

◆특집◆ 정밀공학에서의 광계측 기술

엑스선 간섭계를 이용한 초정밀측정

엄천일*

Nanometrological Application of X-ray Interferometry

Cheon Il Eom*

Key Words : Nanometrology(나노측정학), X-ray interferometer(엑스선간섭계), Diffraction(회절), Linear calibrator(선형교정기), Nano radian angle measurement(나노라디안 각도측정)

1. 서론

교정은 모든 측정분야에서 어렵고 까다로운 주제인데, 특히 정전센서, 레이저간섭계, AFM, STM 등을 포함하는 나노메트롤로지(nanometrology : 나노측정) 분야에서는 그러하다. 나노측정에서는 전체 측정범위가 센서들의 한계분해능 값과 비슷한데, 이러한 측정에서 높은 소급성을 유지하기는 매우 어렵기 때문이다. 예를 들어 1 nm는 레이저 간섭계의 한 간섭무늬의 약 300분의 1에 해당하는 길이이다. 또한 이러한 측정을 위해서는 측정 환경이 높은 안정성을 가져야 한다. 1 K의 온도 변화는 1 mm 길이의 철 막대기에 10 nm의 길이 변화를 초래한다. 따라서 자연적으로 존재하는 구조, 예컨대 결정의 격자상수 등을 이러한 교정에 이용하려고 시도하고 있다.

길이 등의 정밀측정에 레이저 간섭계를 사용하면 μm 또는 sub- μm 영역의 길이를 측정할 수 있지만, 레이저 간섭계가 가지는 한계분해능때문에

나노미터 이하의 길이를 높은 정확도로 측정하기는 대단히 어렵다. 이러한 측정을 위해서 여러 측정기들이 개발되어 있지만, 이들 모두는 오차를 줄이기 위하여 별도의 교정절차를 필요로 한다. 한편, 엑스선 간섭법을 사용하면 $10 \text{ pm}(10 \times 10^{-12} \text{ m})$ 까지의 길이에 대하여 길이표준에 직접 소급될 수 있는 절대측정이 가능하다는 연구결과가 보고되어 있다. 이러한 엑스선 간섭계는 1965년에 Bonse와 Hart에 의하여 처음 고안되었다. 이렇게 늦은 이유는 엑스선의 파장이 10 \AA 이하인 관계로 매질에 대한 굴절율이 1에서 10^{-5} 정도밖에 벗어나지 않아 엑스선용 거울이나 렌즈 등의 광학소자를 제작할 수 없었기 때문이다. 또 다른 어려움은 μm 단위가 아닌 sub-nm 영역의 안정도가 유지되어야 한다는 것이었다. 초기의 엑스선 간섭계는 서로 분리된 세 개의 얇은 손톱크기의 실리콘 단결정 판으로 이루어져 있었고, 이 세 개의 결정판에 의한 엑스선의 동역학적 회절을 이용하여 엑스선 간섭계를 구현하였다. 그 이후 여러 연구소에서 엑스선 간섭계를 사용하여 실리콘의 격자상수를 측정하였는데, 이러한 노력은 최근까지도 계속되고 있다. 그 이유는 기본 물리상수 중의 하나인 아보가드로 상수를 직접 결정하기 위해서는 실리콘의 격자상수를 10^{-9} 이상의 정확도로 측정하여야 하는데, 이에 따른 어려움이 매우 크기 때문이다.

최근에 이르러 이러한 엑스선 간섭계를 나노미

* 한국표준과학연구원 역학연구부

Email : cieom@kriss.re.kr

Tel. : 042-868-5106, Fax : 042-868-5012

엑스선간섭계, 초정밀위치결정, 레이저간섭계 등 nanometrology 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

터 이하의 길이를 정밀측정하는데 응용하는 연구가 여러나라에서 점차 활발히 진행되고 있다. 현재 국내에서는 표준과학연구원에서 엑스선 간섭계에 대한 연구가 진행되고 있으며, 일체식 엑스선 간섭계를 설계 제작하여 초정밀 길이 측정에 응용하여 길이변환기의 선형성을 측정한 바 있다.

