

EDS 분석과 모델링에 의한 박막두께 측정 방법에 관한 연구

윤재진¹, 이원종^{1,a}

¹ 한국과학기술원 신소재공학과

Determination of Thin Film Thickness by EDS Analysis and its Modeling

Jae-Jin Yun¹ and Won-Jong Lee^{1,a}

¹ Department of Materials Science and Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

(Received June 28, 2011; Revised July 23, 2011; Accepted July 24, 2011)

Abstract: In this study, a method to measure the thickness of thin film by EDS (energy dispersive spectroscopy) is suggested. We have developed a model which calculates the thickness of thin film from the characteristic x-ray intensity ratio of the elements in thin film and substrate by considering incident electron beam energy, x-ray generation curve, backscattering and absorption of x-ray, take-off angle of x-ray and tilt angle of the sample. We obtained the relation curve between the film thickness measured experimentally and the x-ray intensity ratio of elements. The film thicknesses calculated from the model agrees quite well with those measured experimentally. Therefore, the thin film thickness can be measured rapidly and accurately by using the model developed in this study and the x-ray intensity ratio obtained in EDS analysis.

Keywords: Thin film, Thickness, EDS, Characteristic X-ray, Model

1. 서론

금속 박막의 두께를 측정하는 대표적인 방법으로는 α -step 같은 표면 profilometer를 이용하거나 고분해능 주사전자현미경 (SEM)을 이용하는 방법이 있다. 표면 profilometer에 의한 두께 측정의 원리는 시편에 단차 (step)를 형성시켜 박막이 있는 부분과 없는 부분의 차이를 측정하는 것이다. 그러나 단차를 형성하기 어려운 경우나 기판 표면이 평평하지 않은 경우에는 측정이 어렵다는 단점이 있다. SEM을 이용한 방법은 시편을 제작한 후, 시편을 절단하여 단면을 관찰하여 두께를 측정한다. 그러나, 박막의 연성이 좋아 막 사이의 경계가 명확하지 않거나 박막의 두께가 매

우 얇을 경우 또는 박막이 형성되어 있는 기판의 표면이 매끄럽지 않을 경우에는 정확한 두께 측정이 어렵다.

최근 들어 TSV (through-Si via)를 이용한 3-D 패키징이 매우 중요해지고 있다. 이 때 일반적으로 Bosch process 같은 식각법으로 via를 형성시킨 후 전기도금법을 이용하여 Cu로 via를 채우게 되는데, 전기도금 전에 전극막으로써 금속 박막을 via 내부에 형성시켜야한다. 전기도금법으로 내부 빈 공간 없이 완전히 채우기 위해서는 via 내부 특히 측벽에 형성된 금속박막의 두께 profile이 매우 중요하다. Bosch process 같은 식각법으로 형성시킨 via의 측벽은 표면이 상당히 거칠며, 스퍼터링법으로 금속박막 증착 시 via 내부로 갈수록 금속박막의 두께가 급속히 감

a. Corresponding author; wjlee@kaist.ac.kr

소한다. 이 경우 표면 profilometer나 SEM 단면 관찰 방법으로 via 내부(특히 측벽)에 증착된 금속박막의 두께를 정확히 측정하는 것은 불가능하다.

EDS (energy dispersive spectroscopy)는 지름 0.1 μm 정도의 미세한 영역에 가속전자를 조사하여 시료 내로 입사된 전자와 시료를 구성하는 원자들 간의 상호작용으로 발생하는 특성 X-선 (characteristic x-ray)으로부터 시료의 구성 요소들의 성분과 조성을 알아내는 분석법이다. 이 분석법은 시료를 비파괴적으로 분석할 수 있고, 정량 분석이 가능하며, 분석 속도가 빠르기 때문에 성분 분석에 많이 이용되고 있다. 본 논문에서는 EDS 분석법과 모델링을 이용하여 특성 X-선 강도비 (intensity ratio)로부터 박막의 두께를 정확하고 빠르게 측정할 수 있는 방법을 고안하였다.

