

## Ti 완충층 두께에 따른 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{Ti}$ 적층박막의 전기적, 광학적 특성 변화

문현주\* · 전재현\*\* · 공태경\* · 김대일\*<sup>†</sup>

\*울산대학교 첨단소재공학부, \*\*동국산업 주식회사

### Effect of Ti Buffer Layer Thickness on the Electrical and Optical Properties of $\text{In}_2\text{O}_3/\text{Ti}$ bi-layered Films

Hyun-Joo Moon\*, Jae-Hyun Jeon\*\*, Tae-Kyung Gong\*, Daeil Kim\*<sup>†</sup>

\*School of Materials Science and Engineering, University of Ulsan 680-749, Korea

\*\*Dongkook Ind. CO., Ltd Ulsan 683-804, Korea

**Abstract**  $\text{In}_2\text{O}_3/\text{Ti}$  bi-layered films were deposited on glass substrate at room temperature with radio frequency (RF) and direct current (DC) magnetron sputtering to consider the effect of Ti buffer layer on the electrical and optical properties. In a comparison of figure of merit,  $\text{In}_2\text{O}_3$  90 nm/Ti 10 nm thin films show the higher opto-electrical performance of  $3.0 \times 10^{-4} \Omega^{-1}$  than that of the  $\text{In}_2\text{O}_3$  single layer films ( $2.6 \times 10^{-4} \Omega^{-1}$ ). From the observed results, it is supposed that the  $\text{In}_2\text{O}_3$  90 nm/TiO<sub>2</sub> 10 nm bi-layered films may be an alternative candidate for transparent electrode in a transparent thin film transistor device.

(Received September 7, 2015; Revised October 7, 2015; Accepted October 12, 2015)

**Key words** :  $\text{In}_2\text{O}_3$ , Ti, Magnetron sputtering, Surface roughness, Figure of merit

### 1. 서 론

고해상도 표시소자의 영상 또는 이미지 구현에, 기존의 비정질 실리콘(Amorphous Silicon)은 증착공정이 용이하고 공정비용이 저렴하지만, 낮은 전하이동도와 광학적 불투명성 문제가 언급되고 있다[1]. 반면에 저온 다결정 실리콘(Low Temperature Polysilicon)은 상대적으로 전하이동도가 높지만, 균일한 대면적 증착이 어렵기 때문에 차세대 디스플레이를 구동할 투명 박막 트랜지스터(Transparent Thin Film Transistor; TTFT) 소재로는 한계에 부딪히고 있다[2].

최근 이러한 전기적, 광학적 문제점이 개선된 투명 박막 트랜지스터 전극재로 미량의 In과 Ga이 첨가된 ZnO(IGZO)와 Ti가 첨가된  $\text{In}_2\text{O}_3$ (TIO) 박막의 구조적, 전기적, 광학적 특성이 보고되었다[3, 4]. IGZO와 TIO 박막은 실온증착에서도 우수한 전하이동도와 높은 가시광 투과율을 동시에 가지며, 전기화학적 안정성으로 인하여 유연 디스플레이의 전극소재로도 개발되고 있다[5]. 특히 IGZO 또는 TIO 박막

의 전기적 특성은 박막 트랜지스터 및 표시소자의 성능구현에 있어 중요한 역할을 하기 때문에 산화물 완충층 또는 증착 후 열처리를 통한 박막의 전기적 특성 최적화 연구 또한 활발히 진행되고 있다[3, 6].

본 연구에서는  $\text{In}_2\text{O}_3/\text{Ti}$  적층박막을 투명 박막 트랜지스터 전극재로 활용하기 위하여 RF와 DC 마그네트론 스퍼터를 이용하여  $\text{In}_2\text{O}_3/\text{Ti}$  투명전극을 증착하고 Ti 완충층 두께변화에 따른 박막의 저온결정화(Low Temperature Crystallization), 가시광 투과도(Optical transmittance), 비저항(Electrical resistivity) 그리고 표면거칠기(Surface roughness)를 고찰하였다.

