

## 비정질 투명전도막 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Zn의 전기적 광학적 특성

노경현 · 최문구 · 박승한 · 주홍렬<sup>†</sup>

연세대학교 물리학과

Ⓣ 120-749 서울시 서대문구 신촌동 134번지

정창오 · 정규하

삼성전자 반도체 AMLCD 사업부

Ⓣ 449-711 경기도 용인시 기흥읍 농서리 산 24번지

박장우

한밭대학교 공업화학과

Ⓣ 305-719 대전시 유성구 덕명동 산 16-1번지

(2002년 7월 22일 받음, 2002년 9월 23일 수정본 받음)

직류 마그네트론 스퍼터링 방법으로 성장 온도(T<sub>S</sub>)를 변화시키면서 제작한 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Zn(IZO) 박막의 전기적, 광학적 특성을 조사하였다. T<sub>S</sub><300°C에서 제작한 IZO 박막은 비정질이었고, 350°C<T<sub>S</sub>인 경우 결정질이였다. 일반적인 물질과 달리 특이하게도 IZO가 비정질일 때 전기 전도도와 광투과도 모두 결정질일 경우 보다 높은 것으로 나타났다. 비정질 IZO 박막의 경우 비저항의 값은 0.29~0.4 mΩcm이었으며 결정질 박막의 경우 1~4 mΩcm이었다. IZO 박막내의 전하는 n형이고 전하 농도 (n<sub>H</sub>)는 3~5×10<sup>20</sup>/cm<sup>3</sup>, 전하 이동도(μ<sub>H</sub>)는 20~50 cm<sup>2</sup>/V·sec이었다. 비정질 및 결정질 IZO 박막내의 주된 전자의 충돌 과정은 이온화된 불순물과 격자 충돌로 추정된다. IZO 박막의 가시광 영역 (400<λ<700 nm)의 광투과도는 80% 이상이었으며 T<sub>S</sub>가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다.

주제어 : transparent conducting oxides, transport property, amorphous TCO, optical transmittance.

### I. 서 론

투명 전도막은 높은 가시광 영역의 광 투과도와 전기 전도도를 동시에 가지는 독특한 물질로서 1907년 글로 방전함(glow discharge chamber)을 이용하여 제작한 CdO 박막에서 Badeker에 의하여 최초로 발견되었다.<sup>[1]</sup> 그 이후 투명전도막의 상업적 가치가 높게 평가되었고 Al 첨가 ZnO, GdInO<sub>x</sub>, SnO<sub>2</sub>, F 첨가 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 그 외 많은 물질들이 보고되었다.<sup>[2]</sup> 현재 투명 전도막은 액정박막 표시장치(TFT-LCD), 광기전성 소자, 유기 발광 소자, 에너지 절약 창문 등에 다양하게 응용되고 있다.<sup>[3]</sup> 투명 전도막의 특정 분야로의 응용은 응용에 관계한 특정 성질들 즉 플라즈마 주파수, 일 함수, 경도, 생산단가, 유독성, 표면 요철, 광투과도, 전기전도도, 재현성, 환경 안정성, 최소 성장 온도의 우수성에 의하여 결정된다.<sup>[2,3]</sup> 투명 전도막의 다양한 응용에 한가지 물질이 유일하게 모든 용도를 만족시킬 수는 없기 때문에 용도에 적합한 성질을 가진 투명 전도막 물질을 이용하게 된다. 그 중에서 특히 TFT-LCD에 가장 널리 쓰인 투명 전도막은 Sn 첨가 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(ITO)인데 이는 표면 요철, 광투과도, 전기전도도, 재현성, 환경 안정성, 최소 성장 온도 등의 우수성에 기인한 것이다.<sup>[4,5]</sup> 이 LCD-TFT 제작에 있어서 투명전도막의 에칭성은 생산성 향상 및 생산 단

