

산소 유입 없이 RF 스퍼터로 증착한 고품질 ITO 박막의 두께와 열처리 온도에 따른 박막의 특성 변화

성지하, 김형민, 신성민, 김경환, 홍정수 

가천대학교 전기공학과

Effects of Film Thickness and Post-Annealing Temperature on Properties of the High-Quality ITO Thin Films with RF Sputtering Without Oxygen

Jiha Seong, Hyungmin Kim, Seongmin Shin, Kyunghwan Kim, and Jeongsoo Hong

Department of Electrical Engineering, Gachon University, Seongnam 13120, Korea

(Received February 10, 2024; Revised February 20, 2024; Accepted February 22, 2024)

Abstract: In this study, ITO thin films were fabricated on a glass substrate at different thicknesses without introducing oxygen using RF sputtering system. The structural, electrical, and optical properties were evaluated at various thicknesses ranging from 50 to 300 nm. As the thickness of deposited ITO thin film become thicker from 50 to 100 nm, carrier concentration, mobility, and band gap energy also increased while the resistivity and transmittance decreased in the visible light region. When the film thickness increased from 100 to 300 nm, the carrier concentration, mobility, and band gap energy decreased while the resistivity and transmittance increased. The optimum electrical properties were obtained for the ITO film 100 nm. After optimizing the thickness, the ITO thin films were post-annealed at different temperatures ranging from 100 to 300°C. As the annealing temperature increased, the ITO crystal phase became clearer and the grain size also increased. In particular, the ITO thin film annealed at 300°C indicated high carrier concentration ($4.32 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$), mobility ($9.01 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$) and low resistivity ($6.22 \times 10^{-4} \Omega\cdot\text{cm}$). This means that the optimal post-annealing temperature is 300°C and this ITO thin film is suitable for use in solar cells and display application.

Keywords: ITO, Thickness, Post-annealing, RF sputtering

1. 서론

투명 전도성(transparent conducting oxide, TCO) 박막은 높은 전기 전도성과 가시광선에서 높은 광 투과율을 보이는 특성을 가지고 있기 때문에 다양한 광전자 소자의 투명 전극으로서 많은 관심을 받고 있다. 대표적인 TCO 박

막에는 ITO와 ZnO 계열의 Al-doped ZnO (AZO), Ga-doped ZnO (GZO)와 같은 소재가 많이 연구되어 왔으며 이 중에서 인듐 주석 산화물(indium tin oxide, ITO)은 가장 흔히 사용되는 TCO 물질이다 [1-3]. ITO는 산화인듐(In_2O_3)과 산화주석(SnO_2)을 혼합해 산소공공이 생성될 때 이 공공을 통해 전자와 정공이 이동해 전기가 흐르도록 하는 재료이다. 이는 낮은 전기 비저항과 가시광선 영역에서의 높은 광 투과율, 그리고 넓은 밴드갭(3.4~4.3 eV)을 가진다 [4]. 또한 ITO 박막은 우수한 전기 전도성을 갖는 n형 반도체로 태양전지, 유기발광 다이오드(OLED) 등 투명하

✉ Jeongsoo Hong; hongjs@gachon.ac.kr

Copyright ©2024 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

고 유연한 광전자 소자 제조 기술에 널리 활용되어 왔다 [5,6]. 이렇듯 다양한 분야에 ITO 박막을 적용하기 위해서는 ITO 박막의 전기적, 광학적, 결정학적 특성을 정확히 측정하고, 분야에 따라 우수한 특성을 적용시킬 수 있어야 한다.

ITO 박막의 증착 방법으로는 chemical vapor deposition (CVD), Pulsed laser deposition (PLD), thermal evaporation 그리고 스퍼터링법이 있다 [7-10]. 이 중에서도 스퍼터링법은 비교적 낮은 온도에서 공정이 가능하며 높은 증착률과 균일한 박막을 제작할 수 있기 때문에 가장 많이 사용되는 증착 기술이다. 또한 RF 스퍼터링법은 RF 파워, 공정 압력, 산소 및 아르곤의 분압, 기판 온도 등 다양한 스퍼터링 조건을 조절함으로써 박막의 특성을 달리 할 수 있다. 특히 ITO 박막은 스퍼터링 과정에서 산소 공공의 증가로 인해 저항이 약간 높아질 수 있어 이를 방지하기 위해 스퍼터링 시 소량의 산소를 넣어 반응성 가스로 사용한다 [11].

본 연구에서는 증착 시 산소를 유입시키지 않고 RF 스퍼터링을 통해 유리기판 위 ITO 박막을 증착하였고, 공정 시 증착 시간을 달리하여 제작된 ITO 박막의 다양한 두께에 따른 박막의 전기적 및 광학적 특성 변화와 구조적 특성 변화의 관계를 조사하여 우수한 특성을 나타내는 최적의 ITO 박막 두께를 결정하였다. 또한 최적 두께로 제작된 ITO 박막을 전기로에서 각각 100°C, 200°C, 300°C로 1시간 동안 열처리함으로써 열처리 온도의 변화에 따른 전기적 및 광학적 특성 변화와 구조적 특성 변화 양상을 살펴보고, 최적의 열처리 온도를 설정하였다. 결론적으로 본 연구에서는 공정과정에서 산소를 추가하지 않고 박막 두께와 열처리 온도 조건을 최적화하여 태양전지나 차세대 디스플레이에 응용될 수 있는 고성능 ITO 박막을 제작하였다.

