

엑스선 반사와 필름의 평균 전자 밀도 분포

한상욱*

전북대학교 과학교육연구소, 전북대학교 융합과학연구소, 전북대학교 사범대학 과학교육학부 물리교육전공, 전주 54896

X-ray Reflectivity and Electron Density of Films

Sang-Wook Han*

Institute of Science Education, Institute of Fusion Science, and Division of Science Education, Department of Physics Education, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

초 록: 파동이 매끄러운 경계면을 만나면 반사가 일어난다. 입사각을 변화시키면서 측정한 엑스선이나 중성자 반사를 이용하면, 필름의 깊이에 따른 흐트림 알갱이 (전자 또는 원자핵)의 평균 밀도, 필름의 평균 두께, 표면의 평균 거칠기 등을 정량적으로 결정할 수 있다. 엑스선이나 중성자에 대한 진공의 굴절률은 1이며, 물질의 굴절률은 1보다 작다. 엑스선이나 중성자가 공기에서 물질로 들어가는 경우, 경계면과 빔이 이루는 입사각이 작으면 전반사가 일어난다. 전반사가 일어나는 임계각은 필름의 흐트림 알갱이 밀도에 의하여 결정되며, 반사 측정을 통하여 필름의 깊이에 따른 흐트림 알갱이의 평균 분포를 결정할 수 있다.

중심어: 반사, 엑스선, 필름, 경계면, 전자 밀도

Abstract: Smooth surfaces reflect waves, including X-rays and neutrons. By measuring the reflectivities of these waves, it is possible to quantitatively determine the mean thickness, mean densities of scattering sources (such as electrons and atomic nuclei), and mean surface roughness of films. The refractive indices of X-rays and neutrons differ for vacuum and matter, with the former being one and the latter being less than one. Consequently, when X-rays and neutrons transition from air to a film, they undergo perfect reflection by the film surface if the incident angle between the beam and film surface is below a critical angle. This critical angle is influenced by the mean density of the scattering sources within the film. By quantitatively analyzing reflectivity as a function of the incident angle, it is possible to ascertain the mean density of scattering sources throughout the depth of the film.

Keywords: Reflectivity, X-ray, Film, Interface, Electron Density

1. 서 론

전자기파나 전자, 양성자, 중성자 등의 빔줄기가

운동량과 에너지를 가지고 직진하다가 매질이 다른 경계면을 만나면 반사와 굴절이 발생한다. 빔이 매질이 다른 경계면에서 입사하는 각도와 같은 각도로

*Corresponding Author: Sang-Wook Han
Phone: +82-63-270-2775
Email: shan@jbnu.ac.kr



All the content in Journal of Science & Science Education(JSSE) is Open Access, meaning it is accessible online to everyone, without fee and authors' permission. All JSSE content is published and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Under this license, the authors retain full ownership of their work, while permitting anyone to use, distribute, and reproduce the content in any medium, as long as the original authors and source are cited. For any reuse, redistribution, or reproduction of a work, users must clarify the license terms under which the work was produced.

튀겨 나가는 것을 거울 반사(specular reflectivity) 라고 하며, 거울반사 빛의 세기는 빛의 입사각도와 매질의 전자밀도에 크게 영향을 받는다. 그림 1은 매끈한 물체의 표면에서 일어나는 거울반사를 나타낸 개념도이다. 입사하는 빛의 진동수가 ν 이고 파장이 λ 라면, 빛의 에너지 $E = h\nu$ 이고, 운동량 $p = h/\lambda$ 이다. 여기서 h 는 플랑크 상수이다. 빛의 운동량 $\vec{p} = \frac{h}{\lambda}\hat{p} = \hbar\vec{k}$ 로 나타낼 수 있는데, 여기서 $\hbar = h/2\pi$ 이고, $k = 2\pi/\lambda$ 로 파수이다. 그림 1이 보여주는 것과 같이 입사하는 빛의 파수 벡터 \vec{k} 는 x-성분과 z-성분으로 나눌 수 있으며, 입사하는 각도의 함수로 표현할 수 있다.

$$\vec{k} = k_x\hat{x} + k_z\hat{z} = k\cos\theta\hat{x} + k\sin\theta\hat{z} = \frac{2\pi}{\lambda}\cos\theta\hat{x} + \frac{2\pi}{\lambda}\sin\theta\hat{z} \quad (1)$$

그림 1이 보여주는 것과 같이 빛이 물체의 표면에서 거울 반사될 때, 운동량의 x-성분은 반사 전과 후에 변화가 없으며 z-성분만 변화가 생긴다. 반사로 인한 빛의 운동량의 변화량은 $\hbar\Delta k = 2\hbar k_z = \hbar \frac{4\pi}{\lambda}\sin\theta$ 이다. 이 운동량의 변화량 중 파수 벡터의 변화량을 q_z 로 표현한다.

