 나타낸다. 원래 측정된 그래프는 MLL의 far-field 첫 번째 회절 피크의 산란 강도를 나타낸 것인데, 이는 MLL의 출구 표면에서의 near-field 엑스선 빔의 강도 분포와 같은 형태를 나타낸다. Coupled-wave dynamic 회절 이론에 의하여 계산된 국부적 회절 효율을 같이 나타내었다. MLL 위치와 wave

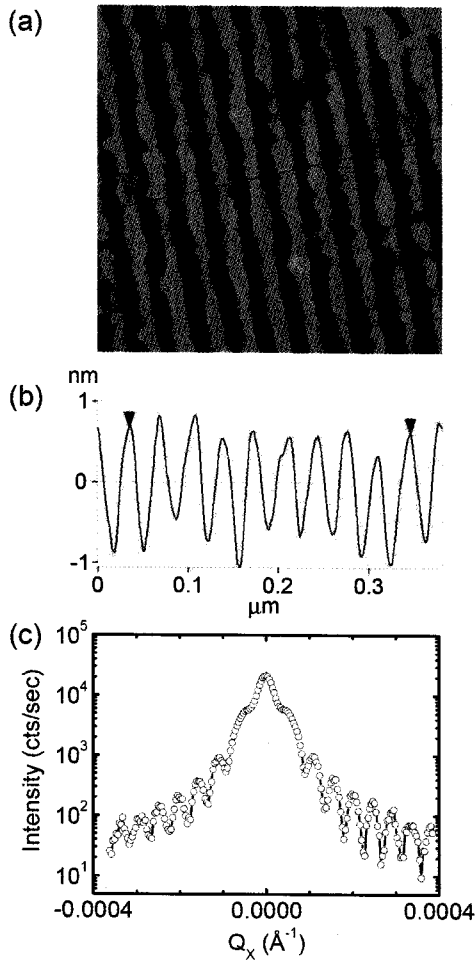
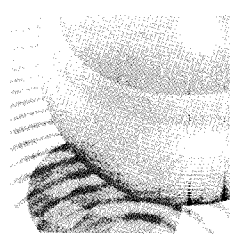


그림 5. (a) MLL section의 표면 형상을 측정된 AFM 이미지. (b) 표면 형상의 line profile. RMS 표면 거칠기는 0.8 nm 이다. (c) θ -rocking curve. 단일 슬릿의 Fraunhofer 회절 무늬 형태이다.

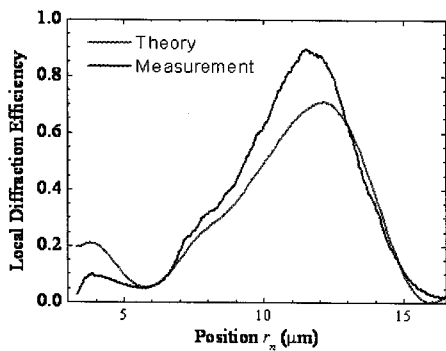


그림 6. 그림 3의 MLL의 far-field 엑스선 회절 무늬. 이 그래프로부터 MLL의 표면 끝단에서의 엑스선 강도의 분포를 유추할 수 있다. Coupled-wave dynamic theory에 의해 계산된 부분적인 회절 강도 또한 나타내었다.

number 사이에는 $Q_z = 2\pi r_n / \lambda f$ 와 같은 일차원적 관계가 있는데, 따라서 각각의 MLL 위치에서 회절 무늬의 산란 강도는 국부적 집속 효율을 나타낸다. 산란 강도의 총 합과 엑스선 주 빔의 산란 강도의 총 합과의 비율이 결국 MLL의 엑스선 집속 효율이다. 측정된 집속 효율은 31%이고, 이론적으로 계산된 집속 효율은 30%이다. 이는 측정값과 이론값이 매우 잘 일치함을 나타낸다. 집속 효율은 MLL의 회전각, 투과 깊이, 구성 물질 등에 따라 달라진다. 그림 3의 MLL에서는 0.1도의 회전각에서 최적의 집속 효율(31%)을 나타내었으며, flat MLL(회전각 없음)은 약 5%의 집속 효율을 나타내었다. 이는 MLL이 Bragg 회절각을 만족시키는 회전각으로 tilt하였을 때, 집속 효율이 매우 크게 증가함을 나타낸다.