2. 실험 방법

2.1 ITO 박막 제작

각각의 ITO 박막은 RF 스퍼터링 시스템을 사용하여 소다석회 유리기판(75 mm × 25 mm × 1 mm) 위에 4인치 ITO 타겟(99.99%)으로 증착되었다. 유리기판은 아이소프로필 알코올과 아세톤으로 5분간 초음파 세척한 후 탈이온수로 행구었으며 워터마크 제거를 위해 N₂ 가스로 탈이온수를 증발시킨 후 최종적으로 오븐에서 15분간 건조하였다. 표 1은 ITO 박막의 스퍼터링 조건을 나타낸다. 스퍼터링을 위해 4인치 ITO 타겟에 RF 파워를 인가하였으며, 챔버 내의 베이스 압력을 5×10^{-6} Torr 이하로 유지한 후 Ar

Table 1. Sputtering conditions for ITO thin films.

Parameters	Conditions
Thickness	50, 100, 150, 200, 300 nm
Targets	ITO (99.99%)
Substrate	Soda-lime glass
Input power	100 W
Working pressure	5 mTorr
Base pressure	5×10^{-6} Torr
Gas flow	Ar: 20 sccm, O ₂ : 0 sccm

가스를 20 sccm 유입시켜 공정 압력을 5 mTorr로 맞추었다. 본 연구에서는 산소 유입이 없을 때 박막의 두께에 따른 영향을 파악하기 위해 스퍼터링 파워는 100 W로 고정되었고 증착된 ITO 박막의 두께가 50, 100, 150, 200, 300 nm가 되도록 증착 시간을 각각 조정하였다. 또한 증착 이후 후열처리 온도에 따른 특성 변화를 알아보기 위해 최적 두께의 ITO 박막을 전기로를 사용하여 온도 상승, 하강 시간을 15분으로 설정하고 100°C, 200°C, 300°C의 다양한 온도에서 1시간 동안 각각 열처리를 진행하였다.

2.2 ITO 박막 평가

박막의 두께를 최적화하기 위해 다양한 두께로 증착된 박막의 전기적, 광학적, 구조적 특성을 분석하였다. 박막의 전기적 특성은 홀 효과 측정 장비(hall effect measurement system, ECOPIA, Anyang-si, Republic of Korea)를 사용하여 평가하였고, 투과율 및 광학 밴드갭 에너지와 같은 샘플의 광학적 특성은 UV-vis 분광계(JASCO V-730 UV/vis Spectrophotometer, TS Science, Seoul, Republic of Korea)를 사용하여 평가하였다. 구조적 특성에서 표면 형태 관찰을 위해 주사전자현미경(SEM, SU8600, Hitachi, Tokyo, Ja-pan)을 사용하였으며 결정학적 특성은 XRD (Smartlab, Rigaku, Tokyo, Japan)를 사용하여 조사하였다. 제작된 ITO 박막의 두께는 Alpha-Step profilometer (Alpha-Step-500 Profiler, KLA-Tencor, CA, USA)를 사용하여 측정되었다. 증착 이후 최적화된 박막 두께에서의 최적의 후열처리 온도 조건을 결정하기 위해 전기로(LAB HOUSE muffle furnace, LABNSHOP, Uiwang-si, Republic of Korea)를 사용하여 다양한 온도에서 열처리하고, 위와 같은 장비를 사용하여 ITO 박막의 전기적, 광학적 및 구조적 특성을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 다양한 두께에 따른 ITO 박막 평가

그림 1은 100 W의 RF 전력 하에 다양한 두께로 증착된 ITO 박막의 XRD 패턴이다. 박막의 두께가 50 nm인 경우와 100 nm인 경우에 거의 유사한 XRD 패턴을 보였으며 결정화되지 않은 비정질 상이 나타났다. 박막의 두께가 150 nm로 증가함에 따라 (222), (400), (440), (622)면에 대응하는 In_2O_3 피크가 보였다 (JCPDS 89-4595). 이는 ITO 타겟의 성분이 그대로 박막에 증착되었음을 나타낸다. ITO 박막의 두께가 200 nm 이상으로 증가하면서 (222) 방향으로 우선 성장한 In_2O_3 피크와 (211), (400), (440), (622)면에 대응하는 In_2O_3 피크가 나타났고, 300 nm의 박막에서는 In_2O_3 피크의 강도가 커지고 동시에 결정화되기 시작한 다른 약한 피크들이 관찰되었다 (JCPDS 71-2194). 즉 박막의 두께가 증가함에 따라 비정질에서 결정질로 변화하였다 [12].