2. 실험 방법

2.1 박막 두께와 특성 X-선 강도비 간의 상관관계의 실험적 측정 결과

동일한 기판 위에 다양한 두께의 박막을 제작하고 EDS 분석을 수행하면, 박막의 두께에 따라 검출되는 박막 및 기판 성분원소들의 특성 X-선 강도가 달라진다. 박막의 두께에 따른 박막 및 기판 성분원소들의 특성 X-선 강도비를 기준 data로서 확보하면, 박막의 두께가 매우 얇은 경우에도 EDS 분석법으로 박막의 두께를 정확히 측정할 수 있다. 기준 data 제작 시 박막 구성성분의 X-선 강도만을 이용하는 대신 박막과 기판 성분의 X-선 강도비를 사용하는 이유는 이 강도비는 EDS 분석 시 입사 전자빔 (electron beam) 전류, 전자빔 사이즈 등에 무관하므로 실험결과의 정확도를 높일 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 여러 두께(10~150 nm)의 Cu 박막을 $\text{SiO}_2(500 \text{ nm})/\text{Si}$ 기판 위에 증착한 후, EDS 분석법으로 Cu La 및 Si Ka 특성 X-선 강도비 즉 $I_{\text{CuLa}}/I_{\text{SiKa}}$ 를 측정하였다. Cu 박막은 스퍼터링법으로 증착하였는데, 먼저 박막의 증착속도를 정밀하게 측정한 후 증착시간을 변화시킴으로써 원하는 두께를 가진 박막을 제조하였다. EDS 분석은 Philips사의 XL-30FEG를 이용하였다. 측정되는 X-선 빔 강도는 박막의 두께 이외에도 입사 전자빔 에너지 E_0 , 시편 기울기 각도 θ , X-선 방출 각도 ψ , 그리고 X-선 측정기의 특성에 따라 결정된다.

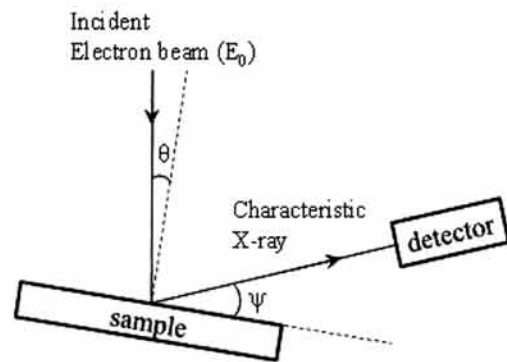


Fig. 1. Schematic geometry for EDS analysis.

여기서 시편 기울기 각도 θ 는 시편을 입사 전자빔에 대하여 기울인 각도를 의미하는데, 시편 표면에 대하여 수직인 방향과 입사 전자빔 사이의 각도로 정의하였다. 따라서 시편 기울기 각도 θ 는 전자빔의 입사 각도라고도 부를 수 있다. X-선의 방출 각도 ψ 는 시편 표면과 EDS X-선 측정기가 이루는 각도를 의미한다. 그림 1에 EDS 분석의 개략적인 구조를 나타내었다.

입사 전자 빔의 에너지는 4.5~9.0 keV의 범위로 0.5 keV씩 증가시키면서 분석하였으며, $\theta=0^\circ$, $\psi=35^\circ$ 로 고정시켰다. 그림 2에 E_0 가 4.5~9.0 keV 범위에서, $\text{SiO}_2(500 \text{ nm})/\text{Si}$ 기판 위에 증착시킨 Cu 박막 두께에 따른 $I_{\text{CuLa}}/I_{\text{SiKa}}$ 의 EDS 측정 결과를 나타내었다. I_{CuLa} 는 Cu 박막으로부터 방출되는 특성 X-선 중 X-선 측정기에 의해 측정된 Cu La X-선의 강도이고, I_{SiKa} 는 SiO_2/Si 기판으로부터 방출되는 특성 X-선 중 X-선 측정기에 의해 측정된 Si Ka X-선의 강도이다. 그림 내의 마크(mark)들은 실험적으로 얻은 결과를 나타내고 있으며 점선들은 실험 결과를 입사 전자빔 에너지 E_0 에 따라 smoothing한 결과를 나타낸다. 입사 전자 빔의 에너지 E_0 가 일정할 경우, 박막의 두께가 증가할수록 I_{CuLa} 는 증가하고 I_{SiKa} 는 감소해서 $I_{\text{CuLa}}/I_{\text{SiKa}}$ 값이 증가하게 된다. 일정한 Cu 박막 두께에 대해서는, 입사 전자 빔의 에너지가 커질수록 I_{SiKa} 가 증가하여 $I_{\text{CuLa}}/I_{\text{SiKa}}$ 값이 감소함을 볼 수 있다.

$\text{SiO}_2(500 \text{ nm})/\text{Si}$ 기판 위에 증착된 Cu 박막의 두께를 측정하고자 한다면, $\theta=0^\circ$, $\psi=35^\circ$ 의 조건에서 EDS 분석으로 특정 입사 에너지에 따른 $I_{\text{CuLa}}/I_{\text{SiKa}}$ 를 구한 다음 그림 2의 기준 data를 이용하여 박막 두께를 구할 수 있다.

