

주기적인 구조를 갖는 X-선 반사경 설계

X-ray Reflection Mirror of the Periodic Multilayer Structure

권택용⁺, 정진우, 신진욱, 최재호
 단국대학교 전자물리학과 포토닉스연구소

Abstract

The periodic multilayer is considered as the X-ray reflection mirror. High X-ray reflectivity from the incident angle greater than the grazing critical angle can be obtained by the periodic multilayer structure. The Optical constants are investigated in order to determine the material for X-ray reflection mirror. The X-ray reflection mirror is designed for W, Si using computer simulation. The reflectivity is calculated for various incident angles and ratio of thickness.

X-ray 영역에서 분산(deviation)계수 δ 는 약 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 값을 갖는다.[1] 그에 따라, 의미 있는 전반사 현상은 수[mrad]이하에서만 일어나게 된다. 하지만, 임계각 이상에서의 극히 미약한 반사율들도 multilayer 구조를 이용하여 보강 간섭을 일으킨다면, 이 각에서도 큰 반사율을 얻어낼 수 있다. 이러한 조건을 갖추어 만들어진 multilayer 반사경은 diversion source 에 대해 높은 효율의 반사율을 제공할 것이다. 이에 본 논문은 X-ray 반사경에 대한 설계와 함께 이상적인 두께 결정에 대한 내용을 다루었다.

광학상수 결정

물질의 복소 굴절률은 다음과 같다.

$$\mathbf{n} = \mathbf{1} - \delta - i\beta \quad (1)$$

여기서, 실수 인자 δ 는 분산(deviation)과 허수 인자 β 는 흡수(absorption)와 관련되어 있다. 이러한 인자들은 atomic scattering factors (f_1, f_2)를 통해 얻어낼 수 있다.

$$\delta = \frac{\rho r_e \lambda^2 N_A}{2\pi A} f_1 \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\rho r_e \lambda^2 N_A}{2\pi A} f_2 \quad (3)$$

여기서, ρ 는 밀도, A 는 원자중량, r_e 는 고전적인 전자반경, λ 는 파장, N_A 는 아보가드로수이다. Fig.1.은 λ 가 1.54Å 일 때, X-ray 에서 여러 물질들의 광학상수들을 보여준다. 계산에 쓰인 atomic scattering factors 는 B.L. Henke 의

model 을 사용하였다.[2]

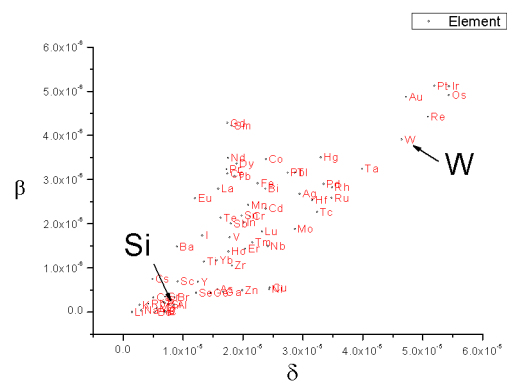


Fig. 1. Optical constants of elements for X-ray energy of 8.04 [keV]

이는 X-ray 반사경 설계 시 물질 선택의 기준을 제공 한다.

X-ray 반사율

일반적인 Fresnel 방정식은 X-ray 영역에서도 동일한 방식으로 구할 수 있다. 하지만, X-ray 영역에서 물질의 흡수는 더 이상 무시할 수 없는 요소가 된다. 따라서, X-ray 에 대한 Fresnel 방정식의 유도는 복소 굴절률이 사용된다. 이상적인 경계면에 대한 Fresnel 방정식은 다음과 같다.

$$r_j^s = \frac{n_j \cdot \sin \theta_j - n_{j+1} \cdot \sin \theta_{j+1}}{n_j \cdot \sin \theta_j + n_{j+1} \cdot \sin \theta_{j+1}} \quad (4)$$

$$r_j^p = \frac{n_j \cdot \sin \theta_{j+1} - n_j \cdot \sin \theta_j}{n_j \cdot \sin_{j+1} + n_{j+1} \cdot \sin \theta_j} \quad (5)$$

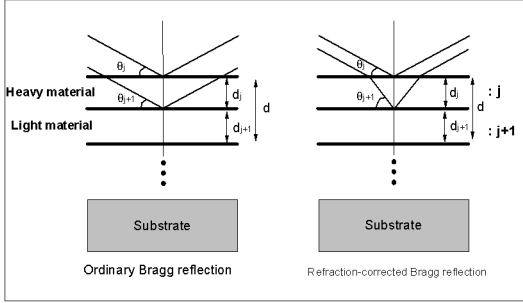


Fig. 2. Diagram of the multilayers structure.