XRD 데이터를 바탕으로 Scherrer 방정식을 사용하여 샘플의 결정립 크기를 계산하였다 [13]. Scherrer 방정식

은 식 (1)과 같다.

$$\tau = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1)$$

β 는 반치전폭(full width at half maximum, FWHM), τ 는 결정 크기, θ 는 Bragg 각도, K 는 Scherrer 상수로 (0.9), 그리고 λ 는 X-ray 파장 길이를 의미한다. 표 2는 다양한 두께로 증착된 ITO 박막의 계산된 결정립 크기를 나타내었다.

그림 2(a)~(e)는 100 W의 RF 전력 하에 다양한 두께로 증착된 ITO 박막의 표면을 측정된 SEM 이미지들이다. SEM 이미지를 통해 증착된 ITO 박막들은 모두 고르고 균일한 표면을 나타내었다. 하지만 두께에 따라 큰 차이는 나타나지 않았으며, 이는 추가적인 특성의 평가가 필요함을 나타낸다.

그림 3은 100 W의 RF 전력 하에 다양한 두께로 증착된 ITO 박막의 캐리어 농도, 이동도, 비저항 등의 전기적 특성을 보여준다. 표 3은 그림 3에 나타난 전기적 특성의 값을 정리한 것이다. 모든 ITO 박막은 10^{21} cm^{-3} 이상의 높은 캐리어 농도를 나타내었고 100 nm 이상의 두께에선 큰 차이를 나타내지 않았다. 다양한 두께의 박막 샘플들 중에서 두께가 100 nm인 ITO 박막이 $2.03 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 의 가장 높은 캐리어 농도 값을 가졌고, $7.64 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 의 가장 낮은 비저항과 $4.02 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 의 높은 이동도를 보였다. 그러나 박막의 두께가 100 nm에서 300 nm로 증가함에 따라 캐리어 농도는 감소하는 경향을 보였고 반대로 비저항은 증가하는 경향을 보였다. 이는 두께가 증가할수록 자동 도핑된 캐리어 농도가 감소한 것으로, 변형(strain)이 감소하고 결정성이 좋아지면서 박막 내 자동 도핑 결함 농도가 낮아짐을 의미한다 [14].

그림 4(a), (b)는 300~800 nm의 파장 범위에서 측정된 다양한 두께의 ITO 박막 UV-vis 스펙트럼을 나타낸다. 그림 4(a)는 각각 50, 100, 150, 200, 300 nm의 두께로 증착된 ITO 박막의 광 투과도를 보여주며 샘플은 모두 100 W의 RF 전력 조건하에 증착되었다. 모든 ITO 박막은 가시광선 영역에서 80% 이상의 우수한 투과율을 나타냈다. 박막의 두께가 50 nm에서 100 nm로 증가함에 따라 400~800 nm 파장 범위의 평균 투과도는 감소하였고, 이는 더 두꺼운 박막에서 자유 캐리어 흡수로 인한 박막의 캐리어 밀도 증가에 의한 것으로 표 3의 결과와 일치한다 [15]. 반대로 박막의 두께가 100 nm에서 300 nm로 증가할 때 평균 투과도는 증가하였다. 이는 결정성이 향상되면서 가시광 영역에서의 광학적 특성이 좋아진 것이다. 또한

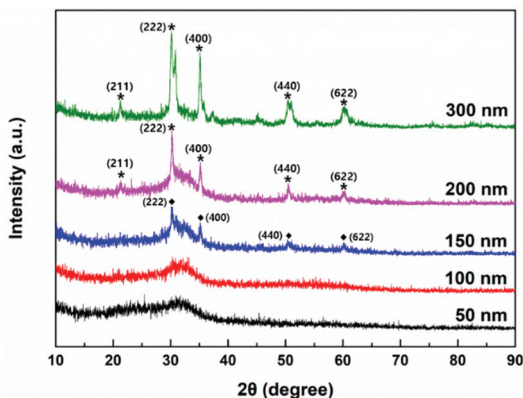


Fig. 1. XRD patterns of ITO thin films deposited with different thickness.

Table 2. Calculated grain sizes of ITO films deposited at various thickness.

Thickness (nm)	Grain size (nm)
50	Amorphous
100	Amorphous
150	18.39
200	26.24
300	14.97