$$2k_z = \frac{4\pi}{\lambda}\sin\theta = q_z \quad (2)$$

여기서 q_z 는 각도 θ 또는 입사 엑스선의 파장 λ 의 함수로, θ 또는 λ 를 변화시켜 반사되는 빛의 운동량의 변화량을 조절할 수 있다. 운동량의 변화에 따른 반사 세기의 변화를 입사하는 빔의 파장을 고정하고 입사각을 변화시키며 측정하거나, 입사각을 고정하고 입사 빔의 파장 즉 에너지를 변화시키며 측정한다 [14].

엑스선이나 중성자 빔의 굴절률은 다음과 같이 기술된다.

$$n = \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{\pi}Nb} \quad (3)$$

여기서 λ 는 입사하는 빔의 파장이고, N 은 호트림 (산란) 알갱이 밀도, b 는 호트림 세기이다. 굴절률은 입사하는 파의 파장과 물질 내 산란 알갱이의 밀도와 세기, 즉 물질 내 원자의 밀도와 물질을 구성하는 원소들에 의하여 결정된다. 진공에서 Nb 는 영이므로 굴절률 $n = 1$ 이며, 물질의 Nb 는 영보다 크므로 굴절

률 n 은 항상 영보다 작다. 엑스선이 진공에서 입사하여 물체 표면에서 거울 반사될 때, 진공의 굴절률이 물체의 굴절률보다 크므로, 엑스선은 임계각보다 작은 각도에서는 전반사되다가 임계각보다 큰 각도에서 일부는 반사되고 일부는 투과된다는 것을 알 수 있다. 임계각에서 파수 벡터의 변화량은 $\frac{4\pi}{\lambda}\sin\theta_c = Q_c = 2k_{zc}$ 이다. 임계각은 물질의 특성과 연관성이 있으며, 임계각에서 파수의 변화량 Q_c 는 다음과 같이 정의된다.

$$Q_c = \sqrt{16\pi\frac{N}{V}b} \quad (4)$$

여기서 N 은 원자수이고, V 는 부피이며 N/V 는 원자 밀도이다. b 는 원자 호트림 세기와 흡수 세기이며 원자번호에 의존한다. Q_c 는 실수와 허수 부분으로 나눌 수 있으며, 다음과 같이 표현된다.

$$Re(Q_c) = \sqrt{16\pi r_c \frac{N}{V}(Z+f)}, Im(Q_c) = \sqrt{16\pi r_c \frac{N}{V}f''} \quad (5)$$

여기서 r_c 는 전자의 고전적인 반경으로 $r_c = \frac{e^2}{m_e c^2} \approx 2.818$

$\times 10^{-5} \text{ \AA}$, f' 은 입사각이 0에 가까울 때는 가벼운 원소의 경우 거의 영이지만 무거운 원소의 경우 무시할 수 없는 값이 될 수도 있다. f'' 은 물질의 특성과 입사각에 의존하는 흡수량에 의하여 결정된다. 물질에 입사하는 입사각을 바꾸면서 반사를 측정하여 물질의 임계각을 결정하면, 그 물질의 원자 밀도를 알아낼 수 있다[14].

엑스선의 반사를 그림 1의 (b)에서 보여주는 것과 같이 1차원 계단 양자 포텐셜에서 반사되는 파동으로도 설명이 가능하다. 여기서 U_0 는 빛이 물질로부터 느끼는 양자 포텐셜 에너지이다. 양자 포텐셜은 Q_c 에 의하여 결정되고 Q_c 는 물질의 원자 밀도에 의하여 결정된다. 경계면에서 입사하는 빔의 파동이 연속이 되기 위해서는 경계면 안쪽과 바깥쪽에서 두 파동의 값이 같아야 하며, 두 파동의 미분값 또한 같아야 한다. 이를 이용하여 반사율을 다음과 같이 입사하는 파동의 파수 k 의 함수로 계산할 수 있다.

$$R = \left(\frac{k_z - k'_z}{k_z + k'_z} \right)^2 \quad (6)$$

여기서 k_z 와 k'_z 는 각각 공기 중과 물질 내에서 파수 중 z-방향 성분이다. 즉

$$R = \left(\frac{k \sin \theta - k' \sin \theta'}{k \sin \theta + k' \sin \theta'} \right)^2 \quad (7)$$