4. MLL의 집속 특성

MLL의 집속 특성을 조사하기 위한 방법으로는 일반적으로 knife edge scan이 이용되고 있다. 즉 초점 부근의 엑스선 강도 분포를 아주 잘 정의된 금속 막대를 이용하여 fluorescence나 흡수되는 정도를 파악하여 반치폭(Full width at the half maximum, FWHM)이 통상적으로 집속된 엑스선 빔의 크기이다. 본 연구에서는 5 nm 너비를 갖는 Pt nano-wire를 초점에 노출하였을 때 발생하는 fluorescence 신호와 Pt로부터 산란된 신호를 scanning을 통하여 측정하여 FWHM을 초점의 크기로 정의하였다.

모든 실험은 미국 Advanced Photon Source의 26ID 빔라인에서 수행되었다. 여기에서 설명하는 자료는 그림 3의 단일 section의 MLL을 이용하여 측정된 자료이다. 두개의 MLL section을 마주보게 하여 완전한 MLL을 구현하는 것은 아직 기술적으로 완성되지 않았고, 현재 추진 중이다. 입사되는 엑스선의 에너지는 double-bounce Diamond monochromator를 이용하여 19.5 keV로 선택하였다. Front-End 슬릿을 이용하여 결맞은 엑스선 영역만을 선택하였고, MLL 바로 앞의 슬릿을 이용하여 수평방향으로 14 μm의 MLL이 엑스선에 노출될 수 있도록 조절하였다. 수직방향으로의 노출은 약 50 μm이다 (MLL은 일차원 선 집속 광학계이기 때문에 세로방향으로의 노출은 자유로이 조절할 수 있다.). MLL은

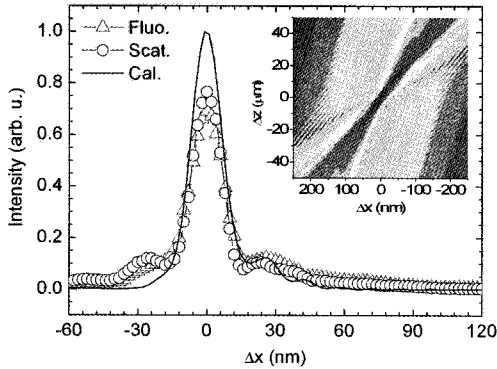


그림 7. 초점 부근에서의 집속된 엑스선 빔의 강도 분포. FWHM이 엑스선 빔의 크기가 된다. 그래프안에 첨가한 2차원적 엑스선 빔의 강도 분포는 Takagi-Taupin dynamic 회절 이론에 의하여 계산된 것이다.

goniometer에 장착되어 초점거리, 입사각 등 여러 가지 실험적 사항들을 정확히 조절할 수 있게 하였다. Pt nano-wire 또한 gimbel에 장착되어 엑스선 초점과 정확하게 배열할 수 있도록 조절하였다. 또한 Pt nano-wire는 2 nm step을 갖는 piezo-actuator에 의하여 엑스선 초점에 scanning하였다. 이때 Si-소자 엑스선 에너지 검출기를 이용하여 fluorescence를 측정하였으며(Pt $L\alpha$ & $L\beta$ 특성선 : 9.44 & 11.07 keV), 입사되는 엑스선으로부터 0.435도만큼 회전된 위치에서 Pt nano-wire의 far-field 회절 강도를 측정하였다.

그림 7은 측정된 fluorescence 신호와 산란(scattering) 신호를 나타내는 그래프이다. 통계적 정확도를 위하여 29번의 scanning 결과를 합친 것이다. 측정된 fluorescence 신호의 FWHM은 17.6 nm이고, 산란 신호의 FWHM은 15.6 nm이다. 두 FWHM의 차이는 Pt nano-wire의 두께에서 기인하는 분해능의 차이 때문이다. 또한 Takagi-Taupin dynamic 엑스선 회절 이론에 의거하여 계산된 초점 부근의 엑스선 강도 분포를 같이 나타내었으며, 이차원적인 분포는 그림 7의 삽입그림으로 나타내었다. 계산된 FWHM은 15 nm이고, 실제 측정치인 16 nm와 잘 일치함을 보여준다. 16 nm의 경 엑스선 나노 빔은 현재까지 보고된 것 중 가장 작은 크기이다. 측정된 초점의 크기는 여러 가지 실험적 오차가 영향을 주는데, 진동, 사용된 Pt nano-wire의 크기, 입사된 엑스선의 원천 크기 등이 오차로 작용한다.