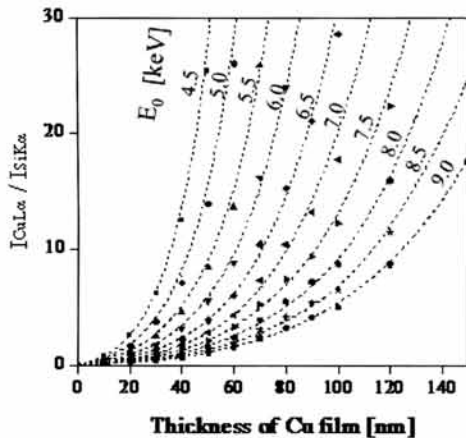


Fig. 2. Experimental data of EDS X-ray intensity ratios of $I_{CuL\alpha}$ to $I_{SiK\alpha}$ as a function of thickness of Cu film deposited on the $SiO_2(500\text{ nm})/Si$ substrate for various incidence electron beam energies(E_0). The tilt angle(θ) is 0° , and the take-off angle(ψ) is 35° .

그림 3은 이의 응용 예이다. 먼저 Si 기판 위에 폭이 $10\ \mu\text{m}$ 이고 깊이가 $100\ \mu\text{m}$ 이상인 수직형 trench를 Bosch process로 제작한 다음 $500\ \text{nm}$ 의 SiO_2 층을 형성시킨 후 스퍼터링 법으로 Cu 박막을 증착하였다. 이때 trench 외부의 기판 표면에 증착된 Cu 박막의 두께는 $1\ \mu\text{m}$ 가 되도록 하였다. 스퍼터링 법으로 증착한 금속박막은 trench 내부로 갈수록 그 두께가 급속히 감소하므로 표면 profilometer나 SEM 단면 관찰법으로 via 내부 (특히 측벽)에 증착된 금속박막의 두께를 정확히 측정하는 것은 매우 어렵다.

그림 3은 스퍼터링 법에 의해 trench 내부측면에 증착된 Cu 박막의 두께 profile을 본 연구에서 제시한 EDS 분석법으로 그림 2를 이용하여 측정하여 나타낸 것이다. EDS 분석을 위하여 trench를 장축을 따라 절개하여 trench 측면이 외부로 노출되도록 하였다.

EDS 분석은 그림 2의 조건과 동일한 $\theta=0^\circ$, $\psi=35^\circ$ 조건에서 수행하였다. Trench 외부 기판 표면에서의 박막의 두께가 $1\ \mu\text{m}$ 일 때 벽면에 증착된 Cu 박막의 두께를 측정한 것으로서, trench 내부로 깊이 들어갈수록 증착된 박막의 두께가 급격히 얇아짐을 알 수 있다. 박막 증착 공정 압력이 $0.067, 0.670\ \text{Pa}$ 의 두 경우에 대하여 나타내었는데, $0.067\ \text{Pa}$ 인 경우의 결과가 $0.670\ \text{Pa}$ 인 경우에 비해 스퍼터링된 원자들과 기체분자들 간의 충돌이 적어 trench의 더 깊은 부분까지 도달할 수 있고 결과적으로 측벽 하부에 증착된 Cu 박막의 두께가 더 큼을 볼 수 있다. 실선으로 표시한

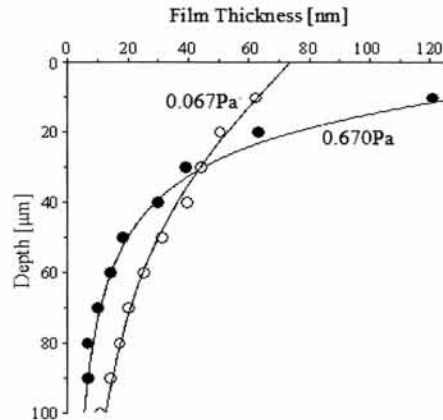


Fig. 3. Thickness profile of Cu film sputter-deposited on the sidewall of the trench (width: $10\ \mu\text{m}$) measured by using the EDS method. The thickness of the Cu film on the wafer surface outside the trench is $1\ \mu\text{m}$. Circular marks indicate the film thickness profile experimentally measured by the EDS method and solid lines indicate the film thickness profile simulated by the Monte Carlo simulation [1].

