

γ-FIB 시스템을 이용한 산소 유량 변화에 따른 산화인듐주석 박막의 특성 연구

김동해^a · 손찬희^a · 윤명수^a · 이경애^a · 조태훈^a · 서일원^a
엄환섭^a · 김인태^b · 최은하^a · 조광섭^a · 권기철^{a*}

^a광운대학교 전자물리학과, 서울 139-875

^b광운대학교 화학과, 서울 139-875

(2012년 9월 19일 받음, 2012년 10월 27일 수정, 2012년 10월 28일 확정)

본 연구는 RF 마그네트론 스퍼터링법을 이용하여 산소유량 변화에 따라 증착된 ITO 박막 구조적, 전기적, 광학적 특성을 분석하였다. ITO (Indium Tin Oxide) 박막은 1.0×10^{-3} Torr의 공정 압력과 2 kW 및 13.56 MHz의 RF 전력, 1,000 sccm의 Ar 가스 조건하에 0~12 sccm의 O₂ 가스 유량을 변경하면서 증착하였다. 광투과율 측정은 적분구를 이용하였으며, 측정 파장 범위는 300~1,100 nm이다. 4-point probe를 이용하여 면저항을 측정하였으며, Hall Measurement System을 이용하여 비저항, 캐리어 농도 및 전하이동도를 측정하였다. Scanning electron microscope 장비를 이용하여 ITO 박막 표면을 분석하였고, 박막의 거칠기는 Atomic force microscope을 이용하여 측정하였다. γ-Focused ion beam system을 이용하여 ITO 박막의 이차전자방출계수를 측정하였으며, 이차전자방출계수 값으로 Auger neutralization mechanism 분석법을 이용해 ITO 박막의 일함수를 결정하였다. 3 sccm의 산소 유량에서 증착된 ITO 박막의 비저항은 약 $2.4 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 로 가장 좋았으며, 광학적 특성 또한 84.93% (Weighted average)로 가장 좋은 것을 확인할 수 있었다. 이 조건에서 이차전자방출 계수가 가장 높았고 일함수는 가장 낮은 경향의 일치함을 확인하였다.

주제어 : 산화인듐주석, 박막, 전도성 투명전극, RF 마그네트론 스퍼터링, γ-Focused ion beam system

I. 서 론

ITO (Indium Tin Oxide) 박막은 In₂O₃에 Sn을 5~10% 정도 포함한 n-type 반도체 재료로서 낮은 전기저항 ($1.3 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$)과 안정성을 가지고 있고, 약 3.5 eV 이상의 높은 band gap을 가지고 있어 가시광선 영역에서 우수한 광학적 투과도를 보여 투명전극으로 널리 이용되고 있다 [1]. 이러한 ITO 재료는 태양전지, LCD, LED, Flexible display 등의 분야에서 폭넓게 응용되고 있으며 활발한 연구도 진행되고 있다 [2-6].

ITO 박막의 제작 방법은 DC 및 RF 마그네트론 스퍼터링법 [7,8], 열 증착법 [9], E-beam 증발법 [10], Sol-gel [11], Spray pyrolysis [12,13] 등이 있다. 이러한 방법들 중 스퍼터링법은 박막 형성 시 매우 정밀한 박막의 성장 속도, 기판 온도, 박막의 Morphology 제어 등이 용이하고, 저온 공정 및 대형기판에서도 박막의 두께와 특성이 균일하게 유지할 수 있어 널리 사용된다.

스퍼터링법으로 박막을 형성할 때 인가전력, 공정 압력, 증착온도 및 산소 분압 등의 다양한 공정 변수에 의해 박막의 결정성과 전기·광학적 특성이 나타내게 된다 [8,11,14-18]. 특히 스퍼터의 타겟 소스만으로 ITO 박막을 증착할 시 ITO 박막의 산소 결핍을 초래할 가능성이 있다. ITO 막중에 산소 결핍(Oxygen vacancy)은 저급산화물인 InO, SnO 또는 금속성 In, Sn을 생성하여 막중의 전자밀도와 이동도 등의 전기적 특성 및 광투과율에도 영향을 미친다. 따라서 ITO 박막의 전기·광학적 특성 향상을 위한 공정 및 증착 조건에 관련된 연구가 필요하다.

박막의 일함수는 밴드부정합을 결정하는 중요한 물리적 변수이다. 이차전자방출계수(γ)는 물질의 고유한 특성이며 물질의 물리적·전기적 성질과 깊은 관계가 있다. 이차 전자방출계수는 시료로부터 방출된 전자전류와 입사된 이온전류의 비율이며 입사되는 이온의 가속전압이 커질수록 증가하며 사용되는 불활성 기체의 이온화 에너지가 커질수록 증가한다. ITO에 이온화 에너지 24.5 eV인 He ion

* [전자우편] gckwon@kw.ac.kr

source를 사용하였으며, Auger neutralization mechanism 분석을 통하여 ITO 박막의 일함수를 결정하였다.