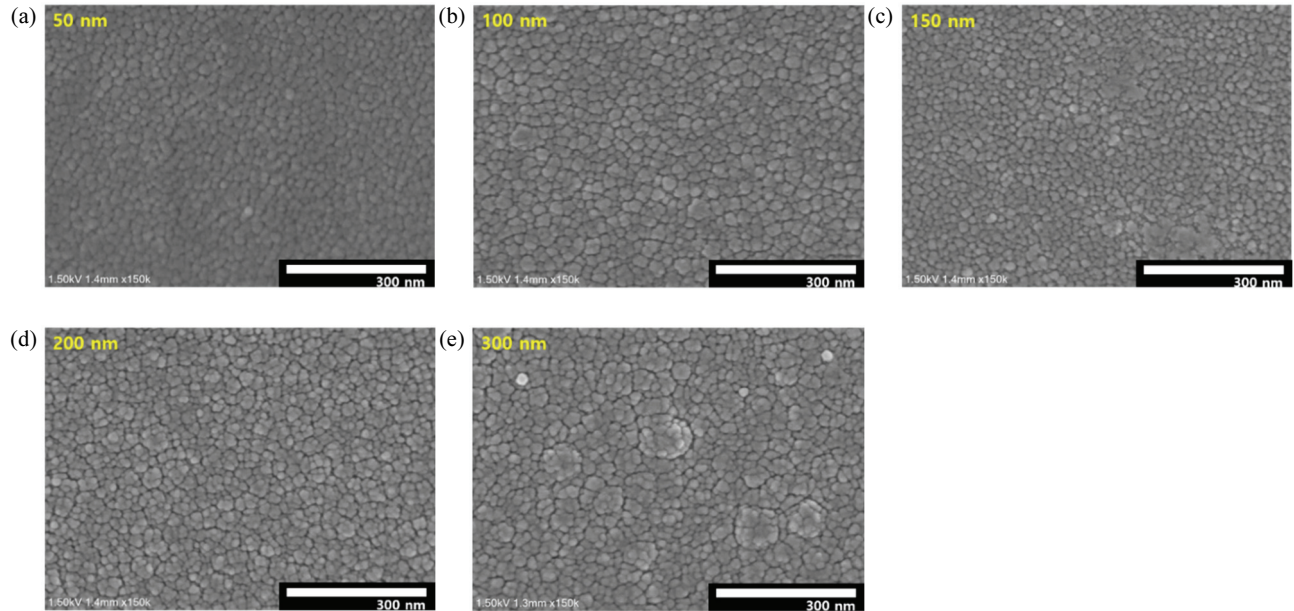


Fig. 2. SEM surface morphology images of ITO thin films deposited with different thickness (a) 50 nm, (b) 100 nm, (c) 150 nm, (d) 200 nm, and (e) 300 nm.

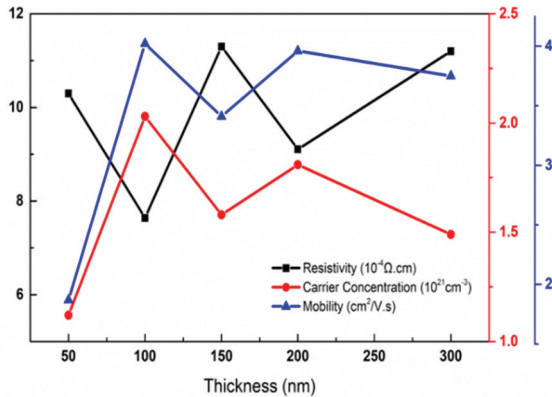


Fig. 3. Variation of the resistivity, carrier concentration and Hall mobility of ITO thin films deposited with different thickness.

Table 3. Electrical properties of ITO thin films deposited with different thickness.

Thickness (nm)	Carrier concentration ($\times 10^{21} \text{cm}^{-3}$)	Mobility ($\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$)	Resistivity ($\times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$)
50	1.12	1.87	10.3
100	2.03	4.02	7.64
150	1.58	3.50	8.99
200	1.47	3.46	9.49
300	1.34	3.41	9.87

모든 ITO 박막은 단파장 영역에서 굴곡진 투과율의 흡수단을 보였으며 이는 전도대와 가전자대 사이에서 전자의 직접 전이와 관련된 것이다 [16].

$$\alpha h\nu = \beta (h\nu - E_g) \quad (2)$$

그림 4(b)는 다양한 두께를 갖는 ITO 박막의 광학적 밴드 갭 에너지를 보여준다. 광학 밴드 갭 에너지는 식 (2) Tauc plot 방정식을 사용하여 계산되었으며, Tauc plot은 에너지에 대해 적절하게 플롯된 광학 흡광도 데이터를 기반으로 밴드 갭을 결정하는 데 사용되었다 [17]. 식 (2)에서 h 는 플랑크 상수, α 는 흡수계수, ν 는 광자의 주파수, E_g 는 밴드 갭, β 는 선형 영역에서 Tauc plot의 기울기, 그리고 n 은 전이 유형에 따라 달라지는 전력 계수이다. ITO 박막은 직접 전이를 가지므로 식 (2)에서는 $n=1/2$ 을 사용하였다. 모든 ITO 박막은 평균 3.45 eV의 광학 밴드갭 에너지를 가졌다. 50 nm 박막의 경우 3.53 eV에서 100 nm 박막의 경우 3.66 eV로 두께 증가에 따라 광학적 밴드 갭 에너지가 증가하였고, 100 nm의 박막에서 가장 큰 밴드 갭 에너지를 나타냈다. 광학적 밴드 갭 에너지의 증가는 박막 두께 증가에 따른 캐리어 농도의 증가와 비저항 감소로 설명할 수 있으며 이는 표 3의 결과와 일치한다 [18].