것은 본 연구실에서 제작한 Monte Carlo based simulator[1]로 예측한 trench 측벽에 증착된 금속막의 두께인데, 본 연구에서 제시한 EDS법으로 측정된 박막두께 profile과 매우 잘 일치함을 볼 수 있다.

2.2 박막 두께와 특성 X-선 강도비 간의 상관관계의 이론적 모델링

앞에서 보인 바와 같이, 그림 2와 같은 박막 두께에 따른 기판과 박막 물질의 특성 X-선 강도비 data를 확보하고 있으면, 그로부터 박막 두께를 EDS법으로 빠르고 정확하게 측정할 수 있다. 그러나 EDS 분석의 측정 조건(θ , ψ , E_0 등)이 바뀌거나 박막 또는 기판 물질이 바뀌면, 그 조건에 따른 그림 2와 같은 기준 data를 실험적으로 얻어야 하는 번거로움이 뒤따른다. 이 문제를 해결하기 위하여 그림 2와 같은 기준 data 없이도 임의의 분석조건 (E_0 , θ , ψ) 하에서 특성 X-선 강도로부터 박막 두께를 정량적으로 예측할 수 있는 모델을 고안하였다.

입사된 전자빔에 의해 발생하는 어느 성분의 X-선의 강도를 시편의 밀도(ρ)와 깊이(z)를 동시에 고려한 시편의 질량깊이 (mass thickness, ρz)의 함수로 나타낸 것이 X-선 발생 곡선 $\Phi(\rho z)$ 이다. EDS 분석 시

분석물질 내에서의 X-선 발생 곡선은 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔는데, 그 중 대표적인 것으로는 2차 다항식과 지수 함수의 조합으로 설명한 Yakowitz-Newbury 모델 [2], Gaussian 함수로 설명한 Packwood-Brown 모델 [3], 두 개의 간단한 2차 다항식의 조합으로 설명한 Pouchou-Pichoir 모델 [4] 등이 있다. 이들 중 본 연구에서는 Yakowitz-Newbury의 모델에 기초하여 이론적인 계산을 수행하였다.

Yakowitz-Newbury 모델에 의하면 $0 \leq \rho z \leq 1.5h$ 인 범위에서 $\Phi(\rho z)$ 는 $\rho z=0$ 에서 Φ_0 값을 가지며 $\rho z=h$ 일 때 최대값 k 를 갖는, 즉 꼭지점이 (h, k) 인 포물선으로 표현되며, $\rho z \geq 1.5h$ 에서는 시편 깊이에 따라 지수적으로 감소하는 함수로써 다음과 같이 표현된다 [2].

$$\Phi(\rho z)_{\rho z \leq 1.5h} = h^{-2}(\rho z - h)^2(\Phi_0 - k) + k \quad (1-1)$$

$$\Phi(\rho z)_{\rho z \geq 1.5h} = 0.25(\Phi_0 + 3k) \exp\left[\frac{3h \sec\theta}{\rho z_r - 1.5h}\right] \exp\left[-\frac{2\rho z \sec\theta}{\rho z_r - 1.5h}\right] \quad (1-2)$$

이때 $\rho z=0$ 에서의 $\Phi(\rho z)$ 값인 Φ_0 , 각 원소의 X-선 발생깊이 ρz_r , 그리고 h 와 k 값은 각각 아래와 같이 표현된다 [5,6].

$$\Phi_0 = 1 + 2.8\eta [1 - 0.9(E_c/E_0)] \quad (2-1)$$

$$\rho z_r = 0.007(E_0^{1.65} - E_c^{1.65}) [\text{mg}/\text{cm}^2] \quad (2-2)$$

$$h = \rho z_r (0.49 - 1.6\eta + 2.4\eta^2 - 1.3\eta^3) \quad (2-3)$$

$$k = \Phi_0 \left(1 + 0.35 \cos\theta \ln \frac{E_0}{E_c}\right) \quad (2-4)$$

여기서 E_0 는 전자빔의 에너지, E_c 는 문턱 이온화 에너지이다. 또한 η 는 전자의 후방산란계수(backscattering coefficient)로서 F. Arnal 등 [7]은 다음과 같이 표현하였다. $\eta = 1/(1 + \cos\theta)^{0.7/Z}$ (Z : 원소의 원자번호). 그러나, 박막의 경우 박막 물질 자체의 후방산란 외에도 하부 기판에 의한 후방산란 영향도 함께 고려해야 한다. 전자침투깊이(electron range) R 은 시료 내로 입사된 전자가 진행하는 최대 깊이를 의미하며 Kanaya-Okayama [8]에 의하면 $R_{KO} = 0.0276 (E_0^{1.65} A/Z^{0.889} \rho)$ (A : 원소의 평균 원자량, Z : 원소의 원자 번호)와 같이 표현되고, 시편이 θ 만큼 기울어졌을 경우 $R = R_{KO} \cos\theta$ 와 같이 표현된다. 박막의 두께가 전자침투깊이보다 더 클 경우 η 는 박막 자체의 후방산란계수 η_F 와 같게 될 것이다. 그러나 박막의 두께가 전자침투 깊이보다 더 작을 경우에