반사율 R 은 반사되는 동안에 변화된 운동량에 의존하므로 운동량의 변화량 즉 파수의 변화량은 식 (2)에서와 같이 $2k_z = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \theta = 2k \sin \theta$ 로 나타낼 수 있으며, 입사각 θ 와 입사파의 파장 λ 의 함수로 나타낼 수 있다. 입사파의 파장 λ 가 일정할 경우, 입사각이 임계각 이하이면 엑스선 또는 중성자 빔은 투과 없이 전 반사되고, 입사각이 임계각보다 크면, 반사와 굴절이 동시에 일어난다. 임계각보다 큰 각도로 엑스선 또는 중성자 빔이 입사하면 일부 입사 빔은 경계면을 지나서 물질 내로 들어가게 되는데, 이때 물질 내에서 입사 빔의 운동 에너지 E 는 양자 포텐셜 에너지로 인하여 진공에서의 운동 에너지 E_0 보다 작게 된다. 입사 빔이

엑스선이라면, $E' = E - U_0 = \frac{(\hbar k)^2}{2m_e} - \frac{\hbar^2 Q_c^2}{2m_e} = \frac{(\hbar k')^2}{2m_e}$ 이며, 물질 내에서 파수 k' 은 입사하는 엑스선의 에너지와 양자 포텐셜 에너지를 이용하여 구할 수 있다. 즉 $k' = \sqrt{k^2 - Q_c^2}$ 이다. 입사빔이 중성자이면 위 식에서 전자의 질량을 중성자의 질량으로 바꾸면 된다. 물질 내로 들어간 빔은 반대편 경계면에서 반사와 투과가 일어나며, 이때 반사된 빔은 다시 물질 내를 통과한 후 입사한 경계면에서 반사와 투과가 일어난다. 이때 입사한 경계면에서 투과된 빔은 그 경계면에서 반사된 빔과 보강 및 상쇄 간섭을 한다. 경계면에서 반사된 빔과 반대편 경계면에서 반사되어 돌아온 빔의 보

강과 상쇄 간섭은 물질 내에 들어갔던 빔의 경로와 세기에 의존하며, 빔의 경로는 양자 포텐셜의 두께의 2배인 $2t$ 와 입사각에 의하여 결정된다. 이것은 엑스선이나 중성자 빔의 반사를 측정하여 분석하면, 양자 포텐셜의 두께 즉 필름의 평균 두께를 정량적으로 결정할 수 있음을 의미하는 것이다.

II. 본 론

2.1. 단일 경계면으로부터의 엑스선 반사

서론에서 알아본 바와 같이 엑스선의 반사를 입사각의 함수로 측정하면, 물질의 양자 포텐셜 즉 물질의 원자 밀도를 결정할 수 있다. 실리콘 결정체는 정육면체의 다이아몬드 구조를 하고 있으며, 살창 계수 (Lattice constant)가 5.43 \AA 이다. 다이아몬드의 원자 밀도는 $8/(5.43 \text{ \AA})^3 \approx 0.0499678$ 원자/ \AA^3 이다. 그림 2(a)는 다이아몬드 구조를 갖는 실리콘 결정체의 Q_c^2 을 실리콘 표면으로부터 깊이의 함수로 계산한 것이다. 일반적으로 물질의 표면에는 표면 거칠기가 존재하며 표면 거칠기는 가우스 함수형으로 분포한다. 즉 공기와 물질의 경계면을 중심으로 공기 쪽으로 갈수록 물질이 가우스 함수적으로 줄어들고, 물질 쪽으로 갈수록 가우스 함수적으로 물질이 채워진다는 의미이다. 이를 적용하여 양자 퍼텐셜로 표현하면 그림 2의 (a)의 빨간 선과 같은 Q_c^2 분포를 얻을 수 있다. 파장이 1.5406 \AA 인 엑스선이 표면 거칠기가 전혀 없는 실리콘 표면으로부터 반사될 경우, 반사율을 계산한 결과를 그림 2(b)에 나타내었다. 입사하는 각도 θ 가 대략 0.2도 보다 작을 때는 엑스선이 실리콘 표