본 연구에서는 RF 마그네트론 스퍼터링 법으로 산소 가스를 챔버 내에 첨가시켜주면서 ITO 박막을 증착하여 그 특성을 살펴보았다. 증착 온도 및 압력은 동일하게 유지시키며 추가적으로 첨가되는 산소 가스의 유량은 0~12 sccm 으로 변화시켜 주었으며, ITO 박막의 특성은 구조적, 전기적, 광학적으로 측정하였고, 동시에 γ -FIB (Focused Ion Beam)를 이용하여 이차전자방출계수와 일함수의 변화를 확인하였다.

II. 실험 방법

ITO 박막은 Fig. 1과 같은 RF 마그네트론 스퍼터링 시스템을 이용하여 증착하였다. ITO 박막은 상온에서 증착되었으며, 1.0×10^{-3} Torr의 공정 압력, RF power는 2 kW (frequency: 13.56 MHz)로, Ar 가스 유량을 1,000 sccm 으로 고정된 유량 조건하에 0~12 sccm로 O₂ 가스를 변경하면서 증착을 하였다. 공정에 사용된 ITO 타겟(4 인치 원형)의 성분 구성비는 10% SnO₂와 90% In₂O₃이다.

타겟과 기판 사이의 거리는 200 mm였으며, ITO 박막 증착시 기판 온도는 열전대를 사용하여 측정하였고, soda lime 유리 기판에 증착하였다. ITO 박막의 광투과율 측정은 적분구를 이용하였으며, 측정 파장 범위는 300~1,100 nm 이다. 4-point probe로 면저항을 측정하였고, Hall measurement system을 이용하여 비저항(Resistivity), 캐리어 농도(Carrier concentration) 및 전자 이동도(Electron

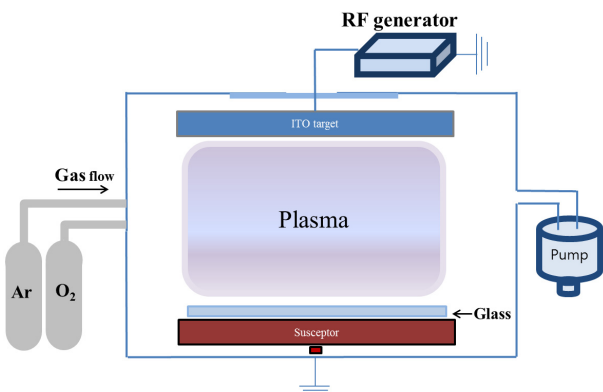


Figure 1. RF magnetron sputtering system.

Mobility)를 측정하였다. ITO 박막의 표면 구조는 전자 현미경(SEM)으로 확인 하였으며, 표면의 거칠기(Roughness)는 AFM (Atomic Force Microscope)으로 측정하였다.

Fig. 2는 본 실험에 사용된 ITO 박막의 이차전자방출계수(γ)와 일함수(ϕ_w)를 측정하기 위한 γ -FIB (Focused Ion Beam) system의 구조도이다. Fig. 2와 같이 γ -FIB system은 크게 이온원부, 경통부, 시료부 3부분으로 나뉜다. 특히, 이온원부는 전자방출을 위한 텅스텐 필라멘트, 기체 주입을 위한 MFC (Mass Flow Controller), 양(+극)의 가속전압을 가해주는 anode, 빔 집속을 위한 500 μ m 몰리브덴 구경으로 이루어져 있고, 이온의 에너지에 따라 이온이 경통부를 통과하여 시료부에 도달한다. 이때, 시료 표면에 가속된 이온과 충돌하여 방출된 이차전자 검출을 통해 이차전자방출계수를 얻는다. 측정된 이차전자 방출계수를 이용해 Auger neutralization mechanism 분석법으로 ITO 박막의 일함수를 구한다.

즉, 불활성 기체인 He은 텅스텐 필라멘트로부터 방출되는 열전자와의 충돌로 인해 이온화가 이루어지며 이렇게 발생된 이온은 다시 양극에 가해진 전압에 의해 가속되어 진다. Einzel 렌즈에 의해 집속된 이온빔은 ITO 표면을 때리고 그 결과 이차 전자 생성시킨다. 이에 따라 γ -FIB system을 이용하여 ITO 박막의 이차전자방출계수 및 일함수를 함께 측정할 수 있다. Auger neutralization mecha-

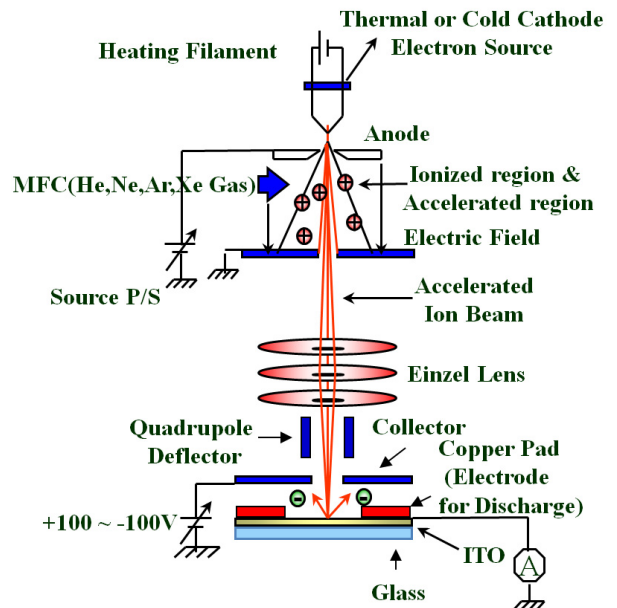


Figure 2. γ -FIB system.