MLL의 집속 효율을 측정할 수 있는 방법이 그림 8에

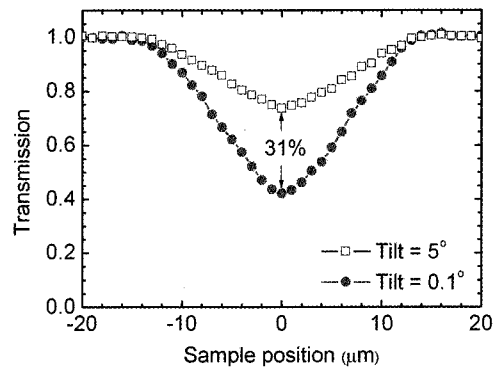


그림 8. MLL의 회전각 변화에 따른 투과도 그래프. MLL을 입사되는 엑스선에 대하여 scanning하였을 때의 엑스선 강도 변화를 나타낸다.

예시되어 있다. 앞서 그림 6에서 설명한 바와 같이 far-field에서의 엑스선 산란 강도를 측정하여 입사되는 엑스선의 강도의 총 합과의 비율이 엑스선 집속 효율이다. 여기에서는 보다 쉽게 집속 효율을 측정하는 방법을 설명한다. 만약 MLL이 Bragg 산란 조건을 만족하고 있을 때에는(tilt=0.1도) MLL에 의하여 흡수되는 엑스선의 강도의 감소는 extinction에 의한 것으로 측정치는 42%이다. MLL이 Bragg 산란 조건으로부터 많이 회전하였을 때에는 오직 MLL의 absorption에 의해서만 투과빔이 제한되고 이때 얻은 투과도 감소의 측정치는 73%이다. 따라서 extinction과 absorption의 차이인 31%가 바로 집속 효율이다. 측정된 31%의 집속 효율은 그림 6의 국부적 산란 강도로부터 얻은 집속 효율과 매우 잘 일치함을 보여준다.

5. 미래의 MLL

그림 2에 예시한대로 MLL은 박막의 배열에 의하여 다양하게 응용할 수 있다. 프레넬 존 플레이트는 flat MLL의 경우이고, 여기에서 주로 설명한 tilt MLL은 다층박막을 증착한 후, sectioning하여 두개의 다층박막 section을 서로 마주보게 한 후, tilt한 경우이다. 이때 집속 효율은 프레넬 존 플레이트에 비하여 수십 배 이상 크다. Ideal MLL의 경우에는 모든 박막층이 Bragg 조건을 만족하도록 개별적으로 회전하는 것이다. Ideal MLL은 모

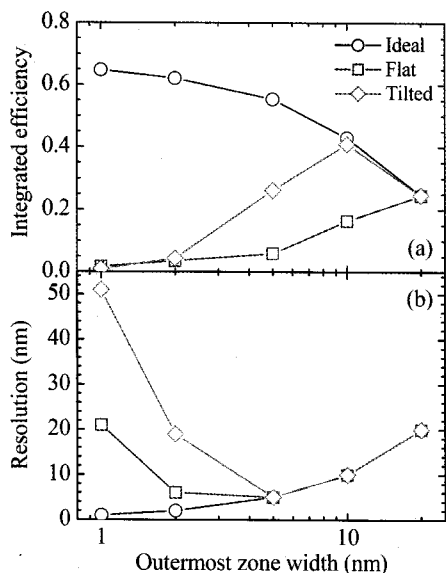
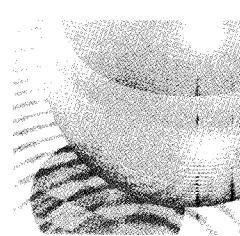


그림 9. (a) 계산된 집속 효율의 변화. (b) 분해능의 변화. Ideal, tilt, flat MLL의 경우를 고려하였다. 최외각층의 두께는 1 nm부터 20 nm까지 고려하였다.