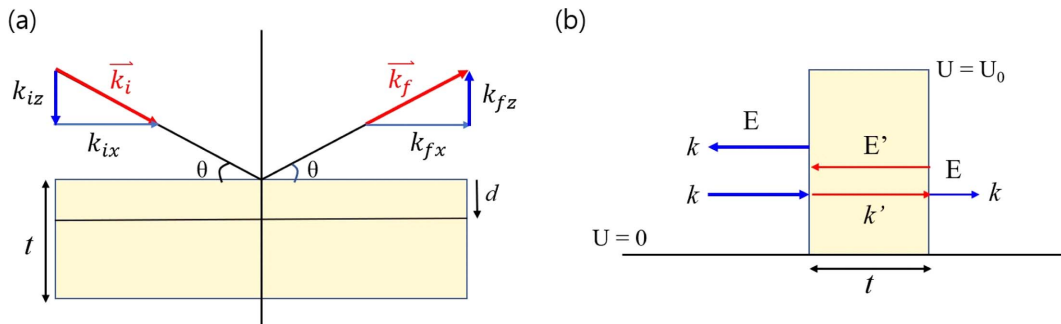


그림 1. (a) 물체 표면에서 반사되는 거울반사 개념도. (b) 양자 계단 포텐셜을 이용한 거울반사 개념도

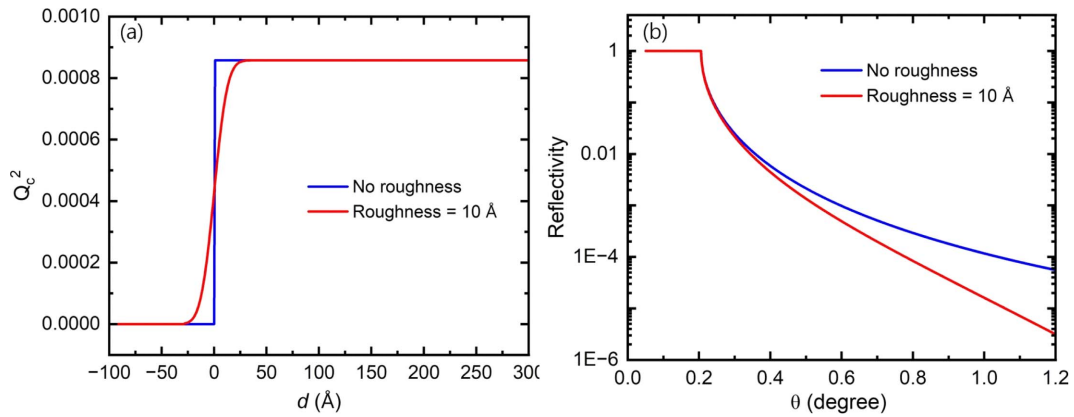


그림 2. (a) 표면 거칠기가 영과 10 Å인 Si의 양자 계단 포텐셜. (b) 입사각의 함수로 계산한 표면 거칠기가 영과 10 Å인 Si 표면에서의 엑스선 반사율

면으로부터 전반사가 일어나며, 그보다 큰 각도에서는 투과로 인하여 엑스선의 반사 세기가 급격하게 줄어들며, 입사각이 1.2도가 되면 반사율은 입사빔의 세기와 비교할 때 10,000분의 1 이하로 감소하는 것을 알 수 있다. 엑스선의 반사율을 나타낸 y -축은 로그 값이다. 일반적인 물체의 표면에는 표면 거칠기가 존재하며, 표면 거칠기는 반사율에 상당한 영향을 미친다. 1980대 말에 S. K. Sinha는 물체 표면의 거칠기가 가우스 함수일 경우, 반사율의 세기도 가우스 함수로 줄어든다는 것을 이론 계산과 실험을 통하여 보여주었다[5].

$$R = R_0 e^{-\sigma^2 q_z^2} \quad (8)$$

여기서 R_0 는 표면 거칠기가 없는 경우의 반사율이고, σ 는 표면 거칠기이다. 실리콘 표면의 거칠기가 10 Å인 경우에 대하여 엑스선 반사율을 계산한 결과를 그림 2(b)에 빨간 선으로 나타내었다. 그림 2(b)에서 볼 수 있는 것처럼, 표면 거칠기는 임계각에는 거의 영향을 미치지 않고, 입사각이 커질수록 반사율에 미치는 영향이 더욱 커진다는 것을 확인할 수 있다. 즉 물체 표면의 거칠기를 정량적으로 확인하려면, 엑스선 반사를 큰 입사각까지 측정해야 한다는 의미이다.

2.2. 다중 경계면으로부터의 엑스선 반사

다중 경계면을 가진 구조체에서 반사되는 파동은

각 경계면에서 연속 방정식을 만족해야 한다. 다중 경계면을 가진 구조체로는 유리창이나 물 위의 기름 층 그리고 여러 겹으로 증착된 필름을 예로 들 수 있다. 그림 3은 실리콘 기판 위에 100 Å 두께의 CoO를 증착한 경우를 예로 든 것이다. 소금(NaCl)과 같은 구조를 갖는 CoO의 $Re(Q_c^2)$ 는 식 (5)를 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} Re(Q_c^2) &= 16\pi \times r_c \times \frac{1}{V} (Nb_{Co} + Nb_O) \\ &= 16\pi \times 2.818 \times 10^{-5} \times \frac{1}{4.26^3 \text{Å}^3} [4(27 - 2.2) + 4(8)] \\ &\approx 2.4 \times 10^{-3} \text{Å}^{-3} \end{aligned} \quad (9)$$