는 기판의 후방산란계수 η_{SS} 의 영향을 받게 될 것이며 박막두께가 작을수록 η_{SS} 의 영향은 더욱 크게 나타나게 된다. 박막두께가 0일 경우에는 η 가 η_{SS} 가 된다고 생각할 수 있다. 따라서 본 논문에서는, 박막의 두께 t 가 0부터 전자침투깊이 R 까지 변함에 따라 η 가 η_{SS} 로부터 η_F 로 선형적인 형태로 변화한다고 가정하여 다음과 같은 수식으로 표현하였다.

$$\eta = \frac{\eta_F - \eta_{SS}}{\rho R} \rho t + \eta_{SS} \quad (0 \leq t \leq R) \quad (3-1)$$

$$\eta = \eta_F \quad (t \geq R) \quad (3-2)$$

물질 내부에서 발생된 X-선은 물질 내부를 지나면서 흡수가 일어나기 때문에 시편표면 외부로 방출되는 X-선의 강도 Φ^* 는 이러한 흡수 효과를 고려하여 다음과 같이 표현된다.

$$\Phi^* = \Phi(\rho z) \exp[-(\mu/\rho) \text{csc}\psi(\rho z)] \quad (4)$$

여기서 (μ/ρ) 는 질량흡수계수(mass absorption coefficient)를 나타내며 특성 X-선과 흡수 물질의 함수이다. 박막 구성 성분으로부터 발생된 X-선은 박막을 거치면서 흡수되며, 기판 구성 성분으로부터 발생된 X-선은 일차적으로 기판을 거치면서 흡수되고 그 후에 박막을 거치면서 흡수된다. 따라서 두께 t 인 박막으로부터 시편표면 외부로 방출되는 박막의 구성성분 원소의 X-선의 강도 I_F^* 와 하부기판으로부터 시편표면 외부로 방출되는 기판의 구성성분 원소의 X-선의 강도 I_{SS}^* 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_F^* = \int_0^{\rho t} \Phi_F(\rho z) \exp[-(\mu/\rho)_F \text{csc}\psi(\rho z)] d(\rho z) \quad (5-1)$$

$$I_{SS}^* = \int_{\rho t}^{\rho R} \Phi_{SS}(\rho z) \exp[-(\mu/\rho)_{SS} \text{csc}\psi(\rho z)] d(\rho z) \times \int_0^{\rho t} \exp[-(\mu/\rho)_F \text{csc}\psi(\rho z)] d(\rho z) \quad (5-2)$$

여기서 $(\mu/\rho)_F$ 와 $(\mu/\rho)_{SS}$ 는 각각 특성 X-선이 박막과 기판을 통과하며 흡수되는 질량흡수계수를 의미하고, t 는 박막의 두께를 R 은 전자침투깊이를 의미한다. 그림 4는 박막 두께가 전자투과깊이 보다 큰 경우, 앞의 모델에 따라 계산한 CuLa의 X-선 발생곡선 $\Phi(\rho z)$ 와 흡수효과까지 고려한 X-선 방출곡선 $\Phi^*(\rho z)$ 를 질량깊이 ρz 의 함수로 도시한 것이다. 전자빔의

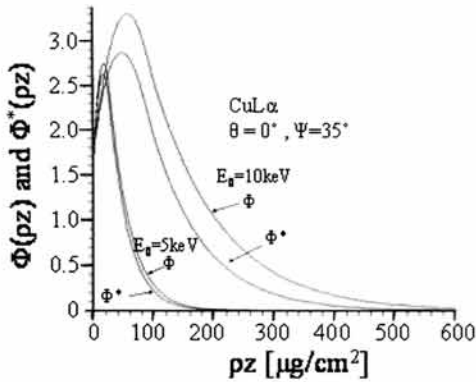


Fig. 4. Generated curves, $\Phi(pz)$ and emitted curves, $\Phi^*(pz)$ of Cu La for $\theta = 0^\circ$, $\psi = 35^\circ$, and $E_0 = 5$ and 10 keV.