가 감축 측면에 있어서 투명 전도막의 특성 중 가장 중요하게 평가되고 있다.<sup>[2]</sup> 하지만 현재 주로 LCD-TFT 제작에 사용중인 ITO는 강산인 HCl 계통에 에칭이 되므로 ITO 에칭시 하부 전극에 손상을 줄 가능성이 상존하고 있다. 따라서 약산에 에칭이 가능하여 화소 전극 하부의 저저항 배선에 사용되는 에칭액으로도 에칭이 가능한 신규 투명전도막 개발의 필요성이 대두되고 있다. 최근에 ITO 박막의 전기 비저항 보다 비저항 값은 다소 크지만 옥살산 계통의 약한 산에 에칭이 가능한 비정질 투명 전도막인 Zn 첨가 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(IZO) 박막이 발견되었다.<sup>[6]</sup> 본 연구에서는 이 IZO 박막을 성장 온도를 달리하여 증착하고, 성장 온도에 따른 구조 및 결정성을 조사 하였으며, 전기적 광학적 특성 및 전도 전자의 충돌 과정에 관한 연구를 수행하였다.

### II. 실험방법

본 실험에서 이용한 Zn이 첨가된 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(IZO) 박막은 함량이 89.3 wt% In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 10.7 wt% ZnO인 세라믹 타겟을 이용하여 직류 마그네트론 스퍼터링 방법으로 제작하였다. IZO 박막 제작을 위하여 사용한 기판은 LCD-TFT 제작에 사용하는 코닝 유리를 이용하였다. 직류 마그네트론 스퍼터링 장비의 초기 진공도는 5×10<sup>-7</sup> torr로 유지하였으며 IZO 박막의 증착 속도와 두께는 3.6 Å/sec, 약 1800 Å이었다. 코닝 유리 기판

<sup>†</sup>E-mail: hlju@phya.yonsei.ac.kr

세척은 아세톤, 에탄올, 메탄올, 증류수 순으로 각 단계마다 5분간 초음파 세척을 한 후 고순도(99.999%)의 질소 기체를 분사하여 기판 표면을 건조시킨 후 사용하였다. Ar과 O<sub>2</sub>의 혼합가스 분위기(함량비 O<sub>2</sub>/Ar = 1/200)로 증착 압력을 5 mTorr로 유지하면서 상온에서 400°C까지 50°C 간격으로 제작 온도를 증가시키면서 IZO 박막을 제조하였다. 박막의 구성 성분을 조사하기 위하여 입사 이온으로 3.05 MeV He<sup>2+</sup>를 이용한 Rutherford Back Scattering(RBS)으로 분석한 결과 박막의 구성 성분(In 과 Zn의 비)은 실험 오차 내에서 세라믹 타겟의 함량비와 일치하였다. 박막 두께 측정을 위하여  $\alpha$ -step을 사용하였다. 박막의 구조와 결정성을 조사하기 위하여 X-선 회절 장치(XRD)를 사용하였다. 주사속도는 분당 0.2°로 하여 0.02° 간격으로 20° ≤ 2θ ≤ 60°의 영역을 측정하였다. IZO 박막의 표면 상태를 관측하기 위하여 원자력간 현미경(AFM)을 이용하였으며, 상온 Hall 측정을 통하여 전하농도 (n<sub>H</sub>)와 전하 이동도 (μ<sub>H</sub>)를 조사하였다. Hall 측정을 위한 Hall bar는 금속 마스크를 이용하여 6 접합점을 가진 긴 막대형태로 IZO 박막 제작시 *in-situ* 로 제작하였다. 성장 온도에 의존하는 IZO 박막 비저항의 온도 의존성 측정은 자체 제작한 비저항 측정 장치에 Hall 측정에 사용한 동일한 IZO 박막을 장착하여 온도범위 80 K-320 K에서 측정하였다. 광투과도를 측정하기 위하여 백색광원인 Xe램프(150 W)를 사용하여 300~750 nm까지 파장을 변화시키면서 파장 변화에 따른 광투과도 측정을 하였다.