### 2. 실험방법

본 연구에서는 3인치 직경의  $\text{In}_2\text{O}_3$ (Purity 99.99%) 타겟과 Ti(Purity 99.5%) 타겟을 RF와 DC 마그네트론 스퍼터를 이용하여  $\text{In}_2\text{O}_3/\text{Ti}$  적층박막을 유리기판(Corning 1747,  $3 \times 3 \text{ cm}^2$ )에 증착하였다. 유리기판은 아세톤, 메탄올, 증류수의 순서로 초음파

<sup>†</sup>Corresponding author. E-mail : dkim84@ulsan.ac.kr  
Copyright © The Korean Society for Heat Treatment

**Table 1.** The deposition conditions of In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti bi-layered films

Parameters	Conditions	
Thickness (nm)	In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 100, 95, 90, 85,	Ti; 5, 10, 15,
Base pressure (Torr)	1.0×10 <sup>-6</sup>	
Deposition pressure	1.0×10 <sup>-3</sup>	
Power density (W/cm <sup>2</sup> )	RF, 3.5	DC, 1.5
Ar flow rate (sccm)	10	

세척을 10분간 실시하고 질소가스로 건조하였으며 자세한 증착 조건을 Table 1에 나타내었다.

In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 단층박막과 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti 적층박막의 두께는 단차 측정기(Dektak-150, Varian)로 측정하였고, 가시광 투과도(380-780 nm)는 자외선-가시광 분광도계(UV-Visible spectrophotometer, Cary100 Cone, Varian)를 사용하여 분석하였으며, 유리기판은 91%의 가시광 투과율을 보였다.

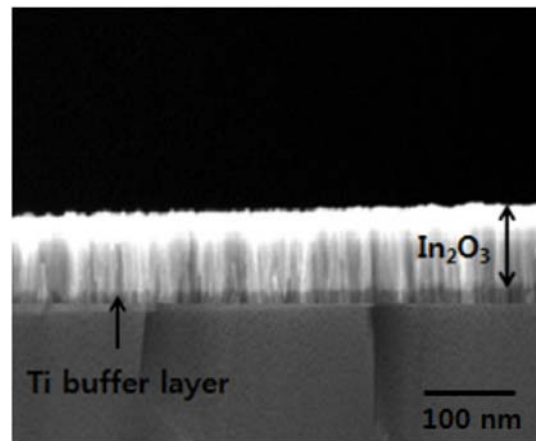
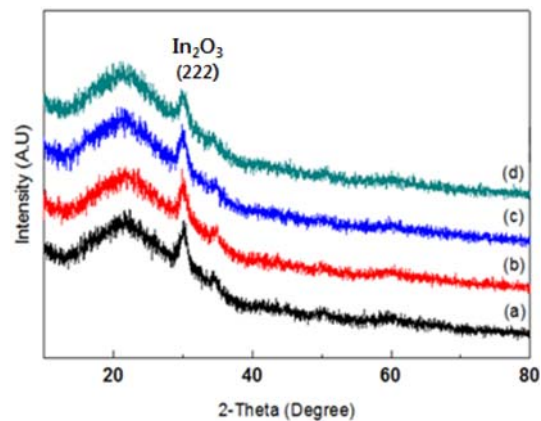
박막의 전기적 특성은 Van der Pauw 방법을 이용한 Hall 효과 측정기(HMS-3000, Ecopia)를 이용하여 전하농도와 이동도를 측정하였다.

Ti 완충층 두께에 따른 결정구조의 변화는 X선 회절분석기(X'pert PRO MRD, Philips, 한국기초과학지원연구원, KBSI 대구센터)로 측정하였으며, 박막의 절단면 구조와 표면거칠기(Root mean square (RMS) roughness)는 각각 전자주사현미경(JSM-820M JEOL)과 원자간력현미경(측정영역 2×2 μm<sup>2</sup>, XE-100, Park System)으로 측정하였으며, Figure of Merit(FOM)수치를 이용하여 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 단층박막과 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti 적층박막의 구조적, 전기적, 광학적 특성 변화를 고찰하였다.