nism 분석법에 의하면 ITO 박막의 표면으로부터 방출 되는 이차전자의 최대운동에너지 E_k^{\max} 는 다음과 같이 주어진다.

$$E_k^{\max} = E_i - 2\phi_w \quad (1)$$

여기서 E_i 는 기체의 이온화 에너지이며, ϕ_w 는 ITO 박막의 일함수(Work-function)를 나타낸다. 따라서 Auger neutralization mechanism에 의해 일함수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\phi_w = \frac{(E_i - E_k^{\max})}{2} \quad (2)$$

ITO 표면으로부터 이차전자가 방출되지 않는다면 $\gamma = 0$ 이며, 이때 이차전자의 최대운동에너지는 $E_k^{\max} = 0$ 이 된다. 따라서 $\gamma = 0$ 이고 $E_k^{\max} = 0$ 일 때의 일함수 ϕ_w 는 다음과 같다.

$$\phi_w = \frac{E_{io}}{2} \quad (3)$$

여기서 E_{io} 는 $\gamma = 0$ 일 때의 이온화 에너지이다. 이와 같은 방법으로 ITO 박막의 γ 값을 측정된 뒤 일함수를 구하였다 [14-17].

ITO 박막 공정 실험 조건에 대한 사항은 Table 1에 표시하였다. 이 실험 조건하에서 산소 유량에 따라 증착된 ITO 박막의 전기적인 특성, 광학적 특성, 이차전자방출계수 (γ)와 일함수(ϕ_w)를 얻었다.

III. 실험결과

산소유량별로 증착된 ITO 박막의 SEM 사진은 Fig. 3에 나타내었다. SEM 사진을 보면 산소 유량이 증가함에 따라 박막 표면의 결정들의 크기가 3 sccm일 때까지는 증가하고, 산소 유량이 3 sccm 이상으로 증가함에 따라 결정의 크기가 점차 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 각 결정의

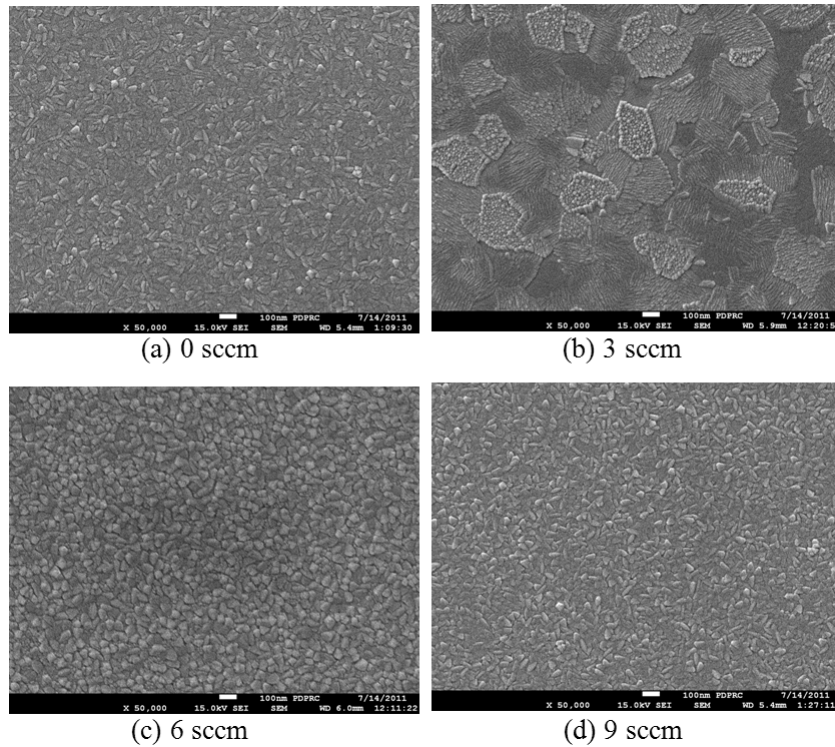


Figure 3. SEM images according to oxygen flow rate of ITO thin films. Grain sizes are about (a) 42 nm, (b) 200 nm, (c) 60 nm, (d) 58 nm of ITO films.