2. 엑스선 간섭계의 개요

엑스선 간섭계는 1960년대 초 Bonse와 Hart가 결정격자에서의 Bragg회절을 이용해 엑스선을 갈라 2개의 가간섭성 선속을 얻고, 이 두 선속을 다시 섞을 때 간섭신호를 얻을 수 있다는 결과를 이용한 것이 시초이다. 초기에는 Laue회절을 이용하여 엑스선이 얇은 결정판을 통과하며 회절을 일으키는 구조가 가장 많이 응용되었다. (111) 결정면에서의 회절이 일반적으로 이용되고 (220)면에서의 회절도 많이 이용된다.

그림 1처럼 완전한 격자구조에 평행한 엑스선이 Bragg각도로 입사되면 불필요한 반사는 사라지고 서로 완전히 대칭인 두 선속만 Bragg각도로 나온다. 이렇게 선속이 갈라진 후, 이 발산선속은 첫 번째 결정판(spilitter)과 평행한 두 번째 결정판(mirror)을 만나 또 회절을 일으킨다. 이 결정판을 지나면서 각 선속이 다시 각각 2개의 대칭인 선속으로 나뉘고 이중 안쪽으로 꺾이는 선속만을 이용한다. 이 두 선속들은 다시 세 번째 결정판

(analyser)을 지나면서 만나 간섭을 일으키고 정상파를 구성한다. 이 선속은 각각의 결정판에 대한 공간적인 위상정보를 가지고 있다.

물리적인 이론 해석은 엑스선의 동역학적 회절 이론의 해석에 의해 가능하지만, 여기서 다루고 있는 metrology의 관점에서는, 입사선속과 같은 방향의 출력이, 두 개의 평행한 격자를 통과한 균일한 광원과 거의 같은 성질을 가진다는 사실을 알면 충분하다. 즉, 무아래와 버니어 무늬가 나타나게 된다. 다만, 엑스선의 경우에는, 격자의 간격은 결정의 격자상수로서 수 옹스트롬 정도이고, 그 간섭무늬는 공기의 외란, 검출기의 비선형성 등 레이저 간섭계가 가지는 오차 요인과는 관계가 없이 얻어진다는 점이 다르다.

3. 선형 교정기

Hart가 1968년에 지적한 것처럼 엑스선 간섭계의 격자면은 나노 측정에서 이용 가능한 ‘옹스트롬 눈금(Angstrom ruler)’을 구성한다. 이것은 미국 NIST(국립표준기술연구원)의 Deslattes와 독일 PTB(연방물리기술청)의 연구 그룹에서, 안정화된 레이저로 현시되는 길이표준에 대하여 격자상수값을 얻기 위해 실제로 구현되었다. 이 연구는 광파장과 엑스선 파장의 비교로 불리기도 했는데, 여러 연구실에서 아보가드로 상수를 구해 질량 표준원기를 대신하고자 하는 연구로 진행되었다. 이에 따라 실리콘의 주 회절면의 성질과 격자상수값이 잘 알려지고, 길이표준에 대한 소급성이 좋다는 사실이 밝혀졌다.

반도체 산업의 발전으로 인하여 크고 결점이 없는 실리콘 단결정을 성장시킬 수 있게 되었고 그 격자상수도 10^{-6} 이하로 측정되었다(실리콘격자상수의 불확도 : femtometer 정도). 이와 같은 사실을 바탕으로 하여 실리콘 단결정으로 만든 엑스선 간섭계는 작은 변위의 교정에서 훌륭한 2차 표준이 되게 되었다.

변위측정장치는 나란히 정렬되어 세워진 결정판들과 출력 선속을 검출하는 큰 구경의 광자 계수용 섬광검출기로 구성된다. 분석기(analyser)결정판의 측면 방향의 운동은 한 주기가 한 격자상수에 대응하는 정현파의 주기적인 강도 변화를 가져온다. 실제적으로는 분석기 결정판 이동시의 상대

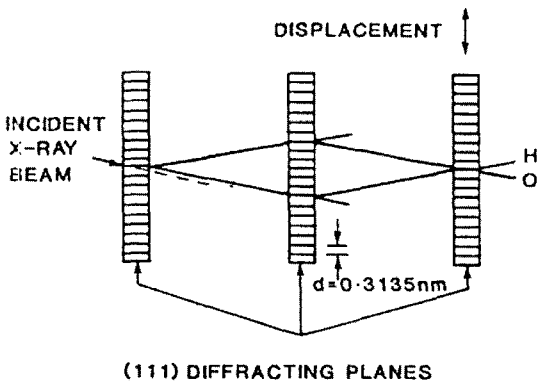


Fig. 1 X-ray paths in LLL-type interferometer comprising three thin silicon lamellas

적인 회전운동 때문에 무아래 무늬가 생기고 이로 인해 간섭무늬의 대조가 감소하며 오차가 발생한다. 따라서 이러한 회전운동 오차를 줄이기 위한 설계가 필요하다.

