

다중모세관다발 경 X-선 광학소자 설계 및 제조

Fabrication of polycapillary optics for hard X-ray

방준호, 권택용, 이승재, 박성민, 신진욱, 최재호

단국대학교 전자물리학과, 포토닉스실험실

choi@dku.edu

Abstract: Polycapillary optics are fabricated for hard X-ray waveguide. The calculation of propagation conditions in polycapillary are conducted to obtain the focal length and spot size as well as the demension of the polycapillary optic devices. X-ray energy of 8 KeV is propagated in the polycapillary optics which the exit diameter of 2.3 mm. and 17 mm in length.

서론

Kumahov에 의해 1986년 제안된 모세관 다발은 외부전반사에 의해 모세관 내에서 X-선 도파가 가능함을 보였다.⁽¹⁾ X-선 모세관 광학계는 다층거울, zone plate나 위상 격자와 같은 광학계와 비교하여 도파효율이 높고 경X-선의 넓은 파장영역에서 이용이 가능하여 X-선 리소그래프, 의학용 영상, 결정학, 그리고 X-선 망원경은 천문학 분야에 응용되고 있고 새로운 나노계측분야의 응용을 위한 연구가 이루어지고 있다. 모세관 다발 광학계를 이용한 영상 획득은 산란을 상쇄시켜주는 모세관 다발의 성질로 인하여 X-선 영상의 분해능을 향상시키는 결과를 얻었다. 모세관 다발을 X-선원에 정렬시키면 Compton 산란에 의해 큰 산란각을 갖는 X-선을 제외하고 상대적으로 모세관다발과 평행한 중심 X-선 만이 도파하게 된다. X-선 영상 형상에 중심 X-선 만이 관여하게 되어 향상된 상을 얻게 된다. 이렇게 향상된 X-선 현미경은 나노미터의 분해능을 갖게 된다.⁽²⁾ X-선 현미경의 이론적 분해능은 20-30 nm로 고분해능이라는 장점뿐만 아니라 생체시편의 고분해능 영상획득이 가능하며 나노소자 공정시 연속적인 측정이 가능하다는 점에서 X-선 현미경 연구개발이 필요하다. 본 연구는 경 X-선 polycapillary 광학소자의 설계 및 소자 제조의 기초연구로 광자결정 광섬유 구조와 동일한 형태를 가진 X-선 도파를 실현하였다.

Polycapillary에서의 도파 및 실험

X-선 빔이 물체의 면에서 반사되는 조건은 $\theta_c(mrad) \approx \frac{30}{keV}$ 을 만족해야 한다. 이 조건은 에너지가 큰 X-선 빔일수록 임계각이 매우 작아지고 그러므로 capillary 내경을 작게하여 입사각을 제한하는 방법으로 polycapillary 광학소자를 제조해야 한다. X-선관으로부터 방사되는 X-선 광자를 최대한 영상획득에 기여하기 위하여 또는 집속빔을 얻기 위하여 곡률을 가진 광학소자를 제조하여야 한다. 그러므로 polycapillary 광학소자를 설계하기 위해서 X-선 광학소자 채널의 곡률과 임계각의 관계로부터 광학소자의 초점거리, 초점크기 및 소자의 크기를 계산할 수 있다. 굽힘곡률 반경과 임계각의 관계, $\frac{R\theta_c^2}{2d} > 1$ 로부터 도파허용 최대 굽힘반경을 구할 수 있고 표1은 polycapillary 광학소자의 전산모사시 사용한 도식과 개개의 capillary 내경이 100 nm인 조건에서 각각의 X-선 에너지에 따른 임계각과 전파조건을 만족하는 최대 굽힘반경의 계산결과를 요약하였다. 고에너지 X-선에서 임계각이 더욱 작아지며 도파가능 반경은 커짐을 알 수 있다. 이는 X-선 에너지가 높을수록 곡률반경이 큰 polycapillary 광학소자가 요구됨을 알 수 있다. Polycapillary 광학소자에서의 도파허용 최대 굽힘반경으로부터 X-선 빔의 spot size와 초점거리가 결정된다. 광학소자의 초점거리에서의 초점크기(s)와 초점거리(f)는

$$s = c + f \tan(\theta_c) \quad (1)$$

$$f = \frac{dL}{2(D-d)} \quad (2)$$

으로 주어지고, 여기서 s 는 spot size, c 는 capillary ID at outlet 그리고 f 는 focal length다. 그림 1은 capillary 내경에 따른 초점거리에서의 spot size와 초점거리 및 PCO 소자 길이를 보이고 있다. 그림 2는 초점거리에서의 초점의 크기를 polycapillary 채널 크기에 따라 계산된 값이고 그림 3은 소자의 길이 및 직경을 채널의 크기에 따라 계산한 값이다.

X-ray energy (keV)	8	20	40	50
θ_c (mrad)	3.75	1.5	0.75	0.6
R (m)	0.014	0.089	0.355	0.555

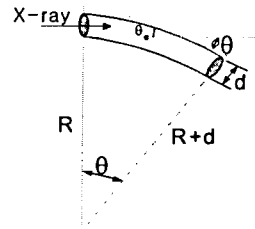


Table 1. Size of capillary, criticle angle and curvature of radius for the device.

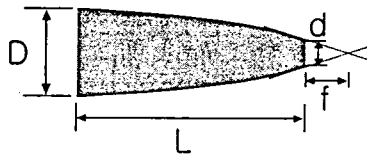


Fig. 1 Dimension polycapillary optic device.

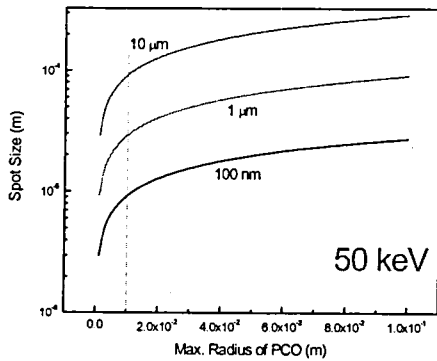


Fig. 2. Polycapillary radius vs. spot size at the focal point.

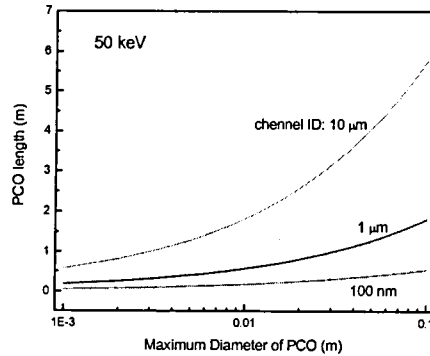


Fig. 3 Polycapillary optics length and diameters

제조된 Polycapillary optic 소자는 X-선 입력단의 직경이 4.8 mm이며 출력단의 단면적은 2.3 mm이며 길이는 17 mm로 내부에는 127개의 채널이 육각형구조로 소자를 형성하고 있다. Cu 타겟으로부터 방사되는 8 keV X-선빔을 이용하여 실험하였다.

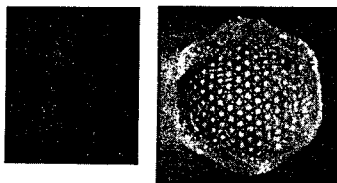


Fig. 4 X-ray beam spot and a cross-section of polycapillary optics

Reference

[1] M.A. Kumakhov, "Radiation of channeling particles", Energoatomizdat, Moscow, (1986)
 [2] D.H. Bilderback, S.A. Hoffman and D.J. Thiel, Science, 263, 201 (1994)