크기는 산소 유량에 따라 약 (a) 42 nm, (b) 200 nm, (c) 45 nm, (d) 34 nm로 측정되었으며, 3 sccm의 산소가 첨가되었을 때 결정의 크기가 가장 큰 것을 확인할 수 있었다. 3 sccm 이상의 산소유량이 첨가됨에 따라 결정크기가 비교적 감소한다. 이는 증착 시 산소가 활발한 혼합 또는 분리로 인해 결정립 경계면이 더 형성되어 결정크기가 감소하는 것으로 보인다. 3 sccm 이하의 산소유량 첨가되었을 때 다소 낮은 산소의 첨가로 인해 특정결정방향에서 스퍼터링

의 저항이 커서 상대적으로 특정결정방향을 지닌 결정크기가 커지는 것으로 추측된다 [18,19].

AFM 측정 결과인 Fig. 4에서 보는 바와 같이, 산소 유량에 따라 (a) 2.1 nm, (b) 4.0 nm, (c) 3.3 nm, (d) 3.2 nm로 표면 거칠기가 측정되었고, 3 sccm일 때 ITO 박막의 표면 거칠기가 가장 높은 것을 확인하였다. 표면 거칠기는 ITO 박막의 특정 방향의 (622)와 (400) 결정방향사이의 성장에 영향을 받는다. 소량의 산소 첨가로 증착된 박막에서 거의 비화학적양론(Non-stoichiometry)에 의해 다량의 산소가 포함된 (400)결정방향의 결정립이 상대적으로 빠른 성장하여 표면 거칠기를 형성하는 것으로 보인다 [18,19]. 또한 산소 유량이 증가함에 따라 스퍼터되는 입자 에너지의 감소뿐만 아니라 In^{3+} 자리를 치환하는 Sn^{4+} 이온의 형성보다 $Sn^{+}O^{-}$ 의 형성이 상대적으로 증가하여 ITO 박막의 거칠기가 증가하는 것이라 추측된다 [20].

Fig. 5는 300~1,100 nm의 파장 대역에서 산소 유량에 따른 ITO 박막의 광 투과율을 나타내었다. 산소 유량별로 측정된 ITO 박막의 투과 특성을 알아보기 위해, 다음 식에

Table 1. Experimental condition for ITO thin film process.

Parameters	Conditions
Base pressure	4.5×10^{-6} Torr
Working pressure	1.0×10^{-3} Torr
Substrate	Soda lime glass
Power density	RF, 2 kW, 13.56 MHz
Gas	Ar 1,000 sccm, O ₂ 0~12 sccm
Distance between target and substrate	200 mm

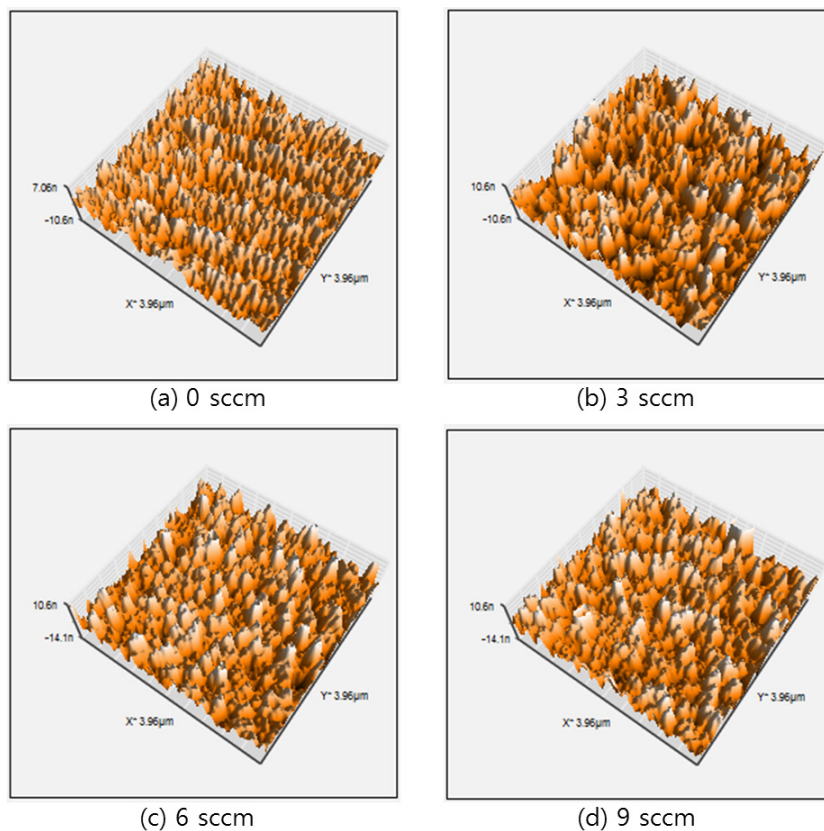


Figure 4. AFM surface roughness scan according to oxygen flow rate for ITO thin films. (a) 2.1 nm, (b) 4.0 nm, (c) 3.3 nm, (d) 3.2 nm.