### III. 실험결과 및 논의

박막 제작 온도에 의존하는 IZO 박막의 구조와 결정성을 조사하기 위하여 XRD측정을 하였고 그 결과를 그림 1에 나타내었다. 박막 제작온도가 300°C이하인 시료는 X-ray 회절도의 피크가 없는 것으로 보아 IZO 박막이 비정질 상태로 존재하는 것으로 추정이 된다. 350°C 이상에서 제작한 IZO 박막은 2θ 각이 30° 근방에서 bixbyite 구조의 (222)에 해당하고 반치폭은 0.4°-0.6°인 피크가 존재하였고, 따라서 350°C 이

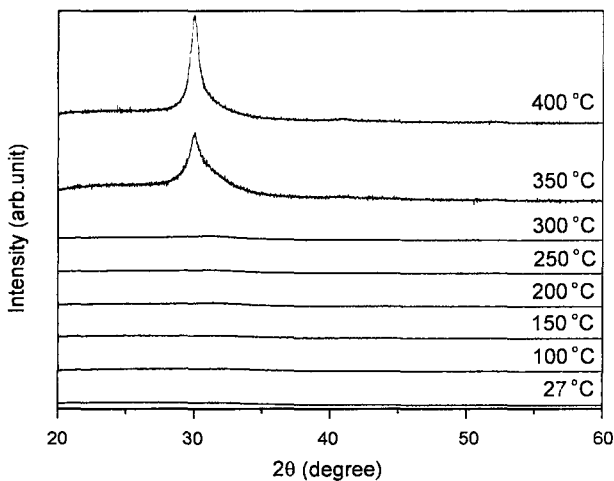
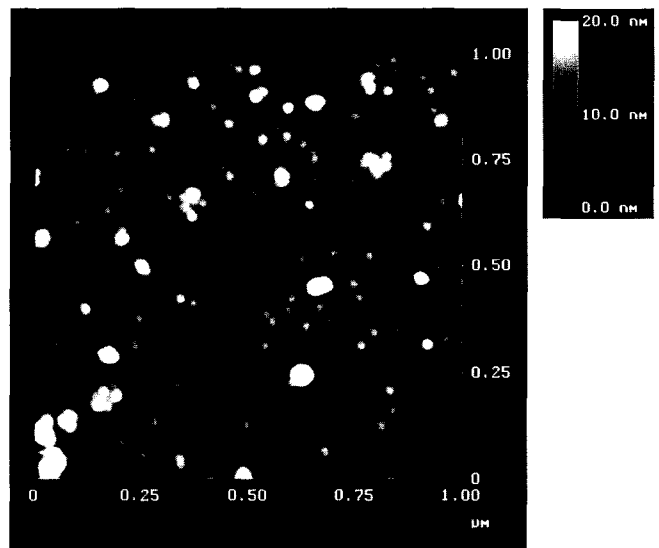


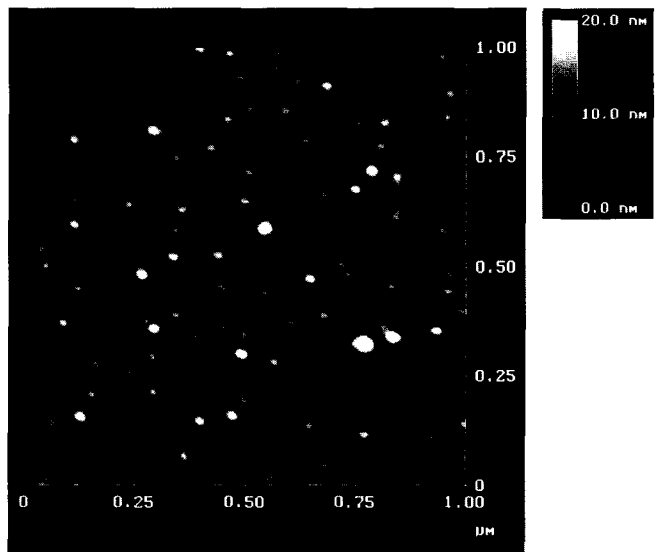
그림 1. 제작온도(상온 ≤ T<sub>s</sub> ≤ 400°C)에 의존하는 IZO 박막의 X선 회절도.