든 층을 다른 각도로 증착하여야 하기 때문에, 제작하기가 매우 까다로울 뿐만 아니라, 여기에서 설명한 특성 평가 방법도 적용하기 쉽지 않다. 또한 ideal MLL의 경우에는 모든 층이 일차원적으로 회전하는 경우가 있고, 2차원적으로 회전하는 경우도 있다. 이렇듯 MLL은 최적의 경엑스선 나노 집속 렌즈로 최근에 제안되었고, 집속 효율을 높이기 위하여 aspect ratio가 커지기 때문에 기존의 grating 이론으로는 설명할 수 없고 새로운 dynamic volume diffraction 이론을 적용하여야 한다.

그림 9는 Coupled-wave theory를 이용하여 계산한 세 가지 다른 형태의 MLL의 집속 효율과 분해능을 최외각층의 두께 변화에 따라 그린 그래프이다. 분해능을 계산하기 위하여, MLL의 출구 표면에서의 complex pupil 함수를 먼저 계산한 다음, 최적의 초점 주변에서의 엑스선 강도 분포를 계산하여 77%의 산란 강도의 합을 가진 곳의 width를 분해능으로 결정하였다. 집속 효율은 ideal MLL의 경우 최외각층의 두께가 작아질수록 증가하는 반면, flat MLL, tilt MLL의 경우에는 감소한다. Tilt MLL의 경우 최외각층의 두께가 5 nm보다 작으면 집속 효율이 flat MLL의 경우와 비슷해지는데, 이는 다층박막의 회전으로 인하여 얻을 수 있는 Bragg 조건으로부터 많이 벗어나기 때문이다. 분해능을 살펴보면, 최외각층의

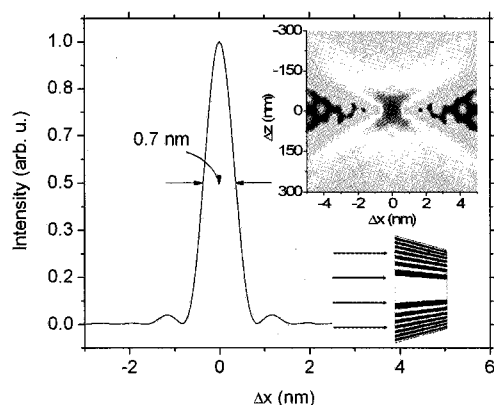


그림 10. Curved ideal MLL의 이론적 초점 크기. 최외각층의 두께는 0.75 nm이고, 지름은 80 μ m, 엑스선 에너지는 19.5 keV이다. 계산된 FWHM은 0.7 nm이고 집속 효율은 50%이다. MLL의 대략적인 예시를 삽입그림에 나타내었다. 초점 부근의 엑스선 강도 분포를 2차원적 예시로 나타내었다.

두께가 5 nm인 경우에는 flat MLL, tilt MLL 모두 약 5 nm의 분해능을 얻을 수 있는 반면, 그 이하의 최외각층 두께에서는 Bragg 조건으로부터 벗어나기 때문에 초점에서 위상이 일치하지 않아 소멸 간섭이 일어나게 되어 결국 분해능이 증가하게 된다. 이상의 결과를 종합해 볼 때, 현재 제작되어 있는 5 nm의 최외각층 두께를 가진 tilt MLL은 약 25%의 집속 효율과 5 nm의 분해능이 가능하다. 모든 다층 박막 층이 각각의 Bragg 조건을 만족하도록 회전하게 되는 ideal MLL의 경우에는 1 nm의 분해능과 65%의 집속 효율을 나타낸다.

MLL과 같은 volume diffractive optic의 집속 능력에 대한 정확한 이론은 불과 5년전부터 개발되기 시작하였다. 그림 9의 결과는 coupled-wave theory를 이용하여 계산하였는데, 1 nm 이하의 최외각층 두께를 가지는 MLL의 경우에는 적용하기 쉽지 않다. 따라서 참고문헌 10과 같은 새로운 이론적 모델이 제시되었는데, Takagi-Taupin의 dynamic 엑스선 회절 이론을 확장하여 원자 스케일의 엑스선 집속 광학계가 가능하다는 것을 보여준다. 그림 10은 일례로 모든 다층박막 층이 예시의 그림과 같이 휘어져 있으면서 각각의 층이 Bragg 조건을 만족하도록 다른 회전각을 이루고 있다. 최외각층의 두께는 0.75 nm이고, 지름은 80 μ m이다. 계산된 초점 크기는 0.7 nm이고 집속 효율은 50%이다. 실제로 0.75 nm의 두께를 갖는 박막은 스퍼터링 증착 방법으로 실현할 수 있는 가능한 크기이다. 그러나 ideal MLL 구조를 스퍼터

링 방법으로 구현하기에는 한계가 있으며, 현재 아르곤 연구소의 MLL 팀에서 새로운 증착 기법을 적용하여 시연을 준비하고 있다.