서 주어진 바와 같이 광 스펙트럼을 고려하여 가중치 평균 투과율(Weighted average transmittance)를 각각 측정된 샘플의 투과스펙트럼 측정값을 이용하여 계산하였다.

$$T_s = \frac{\int_{\lambda=300nm}^{\lambda=1100nm} T(\lambda) N_{photon}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda=300nm}^{\lambda=1100nm} N_{photon}(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

여기서 $T(\lambda)$ 는 투과스펙트럼을 나타내며, $N_{photon}(\lambda)$ 은 광 스펙트럼의 파장에 대한 광자의 수를 나타내고 있다 [21]. 산소 유량별로 증착한 ITO 박막은 3 sccm 조건에서 450 nm 영역에서 90% 이상의 광투과율을 보였다. Table 2에서는 산소 유량별로 증착된 ITO 박막의 가중치 평균된 광 투과율(Weighted average transmittance)과 박막의 면저항을 표시하였고, 3 sccm에서 가장 높은 광투과율과 가장 낮은 면저항을 가지는 것을 확인하였다. 이는 박막의 결정

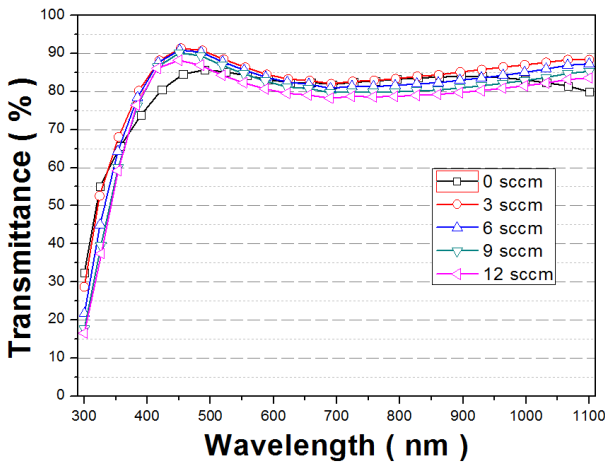


Figure 5. Transmittance of ITO thin films as a function of the oxygen flow rate.

Table 2. Transmittance and sheet resistivity according to oxygen flow rate of ITO thin films.

O ₂ flow rate (sccm)	Transmittance [Weighted average (%)]	Sheet resistivity (Ω/sq)
0	82,2	26
3	84,9	20,5
6	83,6	43,9
9	82,1	98,7
12	80,5	196,6

크기와 표면 거칠기가 가장 큰 3 sccm 산소 유량에서 가장 높은 광투과율과 가장 낮은 면저항 값으로 일치됨을 확인하였고, 박막 결정이 크면 면저항이 감소되고, 광투과율이 증가되는 것으로 판단된다. 광학적 특성은 Fig. 6에서와 같이 300~550 nm 파장에서 가장 큰 변화가 관찰되었는데, 산소가 감소할수록 투과율이 감소하는 방향으로 나타났다. 이것은 ITO 박막 증착 시 산소 결핍에 따른 흡수막의 생성에 의한 것으로, ITO 박막내 산소 결핍에 따른 비화학량론이 증가함에 의해 금속(Metallic)막이 생성된 것으로 추측된다 [22-24]. 박막 내 산소 농도가 감소하면 완전한 산화가 이루어지지 못하고, 다음과 같은 비가역 반응식에 의해 In(인듐)이 석출된다.



In 석출에 의해 금속 흡수막이 형성되면 투과율을 저하시키기 때문에 광학적 특성 저하로 나타날 수 있다. ITO 박막에 영향을 미치는 산소에 대한 메커니즘은 광학 밴드갭(Optical bandgap)으로 설명이 가능하다. ITO 박막은 UV 영역에서 흡수가 강하게 발생하는데 이는 밴드갭(E_g)를 통과하여 여기(Exciting)되는 현상으로 인해, In에 치환된 도펀트 Sn(주석)에 의해 흡수대가 단파장 영역 부분으로 이동하게 된다. 이를 blue shift라고 하는데, 이러한 현상은 Burstein-Moss 현상에 의한 것으로서 전도대에서 가장 낮은 에너지 상태로 부분적으로 이동되어 나타난 것으로 추측된다 [25].

Fig. 6은 산소 유량 변화에 따른 ITO 박막의 전기적 특성의 결과이다. ITO 박막의 전기적 특성은 Fig. 6에서 볼

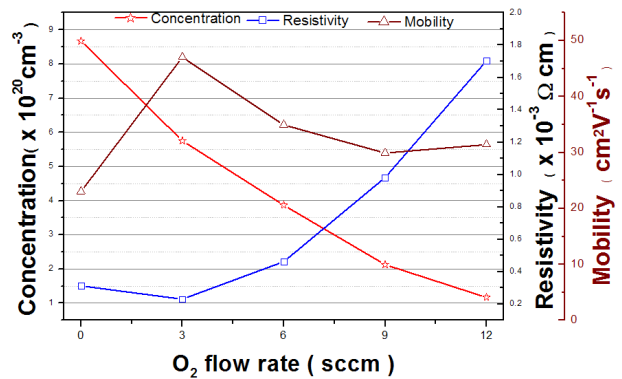


Figure 6. Hall measurements according to oxygen flow rate of ITO thin film.