그림 3은 식 (9)의 결과를 이용하여 CoO 표면으로부터 깊이에 따른 CoO의 $Re(Q_c^2)$ 를 계산한 결과이다. 두 경계면으로부터 반사되는 엑스선의 경우 공기와 접한 CoO 표면에서 입사하는 파와 투과하는 파 간에 연속 조건이 성립해야 하며, CoO 필름을 투과한 파는 CoO와 Si 경계면에서 일부는 반사되고 나머지는 Si 기판 안으로 투과되므로 그 경계면에서도 연속 조건이 성립해야 한다. 두 경계면에 표면 거칠기가 없다고 가정하고 연속방정식을 풀어서 반사율을 입사각 θ 의 함수로 계산하면, 그림 3(b)의 검은색 실선과 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림 2(b)와 그림 3(b)를 비교해 보면, 반사율의 경향이 상당히 다른 것을 확인할 수 있다. 먼저 임계각의 경우 CoO의 전자

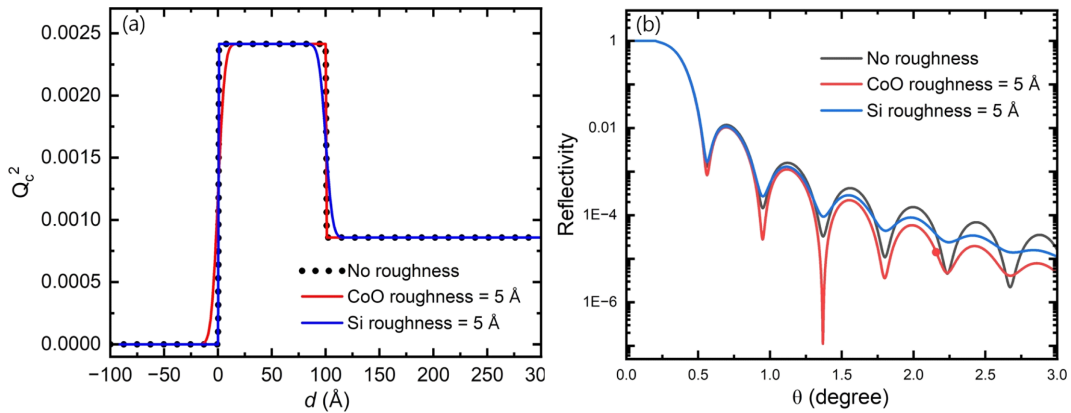


그림 3. (a) Si 기판 위에 100 Å 두께의 CoO 박막이 증착된 경우의 이중 계단 포텐셜. (b)는 (a)의 계단 포텐셜에 대한 엑스선 반사율을 이론적으로 계산한 것임. 검은 점선, 빨강 실선, 푸른 실선은 각각 표면 거칠기 영, CoO 필름 표면 거칠기 5 Å, Si 기판 표면 거칠기 5 Å 경우에 대하여 계산한 반사율임

밀도가 Si보다 크기 때문에 그림 3(b)의 임계각이 그림 2(b)보다 큰 것을 확인할 수 있다. 만약 Si 필름이 CoO 층 위에 있다면 (Si/CoO) 두 개의 임계각을 확인할 수 있다. 즉 입사각이 Si 필름의 임계각보다 크면, Si 필름을 투과할 수 있지만, 그 각이 CoO의 임계각보다 작다면, Si와 CoO 경계면에서 전반사가 일어난다. 입사각이 CoO 임계각보다 커지면, 비로소 엑스선이 Si/CoO 경계면을 투과할 수 있게 되므로, 엑스선 반사는 두 개의 임계각 즉 공기/Si 임계각과 Si/CoO 임계각을 보여줄 것이다. 만약 CoO 층이 Si 기판 위에 있다면, CoO 임계각보다 작은 입사각에서 엑스선은 전반사되고 그 임계각보다 큰 각에서 일부 엑스선은 CoO 층을 통과하여 CoO/Si 경계면을 만나게 된다. 그런데 공기/CoO 경계면의 임계각이 Si의 임계각보다 큰 각이므로 CoO/Si 경계면에서는 전반사되는 각도 없이 투과 현상이 일어난다. 즉 공기/CoO 경계면에서 발생한 한 개의 임계각만 관찰되는 것이다. 그림 3(b)의 임계각은 CoO의 임계각에 의하여 결정된 것이다. 입사각이 CoO 임계각보다 큰 엑스선은 100 Å 두께의 CoO 필름을 투과한 후 Si 기판의 표면을 만나고, 그 표면에서 반사와 투과가 일어난다. 그림 1(b)에서 보여준 것과 같이 Si 필름 표면에서 반사된 엑스선은 다시 CoO 필름 속을 지나서 공기/CoO 경계면에 도달하게 되는데, 이때 공기/CoO 경계면에서 반사되는 엑스선과 보강-상쇄 간섭을 하게 된다. 그로 인하여 그림 3(b)에서 볼 수 있는