상에서 제작한 IZO 박막은 bixbyite구조를 가진 결정질 상태로 존재하는 것으로 추정된다. 하지만 30° 근방의 피크 외에는 XRD 회절도에는 다른 회절 피크들이 존재하지 않는 것으로 나타났다. Scherrer 방정식  $D_{hkl} = k\lambda / B \cos\theta$  (D<sub>hkl</sub>: 입자의 지름, k: 형태 인자 입자가 구형인 경우 약 0.9, θ: 반치폭, λ: X-선 파장, θ: 회절각)을 이용하여 박막내의 IZO 입자들이 구형이라고 가정하고 크기를 추정해 볼 때 입자들의 반경은 15~20 nm 정도였다.<sup>17)</sup>

그림 2(a)와 (b)는 비정질 및 결정질 IZO 박막의 전형적인 AFM 사진을 보여 주고 있다. 그림 2(a)는 200°C에서 제작한 X-선 분석 결과 비정질인 IZO박막의 AFM 사진으로서 평균 표면 거칠기가 8.00 Å이다. 그림 2(b)는 X-선 분석 결과 결



(a)



(c)

그림 2. (a) 평균 표면 거칠기가 0.8 nm 최대 높이가 12.3 nm 인 200°C에서 제작한 비정질 IZO 박막의 AFM 사진. (b) 평균 표면 거칠기가 0.48 nm이고 최대 높이 8.96 nm인 400°C에서 제작한 결정질 IZO 박막의 AFM 사진.

정질인 400°C에서 제작한 IZO 박막의 AFM 사진으로 평균 표면 거칠기가 4.8 Å이다. 두 시료의 경우 모두 박막의 두께가 약 1800 Å인 것을 고려하면 평균 표면 거칠기는 박막 두께의 0.5% 보다 적은 것으로 표면 거칠기는 매우 적은 것이다. 비정질(200°C 제작) IZO와 결정질(400°C 제작) IZO 박막의 X-선 회절도는 크게 상이하였음에도 불구하고 AFM 사진은 평균 표면 거칠기에 있어서 약간의 차를 제외하면 매우 흡사하였다. 두 AFM 사진 모두 약 200 Å 정도의 유사 알갱이가 표면에 존재하는 것처럼 보인다. 약 200 Å 정도의 유사 알갱이의 크기는 X-선 분석 결과 결정질 IZO 박막내의 IZO 입자 크기와 같은 수치이다. 하지만 비정질 박막의 경우에도 약 200 Å 정도의 유사 알갱이가 존재하는 것은 보통의 예상과는 상반되는 것이며 비정질 상태의 IZO 박막 내에 유사 알갱이 형태의 상이 분리된 형태로 존재하는 In과 Zn 알갱이가 존재할 가능성을 암시하는 것으로 판단된다.

박막 제조 온도에 의존하는 전기 비저항( $\rho$ ), 전하농도( $n_H$ )와 전하 유동도( $\mu_H$ )를 측정하기 위하여 Hall 실험을 상온에서 수행하였고 그림 3은 Hall 실험 결과이다. 실험에 사용한 Hall 구조는 6개의 접합이 가능한 긴 직사각형 구조로 길이 6.6 mm, 넓이 1 mm로서 그림 3의 삽화(inset)로 그려져 있다. 상온 제작한 IZO 박막의 비저항은 1.2 mΩcm이었고 제작 온도가 높아질수록 비저항은 감소하여 제작 온도 100°C에서 300°C에서 거의 일정한 비저항 값 ~0.3 mΩcm의 값을 가지는 것으로 나타났다. 특히 제작 온도가 300°C 이하에서 제작한 IZO 박막은 비정질 상을 가짐에도 불구하고 최저 비저항 값은