수 있듯이 캐리어 농도, 비저항, 전자의 이동도를 측정하여 분석하였다. 산소 가스 유량이 증가할수록 캐리어 농도와 전자의 이동도가 감소하는 경향을 보였다. 박막의 비저항의 경우 산소 가스 유량이 3 sccm에서 가장 낮은 비저항 값을 보였고, 3 sccm 이상의 산소 유량이 증가할수록 비저항이 증가하였다. 이는 박막 형성 시 추가적으로 첨가되는 산소의 유량이 박막 내에 Sn, In에 결합하는 산소가 저급 산화물인 InO와 SnO를 초래하여 박막의 전기적 특성을 변화시킨 것으로 판단된다 [8,26]. 이러한 이유로 박막 표면에서 결정이 생성되는 과정에서 결정 성장도에 따라 전기적 특성, 광학적 특성에 영향을 미치는 것으로 추정된다.

전기적인 특성과 광학적인 특성의 상관관계를 알아보기 위하여 γ -FIB system를 이용한 ITO 박막의 이차전자방출계수와 일함수를 측정하였다. Fig. 7은 가속전압 200 V를 가진 헬륨이온빔(He ion beam)에서 산소 유량별로 증착된 ITO 박막으로부터 나오는 이차전자방출계수를 나타낸다. 이온화 에너지가 24.5 eV의 헬륨이온빔을 사용하여 Auger neutralization mechanism 분석법으로 ITO 박막의 일함수를 얻은 결과는 Fig. 8에 나타내었다. 산소 유량별로 증착된 ITO 박막은 3 sccm까지는 이차전자방출계수가 증가하고, 일함수가 감소하고, 3 sccm 이상의 산소 유량이 증가함에 따라 이차전자방출계수는 감소하고, 일함수가 증가하는 경향을 보였다. 산소 유량에 따른 전자이동도

와 광투과율의 결과는 이차전자방출계수와 일치하는 경향을 확인하였고, 산소 유량에 따른 비저항과 면저항의 결과는 일함수와 일치하는 것을 확인하였다. 이차전자방출계수가 감소함에 따라 일함수는 증가하고, 면저항도 증가하는데, 이는 면저항이 자유 캐리어의 감소와 관계가 있어 페르미 준위를 낮추게 하여 일함수가 증가하는 결과를 가져오기 때문이다 [14-17].

이차전자방출계수와 일함수의 측정은 박막 표면의 영향을 많이 받는다. 박막 표면에 입사되는 이온빔이 표면 거칠기에 따라 이차전자방출계수가 달라지는데, Fig. 3과 Fig. 4에서 보는 바와 같이 결정의 크기와 ITO 박막 표면의 거칠기가 산소 유량에 따른 이차전자방출계수와 일치되는 경향을 확인할 수 있다. 산소 유량별로 증착된 결정의 크기가 변함에 따라서 입사되는 이온빔과 표면 사이의 각도가 작을수록 이차전자방출계수가 감소하는 방향으로 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 이는 입사되는 이온빔이 표면 거칠기의 증가에 따라 이차전자방출계수는 증가하고, 일함수는 감소하는 것에 기인한다 [32]. 즉, ITO 박막 표면의 결정 성장도가 이차전자방출계수와 일함수가 연관되는 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 RF 마그네트론 스퍼터링 시스템을 이용하여 산소 유량의 변화에 따른 ITO 박막을 상온에서 유리

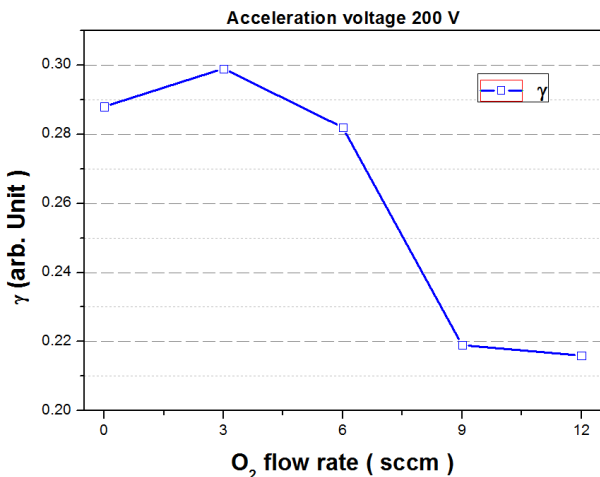


Figure 7. Plot of the experimentally measured coefficient γ of the secondary electron emission. The accelerating 200 voltage for helium gas for ITO films with different O₂ gas flow rates.