하나의 단결정 덩어리로부터 간섭계의 구성요소 즉, 이동대와 회절을 일으키는 결정판들을 만드는 것이 안정성이 좋고 효율적이기 때문에, 고순도 실리콘 단결정을 이용한 일체식 간섭계가 나노측정에 많이 응용되고 있다. 이러한 일체식 간섭계 결정의 경우, 분석기 결정판은 PZT에 의해 구동되는 탄성 이동대에 장착되어 있어 미세 이동할 수 있으며, 분할기(spplitter) 및 거울(mirror) 결정판에 대하여 일정한 위치에 나란하게 정렬되어 있다. 이에 비해 분할기 및 거울 결정판은 간섭계 결정의 몸체에 연결된 미세이동대의 고정부에 일정 간격으로 위치하고 있다.

접촉식 센서를 부착하여 측정할 수 있는 초기 형태의 엑스선 간섭계에 이어 한 덩어리의 실리콘 결정으로 탄성이동대와 세 결정판 들을 가공한 일체식 간섭계는 탄성이동대의 특성에 의해 측정범위가 제한되지만 기생 운동오차를 줄일 수 있고, 측정학적 안정성을 높일 수 있는 장점이 있다. 반면 결정판의 이동에 의해 결정에 비틀림을 초래할 수 있다. 그림 2는 최근에 영국 NPL에서 구성된 일체식 설계 중의 하나이다. 이송거리 10 μm , 최소 이송단위는 10 pm 정도이다. 실리콘 간섭계의 구조는 거의 완벽한 선형 탄성구조 이고, 구동체는 코일-자석 직동모터이다. 작은 영구자석이 부착되고 슬레노이드형 코일이 감겨 있어 코일의 전류에 비례해서 구동력이 발생한다. 이러한 높은 컵플라이언스를 가진 구조는 구동 제어가 쉽고, 코일 장착부에서의 진동에 대한 차폐효과로 일체식 간섭계의 방진을 가능케 한다. 또 실리콘은 비틀림이 커지면 비정상적인 결과를 내지 않고 파괴되어버리기 때문에 이로 인한 오차가 작다. 이 장치의 구동방향 양쪽에는 오프셀을 미세하게 줄 수 있는 2개의 자석 구동기가 있다. 탄성 구조체의 구동방향 이외의 방향에서 발생하는 작은 토크에 따라 생기는 차동전류가 비틀림을 방지한다. 또 구동력은 전류에 비례하고 코일의 열은 전류의 제곱에 비례하므로 주어진 변형에 대하여 열에 의한 영향을 작게 만들 수 있다는 장점도 있다.

고정 타겟형 엑스선 광원을 이용하면 가격이 낮고 외란이 작지만, 출력강도가 낮아 때 측정점

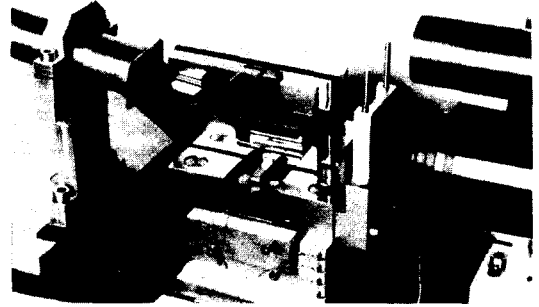


Fig. 2 Monolithic x-ray interferometer made of silicon single crystal

(보통 50 ~ 100 pm의 간격을 가짐)에서 수 초 동안 광자를 계수해야 한다. 따라서 이송 속도가 느리고 이에 따라 특별한 미세 이동용 전자회로가 필요하다. 이 장치는 범위 대 분해능비 10^6 과 수분에서 수 시간 동안 극히 높은 안정성을 가지는 20-bit DA 변환기를 필요로 한다. 1-bit 정도의 반복성이 있어야 한 개의 엑스선 간섭신호도 놓치지 않고 수 나노미터의 스텝으로 구동하며 측정이 가능하다. 구동기는 저속이므로 매우 작은 밴드폭을 가지고 있어 잘 필터링된 펄스폭변조(PWM)나 AD 변환에 의한 전류서보제어 등이 필요하다. 구동기와 일체식 간섭계를 통합하여 얻어진 효율은 그림 3에 잘 나타나 있다. 0.6 nm의 구동을 주고 다시 제자리로 복원한 경우이다.