0.29 mΩcm로서 상대적으로 매우 적었다. 결정질 IZO가 생산하는 온도인 제작 온도  $T_s \geq 350^\circ\text{C}$ 인 경우 비저항 값이 급격히 증가하여 350°C에서 제작한 박막의 비저항은 1.4 mΩcm, 400°C에서 제작한 박막의 비저항은 1.7 mΩcm로서 결정질 IZO의 비저항이 비정질 IZO의 비저항보다 매우 크게 나타났다. 이런 결과는 대부분의 물질이 결정질에서 비정질로 바뀔 때 비저항이 증가하는 것과는 상반되는 것으로 매우 특이한 결과이다. 예로서 비정질 ITO의 비저항은 결정질 ITO보다 월등히 큰 것과 대조를 보여주고 있다.<sup>18)</sup> IZO 박막의 전도전자는 n형의 특성을 가지고 있었고 전하농도는 상온에서 제작한 IZO 박막의 경우  $3 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ 이었다가 제작온도가 상승함에 따라 증가하여 제작 온도 250°C일 때 최대치  $5 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ 이었다. IZO 박막의 제작 온도가 더욱 상승하여 결정질로 되는 온도에서는 전하농도가 급격히 감소하였다. 상온에서 전하 유동도  $\mu_H$ 는  $22 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$ 이었고 박막 제조 온도가 증가함에 따라 상승하다가 제작 온도가 전하 농도가 최대가 되는 온도 (250°C)보다 낮은 온도인 150°C일 때  $\mu_H$ 의 값이  $50 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$  최대치를 보이다가 제작 온도가 상승함에 따라 감소하였다. 비정질 상태인  $100^\circ\text{C} \leq T_s \leq 300^\circ\text{C}$ 의 시료들은 비저항이 0.29~0.40 mΩcm로서 낮은 비저항 값을 나타내었는데 이렇게 비정질 IZO가 결정질 IZO보다 적은 비저항 값을 가지는 이유는 전하 농도와 전하 유동도가 결정질 상태일 때보다 월등히 더 큰 것에 기인함으로써 이해할 수 있다. 결정질 IZO와 비정질의 IZO의 전하 농도와 전하 유동도 차이는 IZO 박막이 제작 온도 상승으로 결정화 될 때 In 자리에 Zn 치환됨으로 인하여 산소 결함의 감소와 이에 따른 전하농도 감소 및 충돌 빈도수 증가에 기인한 것으로 추정된다. 하지만 이에 대한 세밀한 연구가 요구된다. 150°C에서 제작한 IZO 박막은 전하농도는 적지만 전하 유동도가 커서 비저항이 작게 나왔고, 250°C에서 제작한 IZO 박막은 전하 유동도는 작지만 전하농도가 커서 비저항이 적은 것으로 관측되었다. 투명 전도막의 특징이 높은 광투과도와 전기 전도성을 동시에 가지는 것이므로 작은 전하 농도로서 높은 전하 유동도 가지는 것이 더 높은 광투과도를 가지게 됨으로 150°C에서 제작한 IZO 박막이 250°C에서 제작한 IZO 박막 보다 우수하다고 판단된다.<sup>19)</sup>