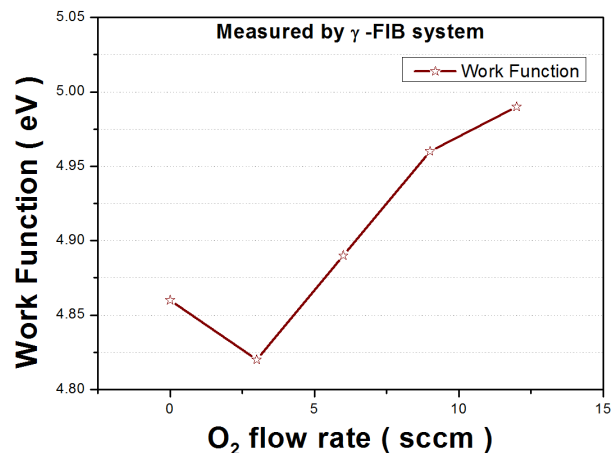


Figure 8. Work function by using Auger neutralization theory from secondary emission coefficient (γ) according to oxygen flow rate of ITO thin films.

기판에 증착하였다. 진공 챔버 내에 3 sccm의 산소 유량에서 ITO 박막 내 생기는 산소 결핍을 낮추어 광학적인 특성과 전기적인 특성이 우수한 박막을 제작하였다. ITO 박막의 결정 크기와 표면 거칠기는 3 sccm 산소 유량에서 가장 높았고, ITO 박막의 전기적 특성은 3 sccm의 산소 유량에 따라 제작된 박막의 비저항이 가장 낮았으며, 전자 이동도는 가장 높은 것으로 확인하였다. 광학적 특성 또한 산소 유량이 3 sccm에서 제작된 박막의 가중치 평균 광투과율은 84.9%으로 가장 좋은 것을 높였으며, γ -FIB system 측정을 통해 얻어낸 이차전자방출계수의 값들을 보았을 때, 산소 유량이 3 sccm일 때의 이차전자방출계수가 가장 높게 나타났다. Auger neutralization mechanism 분석을 통하여 일함수를 구한 결과 산소 유량이 3 sccm일 때 이차전자방출계수는 증가하고 일함수는 감소하였다. 이차전자방출계수의 결과는 전기적, 광학적 특성의 결과가 특정 유량인 3 sccm을 기준으로 산소 유량에 따라 유사한 경향을 확인하였다. 박막 형성시 표면 결정의 크기와 표면 거칠기가 증가할수록 이차전자방출계수는 증가하는 경향을 확인하였으며, 이로 인한 면저항의 감소는 자유 캐리어의 증가로 페르미 준위가 증가하게 되어 일함수가 낮아지는 경향으로 판단된다. 또한, 박막 형성시 추가적으로 첨가되는 산소의 유량이 박막 내에 Sn, In에 결합하는 산소가 저급 산화물인 InO와 SnO를 초래하여 박막의 전기적 특성을 변화시킨 것으로 판단된다 [8,26]. 이로 인해서 박막 표면의 결정 성장도에 따라서 전기적 특성, 광학적 특성과 이차전자방출계수가 영향을 미치는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 지식경제부 신재생에너지융합원천기술개발사업(20113020010080, 결정질 태양전지 공정을 위한 저가 대기압 플라즈마 도핑 원천 기술 개발)과 산업 전략 기술 개발 프로그램(10041926, 초미세 반도체와 플렉서블 디스플레이 공정을 위한 무기물 박막 증착용 고밀도 플라즈마 기술 개발)과 2012년 Brain Korea 21 (BK21)의 지원으로 지원된 연구임.

참고문헌

- [1] Y. L. Choi, J. Kor. Inst. Met. Mater. **45**, 579 (2007)
- [2] C. J. Lee, S. K. Park, J. I. Han, W. K. Kim, and M. G. Kwak, IDMC **2000**, 515 (2000).
- [3] J. R. Bellingham, A. P. Mackenzie, and W. A. Philips, Appl. Phys. Lett. **58**, 2506 (1991).
- [4] J. Y. Song, D. Y. Jeong, C. S. Kim, S. H. Park, J. S. Jo, J. S. Song, J. S. Wang, and J. C. Lee, J. Korean Vac. Soc. **20**, 210 (2010).
- [5] J. I. Pankove, *Display Devices, Topics in Applied Physics* (Springer-Verlag, Berlin, 1980), p. 40.
- [6] K. Osaza, T. Ye, and Y. Aoyagi, Thin Solid Films **246**, 58 (1994).
- [7] C. H. Liang, S. C. Chen, X. Qi, C. A. Chen, and C. Yang, Thin Solid Films **519**, 345 (2010).
- [8] V. A. Dao, H. Choi, J. Heo, H Park, K. Yoon, Y. Lee, Y. Kim, N. Lakshminarayan, and J. Yi, Current Applied Physics **10**, S506 (2010).
- [9] A. Salehi, Thin Solid Films **324**, 214 (1998).
- [10] I. A. Rauf, J. Appl. Phys. **79**, 4057 (1996).
- [11] M. J. Alam and D. C. Cameron, Thin Solid Films **377-378**, 455 (2000).
- [12] C. H. Lee and C. S. Huang, Mater. Sci. Engineering **B 22**, 233 (1994).
- [13] E. Benamar, M. Rami, C. Messaoudi, D. Sayah, and A. Ennaoui, Solar Energy Material and Solar Cells **56**, 125 (1998).
- [14] E. H. Choi, J. Y. Lim, Y. G. Kim, J. J. Ko, D. I. Kim, C. W. Lee, and G. S. Cho, J. Appl. Phys. **86**, 6525 (1999).
- [15] G. Y. Kim, J. S. Oh, E. H. Choi, G. S. Cho, S. U. Kang, and J. W. Cho, J. Korean Vac. Soc. **11**, 171 (2002).
- [16] H. S. Uhm, J. H. Choi, H. J. Yoo, G. C. Kwon, and E. H. Choi, J. Appl. Phys. **111**, 053302 (2012).
- [17] H. J. Oh, J. W. Hyun, and J. H. Lee, J. Korean Vac. Soc. **12**, 16 (2003).
- [18] D. Mergel, M. Schenkel, M. Ghebre, and M. Sulkowski, Thin Solid Films **392**, 91 (2001).