여기서, θ_j 는 복소 굴절각으로 Snell 의 법칙에 의해 정의된다.

$$\sin \theta_j = \frac{(n_j^2 - \cos^2 \theta)^{1/2}}{n_j} \quad (6)$$

여기서, λ 가 1.54Å 일 때, $\beta \ll \delta \ll 1$ 이고 $\sqrt{2\delta} < \theta \ll 1$ 이므로, Fresnel reflection coefficients 는 s 파, p 파에 대해 모두 다음과 같은 값을 갖게 된다.

$$r_j = \frac{2(\delta_j - \delta_{j+1})}{4\sin^2 \theta} \quad (7)$$

Multilayer 에 대한 전체적인 반사계수는 이러한 단일 경계면에 대한 반사계수식의 반복적인 적용 (recursive method)에 의해 구해진다.[3]

$$x_j = \frac{r_j + x_{j+1} \cdot \exp(-i2\phi_j)}{1 + r_j \cdot x_{j+1} \cdot \exp(-i2\phi_j)} \quad (8)$$

여기서, $\phi_j = \frac{2\pi}{\lambda} d_j n_j \sin \theta_j$ 이다.

X-ray 반사경 설계

X-ray 반사경에서 설계의 기본개념은 Bragg 법칙을 이용한다.

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad (9)$$

Bragg 반사는 임계각 이상의 입사각에 대해 극도로 미약한 반사들을 보장 간섭시킨다. 따라서, 설계는 반사경로에 대해 bi-layer 가 위상차 2π 를 갖도록 이루어진다. Bragg 방정식에 대해 Fig.2.와 같이 굴절을 고려하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다. [4]

$$m\lambda = 2d \sin \theta \left[1 - \frac{2(\Gamma_h \delta_h + (1-\Gamma)\delta_l)}{\sin^2 \theta} \right]^{1/2} \quad (9)$$

여기서, Γ 는 두께 비로 $\Gamma \equiv \frac{d_h}{d} = \frac{d_h}{d_h + d_l}$ 이다.

식(9)는 원하는 에너지와 각도에서 Γ 에 따른 bi-layer 의 두께를 제공한다.

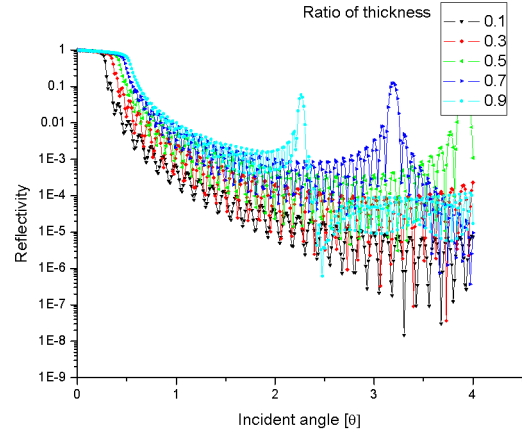


Fig. 3. Calculated reflectivities versus incident angle for different ratio of thickness.

결론

본 논문에서는 주기적인 구조를 갖는 X-ray 반사경의 설계조건과, 물질선택의 기준이 되는 광학상수를 결정하였다. 또한, 전산모사를 이용하여 제시된 설계조건에 따른 multilayer 의 반사율을 예측하였다. X-ray 에너지와 입사각은 각각 8.04[KeV]와 10[mrad]으로 고정하고 Γ 만을 변화하여 설계된 X-ray 반사경의 반사율은 Fig.3. 과 같다.

References

- [1]Krassimir Stove and Kenji Sakurai, "Recent theoretical models in grazing incidence x-ray reflectometry", The Rigaku Journal, Vol. 14, No. 2, pp.22-37, (1997)
- [2]B.L. Henke, E.M. Gullikson, and J.C. Davis. X-ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at E=50-30000 eV, Z=1-92, Atomic Data and Nuclear Data Tables Vol. 54 (no.2), 181-342 (July 1993).
- [3]K. D. Joensen, P. Voutov, A. Szentgyorgyi, J. Roll, P. Gorenstein, P. Hoghoj, "Design of grazing- incidence multilayer super mirrors for hard-x-ray reflectors," Appl. Opt. 34, 7935- (1995).
- [4]A. G. Michette and Z. Wang, "Optimisation of depth-graded multilayer coatings for broadband reflectivity in the soft X-ray and EUV regions," Opt. Commun. 177, 47-55 (2000).