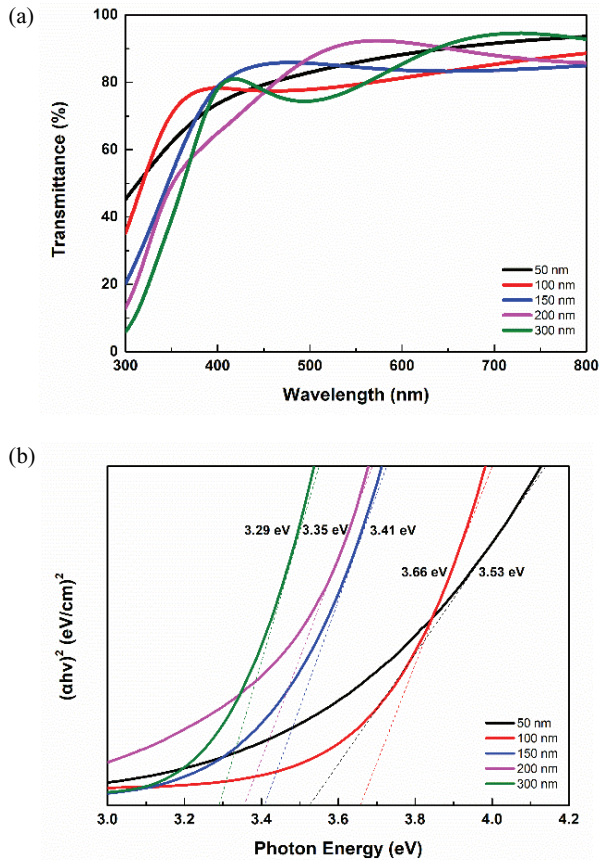


Fig. 4. UV-vis spectra and optical band gap energy of the ITO thin films: (a) UV-vis spectra of ITO thin films deposited with different thickness and (b) optical band gap energy of ITO thin films deposited with different thickness.

3.2 다양한 온도에서 열처리한 ITO 박막 평가

적절한 온도에서의 열처리는 내부 결함을 줄여 박막의 품질을 향상시킬 수 있다 [19]. 특히 박막의 구조적 특성의 경우 후 열처리 온도에 크게 의존하며 전기적 특성의 경우 박막의 미세 구조 및 결정성과 관련이 있다. 따라서 ITO 박막의 구조적 및 전기적 특성 변화를 확인하기 위해 전기로를 이용한 열처리를 진행하였다. 열처리가 진행된 ITO 박막의 두께는 100 nm로 $2.03 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 의 가장 높은 캐리어 농도, $7.64 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 의 가장 낮은 비저항과 $4.02 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 의 높은 이동도 그리고 3.66 eV의 높은 밴드갭 에너지를 나타냈기 때문이다.

그림 5는 실온과 100, 200, 300°C에서 후열처리된 ITO 박막의 XRD 패턴을 보여준다. ITO 박막은 100 nm의 두께로 증착되었다. 열처리 온도가 100°C인 경우 열처리하

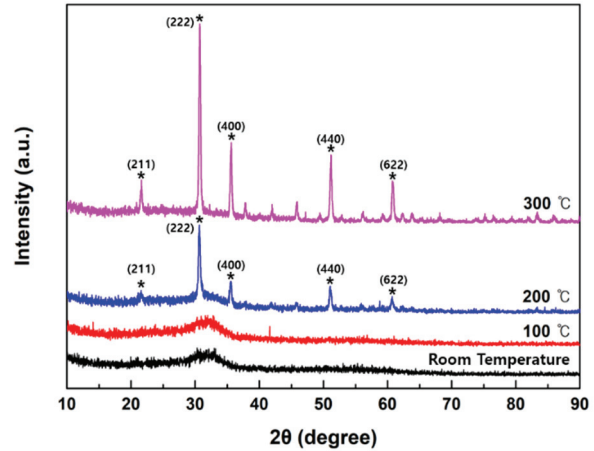


Fig. 5. XRD patterns of ITO thin films post-annealed at different temperatures in the range of room temperature 300°C (*: ITO).

지 않은 ITO 박막과 유사하게 결정화되지 않은 비정질 상이 나타났다. 그러나 열처리 온도가 200°C로 높아짐에 따라 (222) 방향으로 우선 배향하며 (211), (400), (440), (622)면에 대응하는 ITO 결정 피크를 관찰할 수 있었고, 온도가 높아질수록 피크 강도 또한 증가하였다 (JCPDS 71-2194). 열처리 온도를 300°C로 증가시키면 200°C에서는 비교적 잘 보이지 않던 (211) 피크가 뚜렷하게 보였으며 결정구조에는 큰 변화 없이 (222)면에 대응하는 피크 세기가 크게 증가하였다. 이는 열처리 온도가 증가할수록 결정립 크기 또한 증가했음을 나타낸다. 이러한 결과는 후 열처리 온도가 증가함에 따라 박막의 결정성이 향상됨을 의미한다 [20].