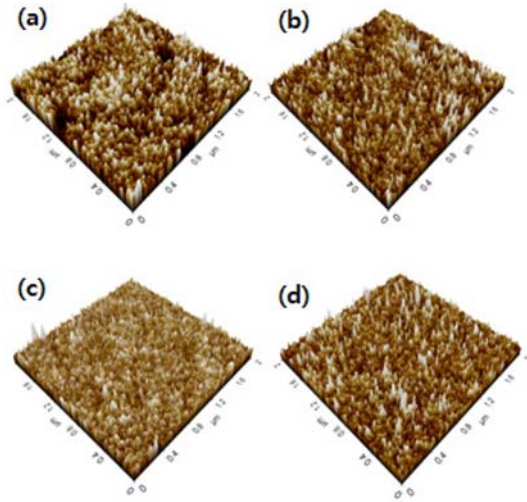
### 3. 실험결과

Fig. 1은 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti 적층박막의 절단면을 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)으로 분석한 이미지이며, Fig. 2는 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 단층박막과 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti 적층박막의 XRD 회절패턴 분석결과이다. Ti 완충층의 결정화를 의미하는 특정 회절피크는 검출되지 않았으며, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti 박막의 두께변화와 무관하게 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(222) 회절피크가 검출되어, 하부 Ti 완충층이 상부 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막의 결정화에 미치는 영향은 미미함을 알 수 있었다.

Fig. 3는 Ti 완충층 두께에 따른 박막의 표면형상

**Fig. 1.** Cross-sectional observation of In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti bi-layered films by using SEM.**Fig. 2.** XRD pattern of In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> single layer and In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti bi-layered films with different thickness. (a) In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 100 nm, (b) In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 95 nm/Ti 5 nm, (c) In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 90 nm/Ti 10 nm, (d) In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 85 nm/Ti 15 nm.

및 RMS 거칠기 측정결과이다. 거친 표면은 투명전극(Transparent and Conducting Oxide; TCO) 박막의 비저항 증가와 가시광 투과도 감소의 원인이 되므로 박막의 표면거칠기는 디스플레이 소자 적용에



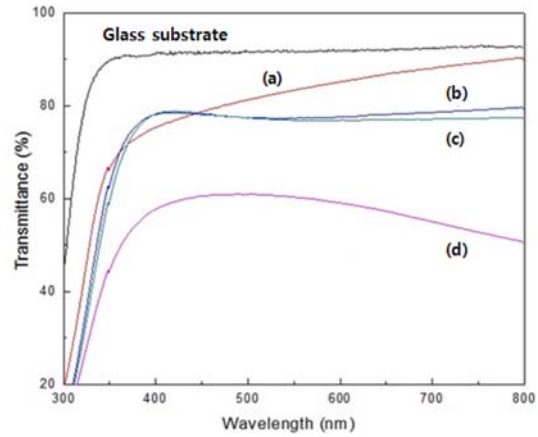
**Fig. 3.** Surface morphology (Scan area;  $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ ) of  $\text{In}_2\text{O}_3$  single layer and  $\text{In}_2\text{O}_3/\text{Ti}$  bi-layered films with different thickness. (a)  $\text{In}_2\text{O}_3$  100 nm, RMS roughness; 0.70 nm, (b)  $\text{In}_2\text{O}_3$  95 nm/Ti 5 nm, RMS roughness; 0.85 nm, (c)  $\text{In}_2\text{O}_3$  90 nm/Ti 10 nm, RMS roughness; 0.62 nm, (d)  $\text{In}_2\text{O}_3$  85 nm/Ti 15 nm, RMS roughness; 1.02 nm.

중요한 부분이다[6].

본 연구에서  $\text{In}_2\text{O}_3$  단층박막의 RMS 거칠기는 0.70 nm이었으나, Fig. 3(c)와 같이  $\text{In}_2\text{O}_3$  90 nm/Ti 10 nm인 박막에서는 가장 낮은 0.62 nm의 거칠기가 측정되었다. 이는 Ti 5 nm 완충층을 증착시켰을 때 거칠기가 0.85 nm이고, Ti 완충층의 두께가 15 nm로 증가함에 따라 1.02 nm로 다시 증가하는 경향을 보였다. 이를 통해 하부 Ti 완충층의 두께가 상부  $\text{In}_2\text{O}_3$  박막의 거칠기에 영향을 미치며[7], 본 연구에서 상대적으로 평탄한 표면을 확보할 수 있는 Ti 완충층 두께는 10 nm임을 알 수 있었다.