- [19] D. Mergel, W. Stass, G. Ehl, and D. Barthel, *Applied Physics* **88**, 2437 (2000).
- [20] D. H. Choi, M. J. Keum, A. R. Jeon, and J. K. Han, *J. Korean Surface Soc.* **30**, 144 (2007).
- [21] Y. H. Ko, D. H. Ju, and J. S. Yu, *J. Korean Vac. Soc.* **21**, 99 (2012).
- [22] C. G. Choi, K. No, W.-J. Lee, H.-G. Kim, S. O. Jung, W. J. Lee, W. S. Kim, S. J. Kim, and C. Yoon, *Thin Solid Films* **258**, 274 (1995).
- [23] I. Hamberg, C. G. Granqvist, K.-F. Berggren, B. E. Sernelius, and L. Engstrom, *Vacuum* **35**, 207 (1985).
- [24] I.-Y. Lee and K.-A. Lee, *Optical Soc. of Korea Summer Conference Proceedings* 176 (2000).
- [25] M. S. Lee, *Kumoh National. Inst. of Tech. Thesis for a degree* (2010).
- [26] M. H. An, *Information & Communication Engineering* **10**, (2005).
- [27] M. Bender, W. Seelig, C. Daube, H. Frankenberger, B. Ocker, and J. Stollenwerk, *Thin Solid Films* **326**, 72 (1998).
- [28] L. Zhao, Z. Zhou, H. Peng, and R. Cui, *Appl. Surface Sci.* **252**, 385 (2005).
- [29] P. Sujatha Devi, M. Chatterjee, and D. Ganguli, *Mat. Latt.* **55**, 205 (2002).
- [30] A. K. Kukarni, K. H. Schulz, T. S. Lim, and M. Khan, *Thin Solid Films* **345**, 273 (1999).
- [31] S. S. Kim, S. Y. Choi, C. G. Park, and H. W. Jin, *Thin Solid Films* **347**, 155 (1999).
- [32] 이혜정, 손창길, 유나름, 한용규, 정세훈, 이수범, 임정은, 이준호, 송기백, 오필용, 정진만, 고병덕, 문민욱, 박원배, 최은하, *한국전기전자재료학회 춘계학술대회* 135 (2005).

Properties of Indium Tin Oxide Thin Films According to Oxygen Flow Rates by γ -FIB System

D. H. Kim^a, C. H. Son^a, M. S. Yun^a, K. A. Lee, T. H. Jo^a, I. W. Seo^a, H. S. Uhm^a,
 I. T. Kim^b, E. H. Choi^a, G. S. Cho^a, and G. C. Kwon^{a*}

^a*Department of Electrophysics, Kwangwoon University, Seoul 139-875*

^b*Department of Chemistry, Kwangwoon University, Seoul 139-875*

(Received September 19, 2012, Revised October 27, 2012, Accepted October 28, 2012)

Indium Tin Oxide (ITO) thin films were prepared by RF magnetron sputtering with different flow rates of O₂ gas from 0 to 12 sccm. Electrical and optical properties of these films were characterized and analyzed. ITO deposited on soda lime glass and RF power was 2 kW, frequency was 13.56 MHz, and working pressure was 1.0×10⁻³ Torr, Ar gas was fixed at 1,000 sccm. The transmittance was measured at 300~1,100 nm ranges by using Photovoltaic analysis system. Electrical properties were measured by Hall measurement system. ITO thin films surface were measured by Scanning electron microscope. Atomic force microscope surface roughness scan for ITO thin films. ITO thin films secondary electron emission coefficient(γ) was measured by γ -Focused ion beam. The resistivity is about 2.4×10⁻⁴ Ω · cm and the weighted average transmittance is about 84.93% at 3 sccm oxygen flow rate. Also, we investigated Work-function of ITO thin films by using Auger neutralization mechanism according to secondary electron emission coefficient(γ) values. We confirmed secondary electron emission peak at 3 sccm oxygen flow rate.

Keywords : Indium tin oxide, Thin film, Transparence conductive oxide, RF magnetron sputter, γ -Focused ion beam system

* [E-mail] gckwon@kw.ac.kr