그림 6은 실온과 100, 200, 300°C에서 후 열처리된 100 nm ITO 박막의 표면을 측정한 SEM 이미지들을 보여준다. ITO 박막을 200°C의 온도에서 열처리하였을 때 박막 표면에서는 그림 6(b)와 같이 하얀 점들이 나타났다. 또한 열처리 온도가 100°C에서 300°C로 증가함에 따라 결정화되면서 박막 표면에 보이는 결정립의 크기가 증가하였다. 이는 그림 5의 XRD 패턴에서 열처리 온도의 증가에 따른 ITO 피크 세기의 증가 및 결정립 크기 증가 결과와 일치한다.

그림 7은 열처리 온도에 따른 ITO 박막의 캐리어 농도, 비저항, 이동도 변화를 보여준다. 표 4는 그림 7에 나타난 전기적 특성의 값을 정리한 것이다. 100°C에서 열처리된 박막은 열처리하지 않은 박막보다 높은 캐리어 농도와 이동도를 보였다. 또한 열처리 온도가 100°C에서 300°C로 증가함에 따라 캐리어 농도와 이동도가 증가했으며 특히 300°C에서 열처리된 박막의 캐리어 농도와 이동도는 각각 $4.32 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 과 $9.01 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 로 200°C에서 열처리했

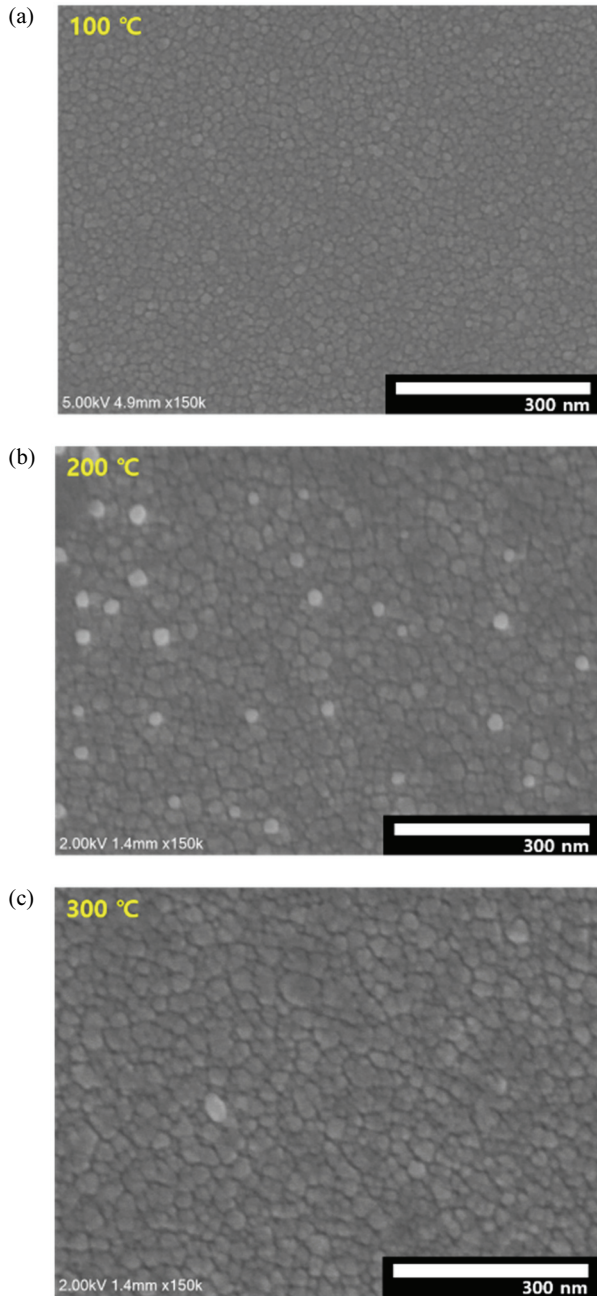


Fig. 6. SEM surface morphology images of ITO thin films post-annealed at different temperatures (a) 100°C, (b) 200°C, and (c) 300°C.

을 때 보다 비교적 크게 증가하였다. 또한 열처리 온도가 상승할수록 비저항은 감소하는 경향을 보였고, 300°C에서 열처리된 박막에서 가장 낮은 $6.22 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 의 비저항 값을 가졌다. 이는 박막의 전기적 특성과 구조 및 결정성 사이의 관계로 설명할 수 있다 [21]. 열처리 온도가

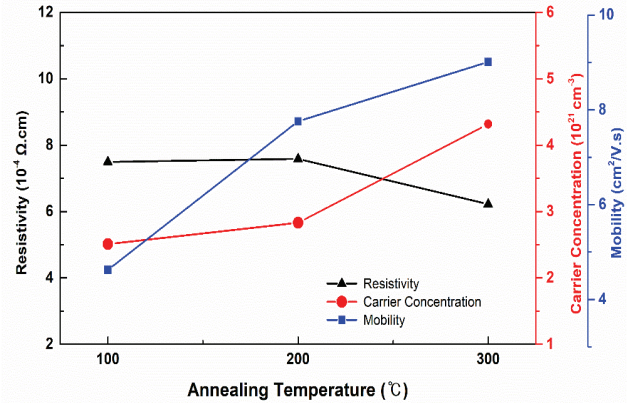


Fig. 7. Variation of the resistivity, carrier concentration and Hall mobility of ITO thin films post-annealed at different temperatures.