IZO 박막 내의 전도 전자들의 흐름에 영향을 미치는 충돌 현상을 조사하기 위하여 비저항 ( $\rho$ )의 온도 의존성을 측정하였고 그 결과가 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 보이는 것처럼 IZO 박막은 온도가 감소함에 따라 비저항은 감소하는 금속성의 전기 저항 특성을 보여주고 있다. 또한 비저항의 온도 의존성은 비정질과 결정질 IZO 박막에서 유사하게 나타났으며 320 K에서 측정된 비저항 값  $\rho_{320\text{K}}$ 과 80 K에서 측정된 비저항 값  $\rho_{80\text{K}}$ 과의 차이  $(\rho_{320\text{K}} - \rho_{80\text{K}})/\rho_{80\text{K}} \times 100(\%)$ 는 10~15(%) 정도로 온도 의존성이 적었다. 일반적으로 투명전도막의 경우 전도 전자가 많고 ( $n > 10^{20}/\text{cm}^3$ ) 이온화된 불순물에 의한 충돌이 주된 충돌 과정이고 알갱이 경계와 격자 충돌의 기여는 작은 것으로 알려져 있다. 이중 알갱이 경계와 이온화된 불순물에 의한 충돌은 온도 의존성이 없고 격자 충돌은  $1/T$ 에 의존하는 것으로 알려져 있다.<sup>19)</sup> 따라서 IZO 박막 내부의 전도 전자들의 충돌은 온도에 의존하지 않는 이온화된 불순물에 의한

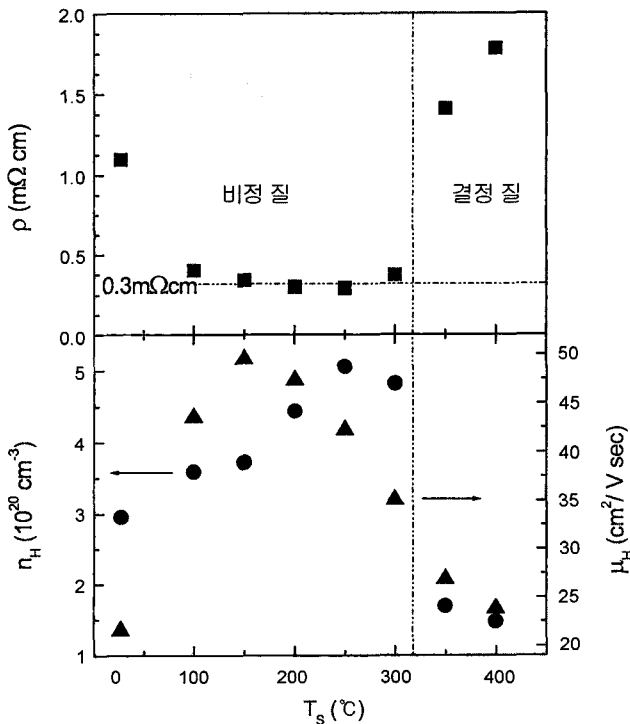


그림 3. Hall 측정을 통하여 구한 IZO 박막 제작 온도(상온  $\leq T_s \leq 400^\circ\text{C}$ )에 의존하는 전기 비저항( $\rho$ ), 전하농도( $n_H$ )와 전하 유동도( $\mu_H$ ). 그림내의 삽화는 Hall 측정용 시료의 구조를 표시한다.