용할 경우에는 단일-분자 DNA(약 3nm의 크기)를 이미징할 수 있다.

6. 맺음말

여기에서 소개하는 Multilayer Laue lens는 획기적인 제조 기법으로 인하여 기존의 프레넬 존 플레이트의 한계를 뛰어넘어 5 nm 이하의 경 엑스선 나노 빔을 구현할 것으로 기대를 모으고 있다. 또한 꿈의 기술로 여겨졌던 원자 크기의 엑스선 빔으로 집속할 수 있는 가장 강력한 후보이다. 현재 16 nm의 경 엑스선 나노 빔을 획득하였으며, 다양한 엑스선 현미경 기법들이 시연되고 있다^[13]. 그림 7에서 측정된 16 nm의 엑스선 빔은 단일 MLL section을 이용하여 얻은 것이다. 만일 두개의 MLL section을 마주보게 하여 완전한 MLL을 구현하였을 때에는 이론적으로 8 nm 이하의 엑스선 나노 빔을 얻을 수 있다. 엑스선을 5 nm 혹은 그보다 작은 1 nm 까지 집속할 수 있는 엑스선 나노 집속 광학계의 개발은 많은 과학 분야에 그 파급효과가 엄청나다. 일례로 나노미터 스케일의 바이오 셀의 trace metal을 fluorescence 현미경 기법으로 실시간으로 이미징할 수 있다. 반도체, 디스플레이, 에너지 산업에 이용되는 나노 구조체의 화학적, 구조적 정보를 제공할 수 있을 뿐만 아니라, 최근 각광받고 있는 결맞은 엑스선 회절 영상의 신호 대비 소음 비율을 획기적으로 증가시킬 수 있어 1 nm 이하의 분해능을 이룰 수 있을 것으로 기대된다(자세한 기법의 소개는 본지의 coherent x-ray diffraction imaging에 소개되어 있음). 아울러 현재 전 세계적으로 건설되고 있는 자유전자 엑스선 레이저 시설에서 발생하는 결맞은 엑스선 레이저를 이

참고문헌

- (1) W. Friedrich, P. Knipping, and M. Laue, *Annalen der Physik* 41, 971 (1913).
- (2) C. Bergemann, H. Keymeulen, and F. van der Veen, *Phys. Rev. Lett.* 91, 204801 (2003).
- (3) H. Mimura et al. *Appl. Phys. Lett.* 90, 051903 (2007).
- (4) G.-C. Yin, et al. *Appl. Phys. Lett.* 89, 221122 (2006).
- (5) C. G. Schroer et al. *Appl. Phys. Lett.* 87, 124103 (2005).
- (6) H. C. Kang et al. *Phys. Rev. Lett.* 96, 127401 (2006).
- (7) H. C. Kang et al. *Appl. Phys. Lett.* 86, 151109 (2005).
- (8) H. C. Kang et al. *Rev. Sci. Instrum.* 78, 046103 (2007).
- (9) C. Liu et al. *J. Appl. Phys.* 98, 113519 (2005).
- (10) H. Yan et al. *Phys. Rev. B* 76, 115438 (2007).
- (11) W. Chao et al. *Nature* 435, 1210 (2005).
- (12) H. Yan et al. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 582, 126 (2007).
- (13) H. C. Kang et al. unpublished (2008).

약 력



강현철

학력
 1989-1995 : 한국과학기술원 재료공학과 학사
 1996-1998 : 광주과학기술원 신소재공학과 석사
 1998-2003 : 광주과학기술원 신소재공학과 박사

경력
 2003.3-2003.5 : 광주과학기술원 신소재공학과 연구원
 2003.6-2006.10 : Argonne National Laboratory, Materials Science Division, Postdoctoral appointee
 2006.11-현재 : 광주과학기술원 고등광기술연구소, 선임연구원