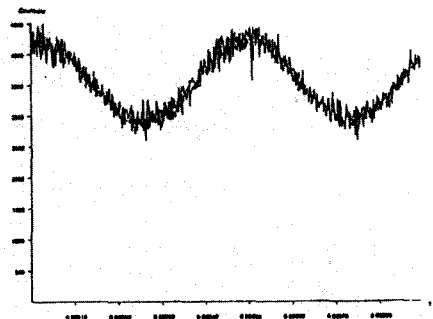


Fig. 3 Output signal of an x-ray interferometer

그림에는 포아송(Poisson)잡음이 나타나 있다. 중간부분 신호에서 발생한 튀 현상은 실험실의 차폐 오차에 의한 외란이다. 이런 외란에도 불구하고 외란 이후 짧은 시간에 정상 측정상황으로 복원되었음을 보여준다. 총 측정 시간은 30분으로 측정속도는 2 nm/hr정도이다.

엑스선 간섭계의 다른 연구가 NPL, PTB, IMGC등의 여러 연구소에서 협력과제로 시도되고 있는데, European Union's standards, Measurements and Testing Program의 지원을 받고있다. 이 과제는 광/엑스선 복합 간섭계(COXI ; combined optical and x-ray interferometer)의 개발을 위한 것인데, COXI는 NPL에 설치 중이며 마이켈슨 다중 간섭형의 고안정도 레이저 간섭계와 일체식 엑스선 간섭계를 이용한다. 대개의 경우 엑스선 간섭계 없이도 다중 간섭계에서의 거울의 움직임에 따른 간섭무늬의 나누기만으로도 충분히 고분해능의 측정이 가능하다. 그러나, 이러한 간섭무늬 나누기 방식이 가지는 오차는 상당히 큰 반면, COXI는 격자상수를 눈금으로 하기 때문에 이러한 오차가 전혀 없다. 즉, 엑스선 무늬의 한 위상점에 엑스선 간섭계를 이용해 고정시킴으로써 간섭무늬 나누기 방식보다 훨씬 높은 정확도로 측정이 가능하다. 이 방법은 주로 표준기관에서 시도되고 있다. 영국의 Warwick대학에서는 산업용 교정에 이용할 수 있는 간단하고 휴대 가능한 장치를 개발하기 위한 연구도 진행하고 있다.

4. 각도의 교정

선형간섭계에서 작은 기생 운동오차는 간섭무늬와 격자상수의 소급성에는 별로 영향을 주지 않지만, 무아래 무늬를 만들고 대조를 나쁘게 해서 오차의 원인을 제공했다. 그런데 이 엑스선 무아래 무늬를 결정판 사이의 회전오차 측정에 이용할 수 있다.

회전운동의 크기와 무아래 무늬의 주기 사이에는 반비례 관계가 있으며, 이 관계는 나노 라디안이나 마이크로 라디안의 범위에서 매우 민감하다. 회전운동의 크기가 작을 때 무아래 무늬의 주기는 $L = d/q$ (d 는 격자상수, q 는 회전각)으로 표시되고, 100 nrad의 회전과 0.2 nm의 격자상수에 대응

하는 무아래 무늬의 주기는 2 mm인데, 이는 범용 CCD 카메라로 측정이 가능하다. 카메라와 영상처리장치를 교정하여 분석기 결정판의 위치에 대응하는 값을 구하면 아주 작은 각도를 측정할 수 있다. 독일의 PTB에서는 일체식 실리콘 간섭계 결정에 레버 운동을 적용해 회전을 등가 이동으로 바꾸어 레버길이에 의해서 각도 측정의 정확도를 높인 결과를 얻고 있다.

일체식 실리콘 간섭계의 설계는 (220) 격자면을 결정판 길이방향으로 놓고, 분석기의 회전은 결정판의 중심에서 35 mm 아래에 있는 notch hinge를 기준으로 일어나도록 한다. 정밀한 설계를 통해 결정판의 중심선과 회전 중심이 일치하면 이 오차는 중요치 않음을 알 수 있다. 이 장치는 피봇위치에서의 민감도를 측정할 수 있도록 제작되었다. 간섭무늬의 기구학적인 거동은 회절면이 수직인지 수평인지에 따라 달라진다. 수직면을 회절면으로 사용하고 레버구조를 이용하여 변위를 발생시키고 무아래 무늬를 관찰함으로써 나노 라디안 이하의 내삽기를 만들 수 있다.