Fig. 4는  $\text{In}_2\text{O}_3$  단층박막과  $\text{In}_2\text{O}_3/\text{Ti}$  적층박막의 가시광 투과도 측정결과이다.  $\text{In}_2\text{O}_3$  단층박막의 가시광 영역의 광 투과도는 83.6%이고,  $\text{In}_2\text{O}_3$  85 nm/Ti 15 nm 적층박막의 가시광 투과도는 최소 57.8%로 감소하였다. 이는 비정질 Ti 완충층의 두께가 증가함(>10 nm)에 따라 가시광의 표면흡수율과 반사율이 증가하여 상대적으로 가시광 투과율이 감소된 것으로 사료된다.

일반적으로 투명전극 박막에서 전하농도가 증가하면 광학적 밴드갭이 확장되며 가시광 흡수단(Optical absorption edge)은 단파장(Blue shift) 쪽으로 이동



**Fig. 4.** Optical transmittance of  $\text{In}_2\text{O}_3$  single layer and  $\text{In}_2\text{O}_3/\text{Ti}$  bi-layered films with different thickness in the wavelength of 300-800 nm. (a)  $\text{In}_2\text{O}_3$  100 nm, (b)  $\text{In}_2\text{O}_3$  95 nm/Ti 5 nm, (c)  $\text{In}_2\text{O}_3$  90 nm/Ti 10 nm, (d)  $\text{In}_2\text{O}_3$  85 nm/Ti 15 nm.

함을 보인다[8]. 본 연구에서는 Ti 완충층에 의하여  $\text{In}_2\text{O}_3/\text{Ti}$  적층박막의 전하농도는 증가하였으나, 가시광 흡수단은 장파장(Red shift)쪽으로 이동함을 알 수 있었다. 이는 앞서 보고된 ITO/Ni/ITO 박막의 물성 연구와 같이[9], 상부 GZO 박막의 산소공공(Oxygen vacancy) 또는 Ga 불순물 치환에 따른 전하농도 증가가 아니라 Ti 완충층 도입에 따른 전하농도 증가로 인하여 장파장 쪽으로 이동한 것으로 사료된다.

Table 2에  $\text{In}_2\text{O}_3$  단층박막과  $\text{In}_2\text{O}_3/\text{Ti}$  적층박막에서 Ti 완충층 두께 변화에 따른 전기적 특성변화를 나타내었다.  $\text{In}_2\text{O}_3$  단층박막의 전하농도, 이동도, 비저항은 각각  $2.1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ ,  $4.7 \text{cm}^2/\text{Vs}$ ,  $6.5 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 로 측정되었다.

$\text{In}_2\text{O}_3$  90 nm/Ti 10 nm 박막의 전하이동도가  $10.1 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 로 증가한 것은 Fig. 3의 분석결과와 같이 박막의 평탄화(RMS 거칠기; 0.62 nm)에 의한 것으로 사료되며,  $\text{In}_2\text{O}_3$  90 nm/Ti 10 nm 박막에서 가장 낮은 비저항( $2.6 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}$ )이 측정되었다.

Figure of Merit(FOM)은 TCO 박막의 전기적, 광학적 물성을 비교할 수 있는 척도로서 관련수식은 다음과 같다[6, 10].

$$\text{FOM} = T^{10} / R_{\text{sh}}$$

위 수식에서 T는 평균 가시광 투과도이며,  $R_{\text{sh}}$ 는

**Table 2.** Variation of electrical properties of In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti bi-layered films as a function of film thickness

Film thickness (nm)	Carrier concentration (10 <sup>20</sup> /cm <sup>3</sup> )	Mobility (cm <sup>2</sup> /Vs)	Resistivity (10 <sup>-3</sup> Ω·cm)
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 100	2.1	4.7	6.5
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 95/Ti 5	2.6	7.7	3.8
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 90/Ti 10	3.0	10.1	2.6
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 85/Ti 15	3.9	5.5	2.9