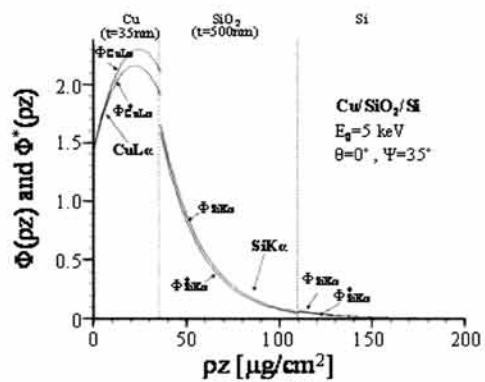


Fig. 5. Emitted curves $\Phi^*(pz)$ for Cu La obtained from Cu film with a thickness of 35 nm and for Si Ka obtained from the $\text{SiO}_2(500 \text{ nm})/\text{Si}$ substrate.

에너지(E_0)가 각각 5 keV, 10 keV이고 시편 기울기 각도 θ 가 0° , X-선 방출 각도 ψ 가 35° 인 경우이다. 그림에서 보는 바와 같이, 방출 곡선 $\Phi^*(pz)$ 가 발생곡선 $\Phi(pz)$ 에 비하여 작은 값을 나타내며 질량깊이가 깊을수록 흡수 확률이 증가하여 더욱 더 감소함을 볼 수 있다. 입사 전자 빔의 에너지가 클수록 더 많은 양의 X-선이 발생되므로, 10 keV의 경우 5 keV일 때보다 더 큰 X-선 발생 및 방출곡선을 나타내고 있다. 또한, 10 keV의 전자 빔 에너지로 분석할 경우 5 keV의 경우보다 더 깊은 영역에서도 X-선이 발생되고 결과적으로 더 많은 양이 흡수되므로 발생곡선과 방출곡선의 차이는 더욱 커지는 것을 볼 수 있다.

시편표면에서 방출되는 X-선은 EDS X-선 측정기에 검출되는 과정에서 여러 단계를 거치게 되므로 측정되는 X-선 강도는 방출되는 X-선 강도와 다른 값을 가지게 된다. 따라서 실제로 측정되는 특성 X-선 강도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_F = k_F \cdot I_F^* \quad (6-1)$$

$$I_{SS} = k_{SS} \cdot I_{SS}^* \quad (6-2)$$

여기서 I_F 및 I_{SS} 는 박막 및 기판으로부터 방출된 X-선이 EDS X-선 측정기에서 최종적으로 측정되는 X-선 강도이다. 또한 k_F 및 k_{SS} 는 박막 및 기판 성분에서 발생하는 특성 X-선에 대한 X-선 측정기의 특성상수인데, 이 값들은 사용하는 EDS X-선 측정기 특성에 따라 결정된다. 따라서 측정된 X-선 강도비 I_F/I_{SS} 는 방출된 X-선 강도비 I_F^*/I_{SS}^* 와 다음과 같은

관계를 가지게 된다.

$$\frac{I_F}{I_{SS}} = K \frac{I_F^*}{I_{SS}^*} \quad (K = k_F/k_{SS}) \quad (7)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 실험 결과와 이론적 모델링 결과와의 비교

그림 2의 실험방법과 동일한 조건으로 모델링을 수행하여, $\text{SiO}_2(500 \text{ nm})/\text{Si}$ 기판 위에 두께 t 의 Cu 박막이 증착된 시편으로부터 $I_{\text{CuLa}}/I_{\text{SiKa}}$ 를 이론적으로 구하였다. 그림 5는 $\text{SiO}_2(500 \text{ nm})/\text{Si}$ 기판 위에 두께 35 nm의 Cu 박막을 증착한 후 5 keV의 에너지를 갖는 전자빔으로 $\theta=0^\circ$, $\psi=35^\circ$ 조건 하에서 EDS분석을 하였을 때, 앞의 모델링을 적용하여 구한 CuLa, SiKa의 X-선 발생 곡선 Φ 와 방출 곡선 Φ^* 을 나타낸 것이다. 35 nm의 두께를 갖는 Cu에서 방출되는 CuLa의 X-선 방출곡선을 질량깊이에 대하여 적분하고, 500 nm의 SiO_2 와 하부의 Si 기판에서 방출되는 SiKa의 X-선 방출곡선을 질량깊이에 대해 적분하여 두 적분 값의 비를 구하면, 35 nm의 두께를 갖는 Cu 박막을 5 keV의 입사 에너지를 갖는 전자빔으로 분석하였을 경우의 방출 X-선 강도비 $I_{\text{CuLa}}^*/I_{\text{SiKa}}^*$ 값이 된다. 이러한 방법으로 여러 전자빔 에너지 E_0 값에 대하여 $I_{\text{CuLa}}^*/I_{\text{SiKa}}^*$ 값들을 Cu 박막 두께의 함수로 계산해 낼