것과 같은 반사율의 변화가 관찰된다. 두 파동의 간섭은 CoO 필름 속을 지나온 엑스선의 경로 거리에 의하여 결정되며, 엑스선의 경로 거리는 입사한 각도에 따라 달라지므로, 입사한 각도에 따라 보강과 상쇄 간섭이 반복되는 것이다. 상쇄 간섭이 강한 각도에서는 반사율이 급격하게 줄어드는 것이 관찰된다. 반사율이 두 경계면으로부터 반사된 파동의 보강과 상쇄 간섭으로 인하여 만들어짐으로 이런 현상은 한 개의 경계면을 가진 표면의 반사에서는 관측되지 않는다.

두 개의 경계면이 있는 경우 각 경계면에 존재하는 표면 거칠기가 반사율에 미치는 영향을 확인하기 위하여 두 가지의 다른 조건으로 반사율을 계산해 보았다. 먼저 CoO 필름 표면에 5 Å의 표면 거칠기가 있고 Si 표면에는 표면 거칠기가 없는 경우이다. 이 경우 1차원 양자 포텐셜은 그림 3(a)의 빨간색 실선과 같은 분포를 하며, 계산된 반사율은 그림 3(b)의 빨간색 실선과 같다. 먼저 CoO 표면에 표면 거칠기가 있어도 임계각과 반사율이 요동치는 주기는 표면 거칠기가 없는 경우와 거의 같다는 것을 알 수 있다. 즉 엑스선의 입사각에 따라 보강-상쇄 간섭하는 주기는 표면 거칠기와 무관하게 CoO 필름의 두께에 의하여 결정되며, 임계각은 CoO의 전자 밀도에 의하여 결정된다는 것을 알 수 있다. 따라서 엑스선 반사 측정을 통하여 표면 거칠기가 있는 필름의 전자 밀도와 두께를 정확하게 결정할 수 있음을 알 수 있다. 표면 거칠기가 있는 필름의 반사율의 세기는 표면

거칠기가 없는 경우에 비하여 입사각이 클 경우, 더욱 작아진다는 것이 관찰되었으며, 보강-상쇄 간섭에도 영향을 미쳐서 반사율의 모양이 바뀌는 것을 확인할 수 있다. 어떤 입사각에서는 표면 거칠기가 없는 경우와 비교할 때 보강-상쇄 간섭의 영향이 더욱 커진 결과를 볼 수 있다. 그림 3(b)에서 청색 선은 CoO 필름의 표면 거칠기는 영이며 Si 표면 거칠기가 5 Å 인 경우에 대하여 계산한 것이다. 이에 대응되는 양자 포텐셜은 그림 3(a)에 나타나 있다. Si 표면에 표면 거칠기가 있을 경우, 평균적인 반사율의 크기는 두 경계면 모두에서 표면 거칠기가 영인 경우와 비슷하다. 그러나 보강-상쇄 간섭의 효과는 약해진 것을 확인할 수 있다. CoO 필름의 표면에 표면 거칠기가 있는 경우에는 보강-상쇄 간섭의 효과가 커지는 반면에 Si 표면에 표면 거칠기가 있는 경우 보강-상쇄 간섭의 효과가 줄어드는 것은 공기/CoO 계면에서 반사된 엑스선의 세기와 CoO/Si 경계면에서 반사된 엑스선의 세기가 변한 결과이다. 위에서 설명한 바와 같이 경계면에 표면 거칠기가 있으면, 엑스선의 세기는 지수 함수적으로 감소한다. 작은 각도에서 공기/CoO 경계면에서 반사되는 파의 세기는 CoO 층을 지나 CoO/Si 경계면에서 반사된 파의 세기보다 강하다. CoO 표면에 표면 거칠기가 존재하면, 공기/CoO 경계면에서 반사되는 엑스선의 세기가 약해져서 CoO/Si 경계면에서 반사된 엑스선과의 상쇄 간섭

에서 그 효과가 더욱 크게 나타난다. 반면에 CoO 표면에는 표면 거칠기가 없고 Si 기판의 표면에 표면 거칠기가 있는 경우, Si 표면에서 반사되는 엑스선의 세기가 약하므로 CoO 표면에서 반사되는 엑스선과 상쇄 간섭에서 상쇄시키는 정도가 약해지기 때문에 그림 3(b)와 같이 상쇄 효과가 미약한 것이다. 그림 3은 여러 층의 필름 구조체로부터 측정된 반사율을 정량적으로 분석하면 각 층의 표면 거칠기와 두께 그리고 전자 밀도를 정확하게 알 수 있다는 것을 보여준다.