**Table 3.** Figure of Merit of In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti bi-layered films as a function of film thickness

Film thickness (nm)	Optical transmittance (%)	Sheet resistance (Ω/□)	FOM (Ω <sup>-1</sup> )
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 100	83.6	650	2.6 × 10 <sup>-4</sup>
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 95/Ti 5	78.0	380	2.2 × 10 <sup>-4</sup>
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 90/Ti 10	77.4	260	3.0 × 10 <sup>-4</sup>
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 85/Ti 15	57.8	290	1.5 × 10 <sup>-5</sup>

박막의 면저항 수치이다. 투명전극용 박막의 특성은 가시광 투과율과 전기전도도에 민감하게 의존하지만, 일반적으로 투과도와 전기전도도는 서로 반비례 되는 관계를 갖기 때문에 적절한 가시광 투과도와 면저항의 선택적인 제어가 필요하다.

Table 3는 Ti 완충층 두께에 따른 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti 적층 박막의 FOM 수치 결과이다. 본 연구에서 단일 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막의 FOM 수치는 2.6 × 10<sup>-4</sup> Ω<sup>-1</sup>이었으나, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 90 nm/Ti 10 nm 박막의 면저항 감소로 인해 FOM 수치가 3.0 × 10<sup>-4</sup> Ω<sup>-1</sup>로 증가함으로써, 최적화된 Ti 완충층을 통하여 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막의 전기적, 광학적 완성도가 향상되었음을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 RF와 DC 마그네트론 스퍼터를 이용하여 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti 적층박막을 증착하며 Ti 완충층의 두께변화에 따른 박막의 전기적, 광학적 특성 변화를 고찰하였다.

박막의 가시광 투과도 및 전기적 특성에 영향을 미치는 박막의 표면거칠기가 완충층의 두께에 영향을 받을 수 있었으며, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 90 nm/Ti 10 nm 박막의 전하이동도가 최대 10.1 cm<sup>2</sup>/Vs로 증가한 것은 박막의 평탄화에 의한 것으로 사료되며, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 90 nm/Ti 10 nm 박막에서 가장 낮은 2.6 × 10<sup>-3</sup> Ω cm의 비저항이 측정되었다.

또한 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 단층박막의 FOM 수치는 2.6 × 10<sup>-4</sup> Ω<sup>-1</sup>이었으나 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 90 nm/Ti 10 nm 적층박막에서

3.0 × 10<sup>-4</sup> Ω<sup>-1</sup>로 증가하여 최적화된 Ti 완충층에 의하여 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti 박막의 전기적, 광학적 완성도가 제고됨을 알 수 있었다.

#### Acknowledgement

이 논문은 교육부와 한국연구재단의 지역혁신창의 인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2013H1B8A2032122).

#### References

1. J. Shin, Y. Cho and D. Choi : J. Kor. Inst. Met. & Mater. **47** (2009) 38-43.
2. 서태원 : Co-Sputtering 방법으로 제작한 Si doped InSnO 산화물 박막 트랜지스터의 물성 연구, 단국대학교 석사 학위논문 (2013).
3. S. H. Kim and D. Kim : Ceram. Int. **41** (2015) 2770.
4. Y. Abe and N. Ishiyama : J. Mater. Sci. Lett. **41** (2006) 7580.
5. D. J. Kim, B. S. Kim and H. K. Kim : Thin Solid Films **547** (2013) 225.
6. J. Jeon, T. K. Gong, Y. M. Kong, H. M. Lee and D. Kim : Electron. Mater. Lett. **11** (2015) 481.
7. J. H. Jeon, T. K. Gong, S. K. Kim, S. H. Kim, S. Y. Kim, D. H. Choi, D. I. Son and D. Kim : J. Alloys Compds, **639** (2015) 1.
8. Y. Wang, W. Tang, L. Zhang and J. Zhao : Thin Solid Films **565** (2014) 62.
9. Y. S. Kim, J. H. Park and D. Kim : Vacuum **82** (2008) 574.
10. G. Haacke : J. Appl. Phys. **47** (1976) 4086.