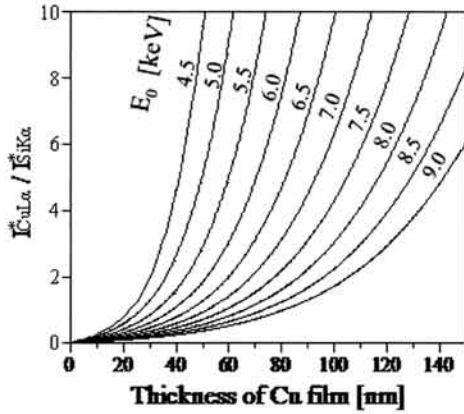


Fig. 6. Calculated ratio of the emitted X-ray intensity of Cu La to that of Si Ka (I_{CuLa}^*/I_{SiKa}^*) as a function of the thickness of Cu film deposited on the SiO₂(500 nm)/Si substrate for various incidence electron beam energies.

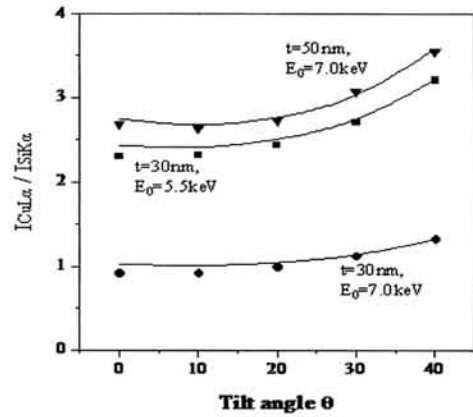


Fig. 8. Comparison of experimental data (solid mark) with the simulation result (solid line) of I_{CuLa}/I_{SiKa} as a function of tilt angle for various Cu films deposited on the SiO₂(500 nm)/Si substrate and incident electron beam energies.

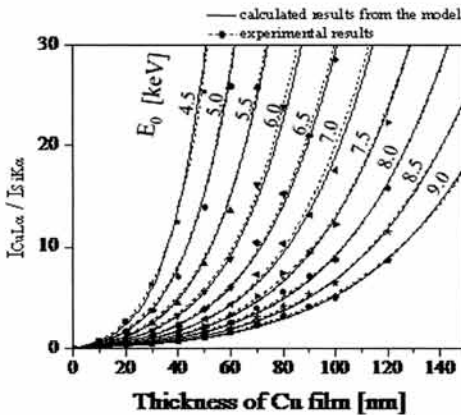


Fig. 7. Calculated result (solid lines) of I_{CuLa}/I_{SiKa} as a function of Cu film thickness for various incidence electron beam energies(E_0). The calculated results obtained from the model show excellent agreement with the experimentally measured data.

수 있다. 이 계산 결과를 그림 6에 나타내었다. 그런데 실제로 X-선 측정기에서 측정되는 X-선 강도비 I_{CuLa}/I_{SiKa} 는 방출된 X-선 강도비 I_{CuLa}^*/I_{SiKa}^* 와 식(7)과 같은 관계를 가지므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{I_{CuLa}}{I_{SiKa}} = K \frac{I_{CuLa}^*}{I_{SiKa}^*} \tag{8}$$

여기서 K는 k_{CuLa}/k_{SiKa} 로써 연구자가 사용하는 X-선 측정기 특성에 따라 결정되는 특성상수이다. K값은 박막두께를 알고 있는 시편으로부터 실제 실험적으로 측정된 X-선 강도와 모델링으로 계산된 결과를 비교함으로써 쉽게 구할 수 있다.

본 연구에서 사용된 EDS X-선 측정기의 K값은 2.94였다. 앞서 모델링으로부터 구한 그림 6의 결과에 본 연구에서 사용한 X-선 측정기의 K값 2.94를 곱하면, SiO₂(500 nm)/Si기판 위에 $\theta=0^\circ$, $\psi=35^\circ$ 조건하에서 여러 가지 E_0 값으로 EDS분석을 수행하였을 때 Cu 박막두께에 따른 Cu와 Si 특성 X-선의 측정강도비 I_{CuLa}/I_{SiKa} 를 얻을 수 있으며, 이를 그림 7에 실선으로 나타내었다. 실제로 실험적으로 측정된 결과(그림 2)와 비교하기 위하여 그림 2의 실험결과를 그림 7에 같이 나타내었다. 본 연구의 모델링에 의해서 계산으로 얻은 박막두께에 따른 X-선 강도비와 실험적으로 구한 X-선 강도비가 거의 완벽하게 일치함을 볼 수 있다. 따라서 본 연구의 모델은 X-선 강도와 박막 두께와의 관계를 정확히 예측할 수 있음을 알 수 있다.