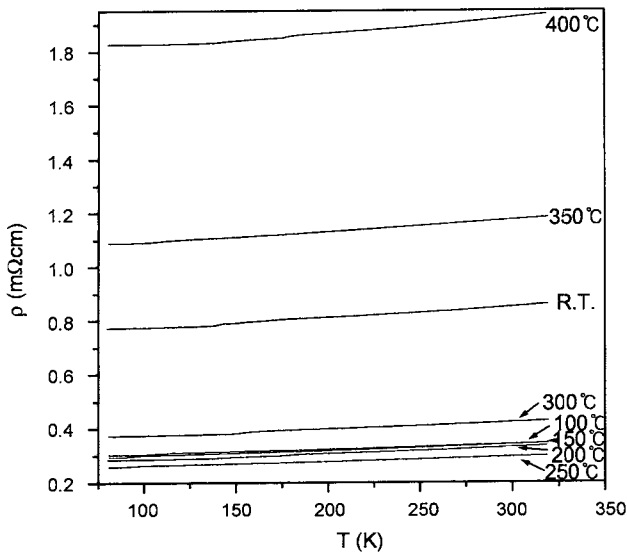


그림 4. 제작온도(상온  $\leq T_s \leq 400^\circ\text{C}$ )를 달리하여 만든 IZO 박막 비저항의 온도 의존성(80 K  $\leq T \leq 320$  K). 320 K에서 측정된 비저항 값  $\rho_{320K}$ 과 80 K에서 측정된 비저항 값  $\rho_{80K}$ 과의 차이  $(\rho_{320K} - \rho_{80K})/\rho_{80K} \times 100(\%)$ 는 10~15(%) 정도로 온도 의존성이 매우 약하다.

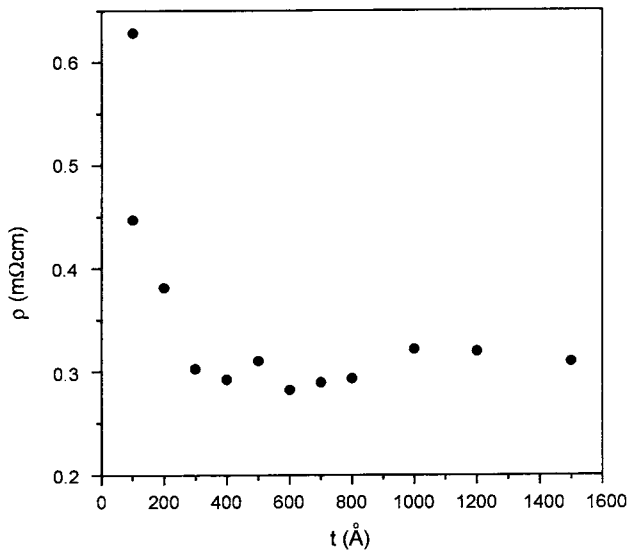


그림 5. 제작온도  $200^\circ\text{C}$ 에서 제작한 IZO 박막 비저항의 두께 의존성.

층들에 의하여 주로 발생하고 약한 온도 의존성은 격자 층들에 의한 효과로 판단된다.

그림 5는  $200^\circ\text{C}$ 에서 제작한 IZO 박막의 비저항의 박막두께 의존성을 측정된 것으로 두께가 300 Å 미만일 때는 비저항 값이 0.38~0.63 mΩcm로 매우 크고 두께 의존성이 크다가 두께가 300 Å 이상에서는 ~0.3 mΩcm 정도로 일정한 값을 나타냈다. 두께가 적을 때 비저항이 크게 측정된 것은 상대적으로 큰 표면 효과에 의한 기인한 것으로 판단된다.

그림 6은 성장 온도에 의존하는 300~750 nm 영역에서의 IZO 박막의 광투과도를 보여주고 있다. 흡수가 시작되는 파장

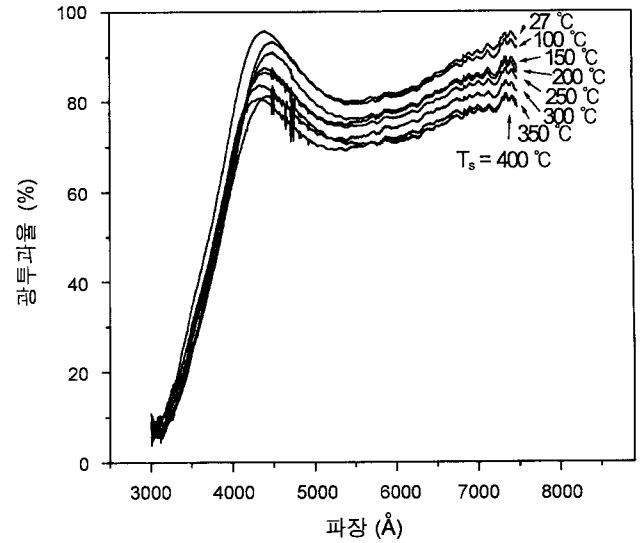


그림 6. 제작온도(상온  $\leq T_s \leq 400^\circ\text{C}$ ) 의존하는 IZO 박막의 광투과도. 흡수가 시작하는 파장은 330 nm이고, 대체적으로 박막 제작 온도가 증가함에 따라 광투과도는 감소한다.