그림 4는 무아래 무늬의 영상을 보여 준다. 간섭무늬의 대조와 간격은 일체식 간섭계 결정의 토크압에 작은 균형 질량을 달아서 조절한다. 이 영상들은 섬광체로 코팅된 광학면을 가진 CCD 카메라로 1000 frame 이상 노출하여 얻은 것이다. 각도의 측정은 무아래 무늬의 주기측정에 의해 결정되므로 무아래 무늬해석에 위상 측정 방법이 이용되었다. 각 영상 픽셀의 국부적인 위상을 가지고 내삽법을 이용해 증감한 위상을 추정하는 효과적인 알고리즘을 이용하였다.

선형 내삽의 기울기는 무아래 무늬의 주기를 추정하는데 이용된다. 이 방법은 측정전후에 모든 픽셀을 평균화함으로써 모든 영상잡음을 제거할 수 있다. 단점은 측정하고자 하는 위치에서의 위상을 얻기 위하여는 3개의 위상을 천이시켜야 한다는 것이다. 일정한 두께의 폴리머 판을 간섭계 광로에 삽입하여 간단히 위상 천이를 일으킬 수도 있다. 물론 이 방법을 사용하면 간섭계의 광도에 삽입한 대상의 위상정보가 섞이게 된다. 그림 4d는 현미경 시편용 유리판에 에폭시 레진을 넣은 대상을 위상 천이판으로 사용한 경우의 측정 예이다. 이런 오차가 있을 수 있지만, 원리적으로는 엑스선 위상의 측정에 이용할 수 있음을 보여 준다.

5. 미래의 개선방향

위에 서술한 내용은 일체식 실리콘 엑스선 간섭계를 나노 측정에 이용하기 위해 필요한 기본적인 사항에 관한 것이다. 실제로 이용하기 위해서는 측정 대상의 적용방법(결합방법), 측정 속도의 개선 등이 필요하다. 측정속도의 향상 여부는 좋은 간섭무늬 측정을 위한 광자 계수방법에 따라 결정된다. 간섭계가 광원에서 나온 여러 선속 중에서 Bragg과장에 해당하는 선속만을 반사하므로 에너지 효율이 낮다. 기술적으로, 상업적으로 실용화하기 위해서는 현재보다 작고 값싸고, 더 센 광원과 영상 검출기가 필요하다. 다음 세기 초에는 나노미터 이하 영역의 측정에서 측정속도 10 ~ 20 Hz가 가능할 것으로 예상된다.

교정대상과 간섭계를 어떻게 결합할 것인가는 어려운 문제이다. 탐침이나 AFM등은 직접 간섭계의 구동축에 당도록 설치하는 것이 오차를 줄이는 방법이다. 이 때 결정판의 기생 운동오차는 직접적인 대조변화와 오차를 가져오므로 매우 잘 제어되어야 한다. 그러나, 간섭계가 방사선 차폐물 등으로 인하여 크기 때문에 또 다른 장치를 설치하기는 어렵다는 문제점이 있다. 센서의 축침은 간섭계에 접촉시킬 수는 있으나, 교정대상을 교체하는 등의 경우에 발생하는 오차가 수 나노미터에 이를 수도 있으므로 세심한 주의를 요한다.

각도 간섭계에 대하여는 좀 더 연구가 진행되어야 한다. 시준기나 레이저 측정기 등은 큰 요소 부품을 필요로 하므로 교정시에 이러한 요소들이 일으키기 쉬운 진동 등으로부터 일체식 간섭계 결정을 차폐하는 장치를 이용해야 한다. 고정 거울은 분할기 결정판과 거울 결정판에 붙이면 해결되지만 이동 거울이 분석기 결정판과 같이 움직이면 시준기의 적용이 제한되는 부자연스런 배치구조가 될 수도 있으므로 역시 주의하여야 한다.

이러한 것을 개선하기 위해 두 가지 시도가 이루어지고 있다. 하나는 일체식 간섭계 결정을 고분해능 비접촉 센서와 같이 사용함으로써, 간섭계 결정이 엑스선 시스템에서 분리되어 초정밀 교정 장치에 놓여질 수 있게 하는 것이다. 즉, 기기의 교정 전후에 실리콘 격자에 대하여 교정이 된 다른 게이지 들을 사용하는 것이다.