본 연구에서 개발한 모델의 정확도를 더욱 검증하기 위해서 SiO₂(500 nm)/Si기판 위에 증착시킨 Cu 박막의 두께가 30, 50 nm 일 때 그리고 입사 전자빔의 에너지가 5.5, 7.0 keV 일 때 시편의 기울기 각도 θ 를 변화시켜 가며 I_{CuLa}/I_{SiKa} 값을 계산하여 그림 8

에 실선으로 나타내었다. 또한 비교를 위해 같은 조건에서 실험적으로 측정된 $I_{CuL\alpha}/I_{SiK\alpha}$ 값을 마크로써 같이 나타내었다. 이번에도 실험적으로 측정된 결과와 모델로부터 계산한 결과가 매우 잘 일치함을 확인할 수 있다.

그림 8에서 박막의 두께가 30 nm로 일정할 때 입사 전자 빔 에너지가 커지면 $I_{CuL\alpha}/I_{SiK\alpha}$ 값이 작아지는 것은 전자침투깊이(R)가 커져서 Si K α 의 발생이 증가되기 때문이다. 입사 전자빔의 에너지가 7 keV로 일정할 경우 Cu 박막의 두께가 30 nm에서 50 nm로 두꺼워지면 CuL α 의 발생이 더 크게 되어 $I_{CuL\alpha}/I_{SiK\alpha}$ 값이 커진다. 또한 시편 기울기 각도 θ 가 커지면 전자 침투깊이 R이 작아져서 상대적으로 Si K α 의 발생이 작게 되어 $I_{CuL\alpha}/I_{SiK\alpha}$ 는 증가한다.

4. 결론

본 논문에서는 EDS 분석으로 측정된 박막 및 기판의 특성 X-선의 강도비로부터 박막의 두께를 빠르고 정확히 측정할 수 있는 방법을 제안하였다. 또한 주어진 전자빔 입사 에너지(E_0), 시편 기울기 각도(θ), X-선 방출 각도(ψ) 등의 조건하에서 박막과 기판으로부터 방출된 특성 X-선 강도비를 계산할 수 있는 모델을 개발하였다. 실험결과와의 비교를 통해 모델로부터 예측한 박막 두께에 따른 X-선 강도비 관계가 실제 실험결과와 거의 완벽하게 일치함을 확인하였다.

따라서 분석자가 사용하는 EDS X-선 측정기의 특성 상수 K값을 최소한의 실험으로 결정한 다음, 본 연구에서 제시한 모델을 이용함으로써 어떠한 분석조건 (기판물질, 박막물질, 전자빔 입사 에너지 E_0 , 시편 기울기 각도 θ , X-선 방출 각도 ψ 등) 하에서도 X-선 강도비로부터 박막 두께를 빠르고 정확하게 결정할 수 있다

REFERENCES

- [1] U. H. Kwon and W. J. Lee, *Thin Solid Films*, 445, 80 (2003).
- [2] H. Yakowitz and D. E. Newbury, *Proc. 9th Annual SEM Symp.* (IIT Res. Inst., Chicago, Illinois, 1976) p. 151.
- [3] H. Packwood and J. D. Brown, *X-ray Spectrom.*, 10, 138 (1981).
- [4] J. L. Pouchou and F. Pichoir, *Proc. 11th Int. Cong. on X-ray Optics and Micro analysis* (University of Western Ontario Press, Ontario, 1987) p. 249.
- [5] W. Reuter, *Proc. 6th Int. Cong. on X-ray Optics and Micro analysis* (University of Tokyo Press, Tokyo, 1972) p. 121.
- [6] K. F. J. Heinrich, D. E. Newbury, and H. Yakowitz, *Natl. Bur. Stand. Tech. Note*, 521 (1976).
- [7] F. Arnal, P. Verdier, and P. D. Vincinsini, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 268, 1526 (1969).
- [8] K. Kanaya and S. Okayama, *J. Phys. D, Appl. Phys.*, 5, 43 (1972).