3.3. 엑스선 반사를 이용한 전자밀도 결정

그림 4는 사파이어 (Al_2O_3) 기판 위에 증착된 CoO 박막으로부터 측정된 엑스선 반사 세기이다. 일반적으로 엑스선의 반사 세기는 입사하는 엑스선의 각도가 아닌 검출기의 각도로 측정하는데, 검출기의 각도는 엑스선 입사각의 2배이다. 스퍼터링 증착법을 이용하여 CoO 필름을 사파이어 기판 위에 10분과 20분간 증착했다[6]. CoO 필름의 증착 과정과 증착 조건 등에 대해서는 이미 발표된 논문에서 자세히 설명되어 있다[6]. 사파이어 기판 위에 10분과 20분간 증착한 CoO 필름에 대한 엑스선 반사를 측정된 결과를 그림 4(a)에 나타내었다. 두 필름으로부터 측정된 반사의 보강-상쇄 주기가 상당히 다를 수 있다. 그러나 두 반사 세기가 입사각이 커짐에 따라 줄어드는 정

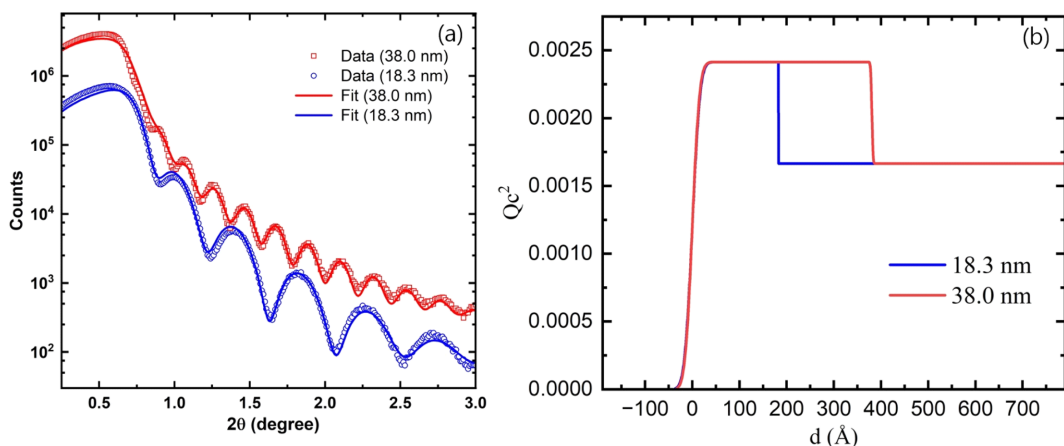


그림 4. (a) Al_2O_3 기판 위에 두께가 다른 CoO 필름으로부터 측정된 엑스선 반사 (작은 동그라미)와 맞추어보기 결과 (실선). 두 필름의 반사 차이를 분명하게 보여주기 위하여 y-축을 따라서 위치를 변화시켰음. (b)는 (a)의 엑스선 맞추어보기 결과로부터 얻은 양자 계단 포텐셜. 파란색과 빨간색은 각각 CoO 두께 183 Å과 380 Å과 일치함

표 1. 측정된 엑스선 반사 세기를 분석하여 결정된 CoO 필름의 두께와 표면 거칠기.

시료	CoO thickness (Å)	CoO roughness (Å)	Al ₂ O ₃ roughness (Å)
CoO (10 min)	182.7 ± 0.1	12.8 ± 0.1	0.0 ± 0.1
CoO (20 min)	380.4 ± 0.4	12.1 ± 0.1	2.0 ± 0.1