일체식 간섭계 결정과 구동기는 아주 작으므로 교정 소급성의 전달이 가능하고 아주 직접적인 소

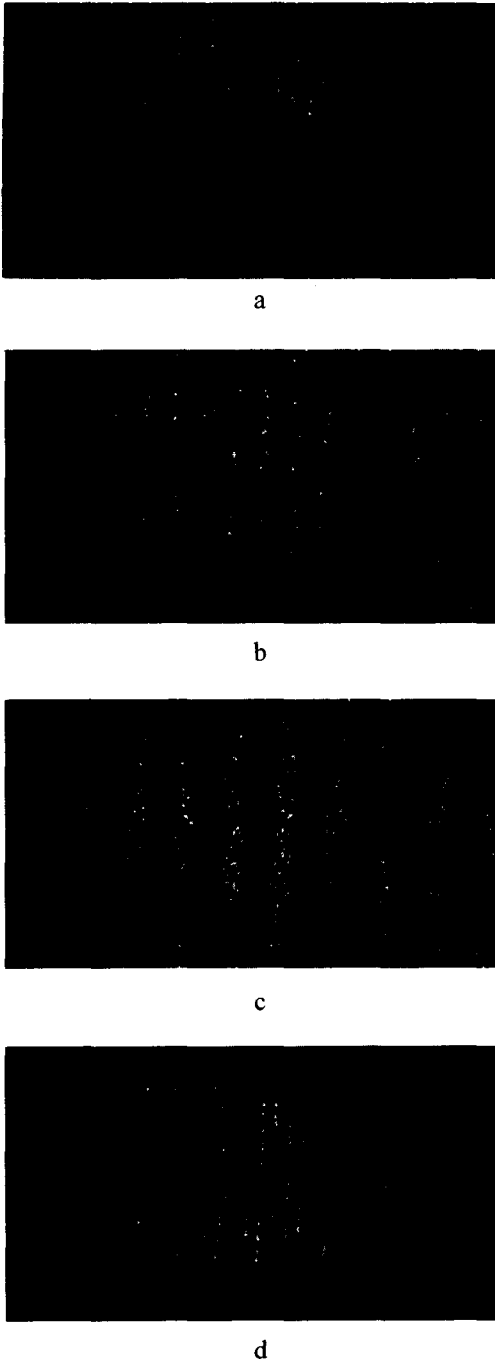


Fig. 4 X-ray Moire Fringes : a : 1 g, b ; 2 g, c ; 3 g weights applied to the torque arm of the interferometer crystal, d : phase shifting plate inserted and torque applied

급체계를 유지할 수 있다. 이 방법은 간섭무늬를 계수하는 것 보다 빠른 측정을 가능케 한다. 다른 하나는 측정력이 크거나 진동의 차폐가 어려운 센서를 포함하는 구조에 적용하기 좋은 방법이다. 일체식 간섭계 결정에 다자유도 정밀 이송기구를 부착시키고, 이 종속장치의 이송운동을 적당한 근접센서로 제어하며 상대적인 위치를 유지하도록 기구학적인 제한을 가해주는 것이다. 일체식 간섭계 결정과 종속장치 사이에 일정한 거리를 유지하도록 null 서보를 구성하는 것인데 작은 영역에서 매우 잘 고정될 수 있다. 근접센서를 사용하면 마이크로미터 정도의 거리에서 0.1 nm 정도로 고정시킬 수 있다. STM은 높은 분해능을 가지고 있으나 거리가 훨씬 짧다. 종속장치가 일체식 간섭계 결정보다 큰 구동력을 가지고 있으므로 엑스선 차폐물 바깥에 큰 기준면을 설정하여 옹스트롬 이하의 격자 움직임을 따라 제어할 수 있다.

나노미터 이하의 영역에서 기구학적인 특성 실험이 진행되고 있고 소급성을 유지하는 방법이 연구되고 있다. 이미 모든 원리적인 기술이 알려져 있기 때문에 설계를 잘 하고 몇 가지 세부사항에 주의를 기울여 문제를 해결한다면 머지 않아 작은 측정실에서 이용 가능한 엑스선 교정 장치의 등장도 예상된다.