Table 4. Electrical properties of ITO thin films post-annealed at different temperatures.

Temperature	Carrier concentration ($\times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$)	Mobility ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	Resistivity ($\times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$)
R.T.	2.03	4.02	7.64
100°C	2.51	4.62	7.50
200°C	2.83	7.76	7.59
300°C	4.32	9.01	6.22

증가함에 따라 박막의 결정립 크기 또한 증가하게 되고 결정립계는 감소하게 되면서 캐리어 농도와 이동도가 증가하여 비저항이 감소하는 것이다. 즉 비저항의 감소는 열처리 온도에 따른 XRD 피크 세기의 증가에서 볼 수 있듯이 결정성 향상과 연관성이 있으며 이는 그림 5의 XRD 패턴과 그림 6의 SEM 이미지 결과와도 일치한다.

그림 8은 실온과 100, 200, 300°C에서 후 열처리된 100 nm ITO 박막의 UV-vis 스펙트럼과 광학적 밴드 갭 에너지를 보여준다. ITO 박막의 투과율은 열처리를 하지 않았을 때보다 감소하였는데, 이는 열처리가 진행됨에 따라 산란의 증가로 인한 투과율 감소이다 [22]. 하지만 열처리 온도가 100°C에서 300°C로 증가할수록 ITO 박막의 투과율은 증가하였다. 또한 열처리 온도가 증가함에 따라 투과율의 흡수단이 단파장 쪽으로 이동하였다. 이는 그림 8(b)와 같이 광학적 에너지 밴드 갭이 100°C에서 3.73 eV, 200°C에서 3.76 eV, 300°C에서 3.92 eV로 열처리 온도가 높아질수록 광학적 밴드 갭 또한 증가함을 의미한다 [23].

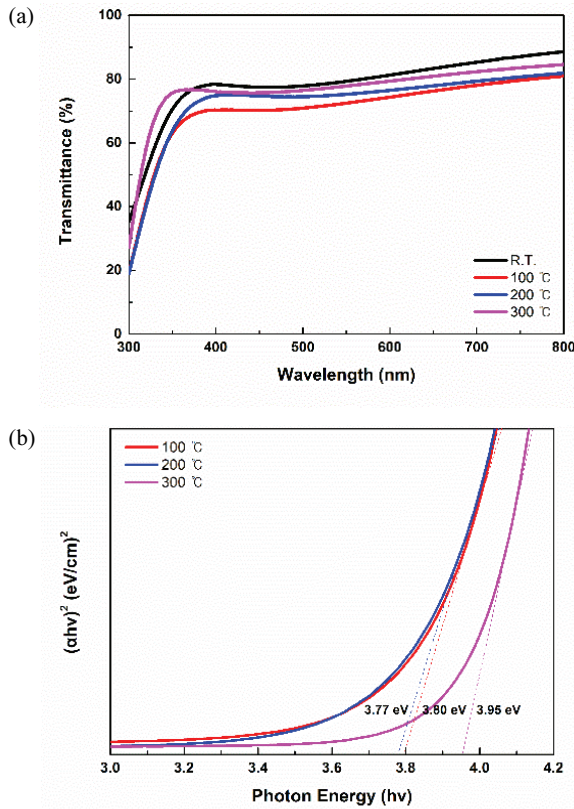


Fig. 8. UV-vis spectra and optical band gap energy of the ITO thin film: (a) UV-vis spectra of the thin film post-annealed at different temperatures and (b) optical band gap energy of the thin film post-annealed at different temperatures.

4. 결론

본 연구에서는 산소 유입 없이 RF 스퍼터링으로 증착된 ITO 박막의 구조적, 전기 및 광학적 특성을 평가하여 고품질 ITO 박막 제작을 위한 최적의 두께와 열처리 온도를 결정하였다. 50~300 nm의 다양한 두께로 증착된 ITO 박막은 모든 두께에서 80% 이상의 투과율을 보였다. 성장된 ITO 박막들 중 가장 높은 캐리어 농도를 가지는 박막은 100 nm 두께의 ITO 박막으로, $2.03 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 의 값을 나타냈다. 또한 이는 $7.64 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 의 낮은 비저항 값과 3.66 eV의 넓은 밴드 갭 에너지를 가졌다. 이후 박막의 품질 향상 및 구조적, 전기적 특성 변화를 확인하기 위해 100~300°C의 다양한 온도에서 후 열처리를 진행하였다. 열처리 온도가 200°C일 때 다른 결정상 없이 ITO 피크만이 나타났고, 300°C로 온도가 증가함에 따라 ITO 피크의 세기가 크게 증가하였으며 결정립 크기 또한 증가하였다. 또한 300°C에서 캐리어 농도, 이동도, 비저항 값이 $4.32 \times$

10^{21} cm^{-3} , $9.01 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, $6.22 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 로 열처리를 하지 않았을 때보다 좋은 전기적 특성을 보였다. 광학적 특성의 경우 평균 80%의 투과율과 3.92 eV의 높은 밴드 갭 에너지를 가졌다. 따라서 100 W RF 전력으로 제작된 100 nm 두께의 ITO 박막은 300°C의 온도에서 열처리를 거쳐 우수한 특성을 나타냈으며 이는 광전지나 차세대 디스플레이 응용 분야에 적용될 수 있을 것으로 보인다.