도는 비슷하다. 앞에서 이론적으로 살펴본 바와 같이 엑스선 반사의 보강-상쇄 주기는 필름의 두께와 관련이 있고, 엑스선 반사 세기는 표면 거칠기와 연관성이 있다. 두 필름의 두께와 표면 거칠기 그리고 전자 밀도를 정량적으로 결정하기 위하여 측정된 엑스선 반사를 엑스선 반사 이론을 이용하여 맞추어보기 (fitting)를 진행하였다. 그림 4(a)에서 실선은 엑스선 반사 이론을 이용한 맞추어보기 결과이다. 측정된 엑스선 반사 세기에 대한 맞추어보기를 통하여 CoO 박막의 표면 거칠기와 두께 그리고 사파이어 기판의 두께를 정량적으로 결정할 수 있었다. 표 1은 엑스선 반사를 정량적으로 분석한 결과이다. CoO를 10분과 20분 증착한 경우, 두 시료의 CoO 두께는 각각 182.7 ± 0.1 Å과 380.4 ± 0.4 Å이며, 두 시료의 표면 거칠기는 비슷하게 12~13 Å 정도 됨을 알 수 있다. 두 시료의 경우, 사파이어 기판의 거칠기는 비슷하게 매우 작다는 것도 확인할 수 있다. 측정된 엑스선 반사를 정량적으로 분석한 결과를 이용하여 CoO 필름의 양자 포텐셜을 거리의 함수로 구해보면 그림 4(b)와 같다. 두 CoO 필름의 표면 거칠기가 거의 같기 때문에 공기/CoO 경계면에서 전자 밀도가 거의 비슷하며, 10분 증착시킨 CoO 필름의 두께가 20분 증착시킨 필름보다 얇은 것을 확인할 수 있다. 그림 4는 다층 구조체로 제조된 필름의 엑스선 반사를 측정하고 엑스선 반사 이론을 이용하여 정량적으로 분석하면 각 필름의 표면 거칠기와 두께 그리고 전자 밀도를 매우 정확하게 결정할 수 있음을 보여준다.

IV. 결 론

엑스선 반사를 이용하면 얇은 필름의 두께와 표면 거칠기 그리고 전자 밀도 분포를 정량적으로 결정할 수 있다. 엑스선의 반사율은 진공에서 1이며, 물질 내에서 영보다 작기 때문에 엑스선이 공기에서 물체로

입사할 경우, 임계각 이하에서는 전반사가 일어나며, 임계각의 측정을 통하여 필름의 양자 포텐셜을 알 수 있고, 양자 퍼텐셜을 이용하여 필름의 전자 밀도를 계산할 수 있다. 입사각이 임계각보다 큰 경우, 엑스선은 반사와 투과를 하며 반사율은 필름의 표면 거칠기에 따라 지수 함수적으로 감소하므로 엑스선 반사율을 입사각의 함수로 측정하면 필름의 표면 거칠기를 알 수 있다. 또한 엑스선은 공기/필름, 필름/기판과 같은 모든 경계면에서 반사되며, 반사된 엑스선들의 보강-상쇄 간섭으로 인하여 반사 세기에 변화가 생기는데, 반사 세기의 변화를 분석하면 각 필름에 대한 정량적인 정보를 얻을 수 있다. 엑스선과 중성자의 반사는 다양한 종류의 필름 구조체의 물성 평가에 광범위하게 활용되고 있다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단(No. 2017K1A3A7A09016390) 지원으로 이루어졌다. 엑스선 반사는 데이터는 미국 국립 아르곤 연구소의 Center of Nanoscale Materials에서 측정되었다.

참고문헌

- [1] S.-W. Han, J. A. Pitney P. F. Miceli, M. Covington L. H. Greene, M. J. Godbole, and D. H. Lowndes, X-ray reflectivity study of thin film oxide superconductors, *Physica B*, **221**, 235 (1996).
- [2] S.-W. Han, S. Tripathy, P. F. Miceli, E. Badica, M. Covington, L. H. Greene, and M. April, X-Ray Reflectivity Study of Interdiffusion at YBa₂Cu₃O_{7-x} and Metal Interfaces, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42**, 1395 (2003).
- [3] S.-W. Han, J. F. Ankner, H. Kaiser, P. F. Miceli, E. Paraoanu, and L. H. Greene, Spin-polarized neutron reflectivity: a probe of vortices in thin film superconductors, *Phys. Rev. B*, **59**, 14692 (1999).

- [4] S.-W. Han, J. Farmer, H. Kaiser, P. F. Miceli, I. V. Roshchin, and L. H. Greene, Orientation of vortices in a superconducting thin-film: quantitative comparison of spin-polarized neutron reflectivity and Magnetization, *Phys. Rev. B*, **62**, 9784 (2000).
- [5] S. K. Sinha, E. B. Sirota, S. Garoff and H. B. Stanley, X-ray and neutron scattering from rough surfaces, *Phys. Rev. B*, **38**, 2297 (1988).
- [6] In-Hui Hwang, Liliana Stan, Cheng-Jun Sun, and Sang-Wook Han, Epitaxial Growth of Oriented CoO Films by Radio-Frequency Sputtering Deposition, *Vacuum*, **217**, 112585 (2023).