ORCID

Jeongsoo Hong

<https://orcid.org/0000-0002-5946-7815>

감사의 글

이 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원(RS-2023-00227306) 및 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0012451, 2022년 산업혁신인재성장지원사업).

REFERENCES

- [1] Z. Ghorannevis, E. Akbarnejad, and M. Ghoranneviss, *J. Theor. Appl. Phys.*, **9**, 285 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1007/s40094-015-0187-3>
- [2] F. Wang, M. Z. Wu, Y. Y. Wang, Y. M. Yu, X. M. Wu, and L. J. Zhuge, *Vacuum*, **89**, 127 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2012.02.040>
- [3] Z. Z. You and G. J. Hua, *J. Alloys Compd.*, **530**, 11 (2012).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.03.078>
- [4] T. S. Sathiaraj, *Microelectron. J.*, **39**, 1444 (2008).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2008.06.081>
- [5] J. Hotovy, J. Hüpkes, W. Böttler, E. Marins, L. Spiess, T. Kups, V. Smirnov, I. Hotovy, and J. Kováč, *Appl. Surf. Sci.*, **269**, 81 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.10.180>
- [6] S. I. Kim, K. W. Lee, B. B. Sahu, and J. G. Han, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **54**, 090301 (2015).
doi: <https://doi.org/10.7567/JJAP.54.090301>
- [7] T. Maruyama and K. Fukui, *Thin Solid Films*, **203**, 297 (1991).
doi: [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(91\)90137-M](https://doi.org/10.1016/0040-6090(91)90137-M)
- [8] J. H. Kim, K. A. Jeon, G. H. Kim, and S. Y. Lee, *Appl. Surf. Sci.*, **252**, 4834 (2006).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.07.134>
- [9] L. Kerkache, A. Layadi, E. Dogheche, and D. Rémiens, *J. Phys.*

- D: Appl. Phys.*, **39**, 184 (2005).
doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/1/027>
- [10] J. Du, X. L. Chen, C. C. Liu, J. Ni, G. F. Hou, Y. Zhao, and X. D. Zhang, *Appl. Phys. A*, **117**, 815 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1007/s00339-014-8436-x>
- [11] A. Pokaipisit, M. Horprathum, and P. Limsuwan, *Songklanakarinn J. Sci. Technol.*, **31**, 577 (2009).
- [12] J. O. Park, J. H. Lee, J. J. Kim, S. H. Cho, and Y. K. Cho, *Thin Solid Films*, **474**, 127 (2005).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2004.08.172>
- [13] S. Fatimah, R. Ragadhita, D.F.A. Husaeni, and A.B.D. Nandiyanto, *ASEAN J. Sci. Eng.*, **2**, 65 (2022).
doi: <https://doi.org/10.17509/ajse.v2i1.37647>
- [14] J. M. Myoung, W.H.Y. Lee, I. Yun, and S.H.B. Lee, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41**, 28 (2002).
doi: <https://doi.org/10.1143/JJAP.41.28>
- [15] H. A. Mohamed, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **40**, 4234 (2007).
doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/14/019>
- [16] S. N. Bai and T. Y. Tseng, *Thin Solid Films*, **515**, 872 (2006).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2006.07.048>
- [17] J. Hong, K. I. Katsumata, and N. Matsushita, *J. Electron. Mater.*, **45**, 4875 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1007/s11664-016-4751-7>
- [18] H. Kim, J. S. Horwitz, G. Kushto, A. Piqué, Z. H. Kafafi, C. M. Gilmore, and D. B. Chrisey, *J. Appl. Phys.*, **88**, 6021 (2000).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.1318368>
- [19] C. C. Chang, *Thin Solid Films*, **311**, 304 (1997).
doi: [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(97\)00677-9](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(97)00677-9)
- [20] S. Song, T. Yang, J. Liu, Y. Xin, Y. Li, and S. Han, *Appl. Surf. Sci.*, **257**, 7061 (2011).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.03.009>
- [21] A. P. Amalathas and M. M. Alkaisi, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, **27**, 11064 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1007/s10854-016-5223-9>
- [22] C. Guillén and J. Herrero, *Vacuum*, **80**, 615 (2006).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2005.10.006>
- [23] T. M. Hammad, *Phys. Status Solidi*, **206**, 2128 (2009).
doi: <https://doi.org/10.1002/pssa.200881781>