은 성장온도와 관계없이 약 420 nm이고, IZO 박막 성장온도 의존성은 약하다. 가시광선 영역인 400~700 nm에서의 광투과율은 75~98%이고 성장온도가 증가함에 따라 광투과도는 대체적으로 감소하는 경향을 보여 주고 있다. 성장 온도가 상승함에 따라 광투과도가 감소하는 것은 흡수에 의한 것으로 추측된다. 파장이 430 nm 부근에서 광투과율이 최고로 파장이 증가할수록 떨어지다가 550 nm 부근에서 최저의 광투과율을 나타내고 파장 다시 증가함에 따라 다시 광 투과율이 증가하는 것으로 관측되었는데 이는 시료가 얇기 때문에 나타나는 빛의 간섭 현상 때문으로 추정된다.

#### IV. 결 론

직류 스퍼터링 방법으로 성장 온도를 달리하여 제작한 IZO 박막의 전기적, 광학적 특성을 조사하였다. IZO 박막의 In : Zn의 성분비는 타겟의 In과 Zn의 성분비와 박막 제조 온도와는 무관하게 일치하였다. XRD의 측정결과 IZO 박막은  $300^\circ\text{C}$  이하에서는 비정질,  $350^\circ\text{C}$  이상에서는 결정질 상태로 존재하는 것으로 추정된다. 또한 IZO 박막의 전하는 n형이고 농도는  $3 \sim 5 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ , 전하 이동도( $\mu_H$ )의 값 20~48  $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$  이었다. 또한 비정질 IZO박막의 최저 비저항의 값은 약 0.29 mΩcm이었다. IZO 박막의 광투과율은 가시 광 영역에서 75~98% 이었으며 박막 제조온도가 증가할수록 광투과율은 대체적으로 감소하는 경향을 보였다. IZO 박막은 저온 생장이 가능하고 비정질형임에도 불구하고 낮은 비저항 값과 높은 광 투과도를 보이므로 매우 우수한 차세대 투명전도막으로 응용 될 가능성이 매우 크다고 할 수 있다.

#### 감사의 글

본 논문은 연세대학교 2001년도 학술 연구비와 2001년도

삼성전자 산학 협력 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1] K. L. Chopra, S. Major, and D. K. Pandya, "Transparent Conductors-A Status Review," *Thin Solid Films*, vol. 102, no. 1, pp. 1-35, 1983.
- [2] Gee Sung Chae, "A Modified Transparent Conducting Oxide for Flat Panel Displays Only," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 40, no. 3A, pp. 1282-1286, 2001.
- [3] Roy G. Gordon, "Criteria for Choosing Transparent Conductors," *MRS Bull.* vol. 25, no. 16, pp. 52-57, 2000.
- [4] Brian G. Lewis and David C. Paine, "Applications and Processing of Transparent Conducting Oxides," *MRS Bull.* vol. 25, no. 16, pp. 22-27, 2000.
- [5] David S. Ginley and Clark Bright, "Transparent Conducting Oxides" *MRS Bull.* vol. 25, no. 16, pp. 15-18, 2000.
- [6] P. K. Song, Y. Shigesato, I. Yasui, C. W. Ow-Yang, and D. C. Paine, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 37, no. 4, pp. 1870-1876, 1998.
- [7] H. P. Klug and L. P. Alexander, *X-ray diffraction Procedures for Polycrystalline and Amorphous Materials*, 2nd ed. (Wiley, New York, 1974), p. 618.
- [8] David C. Paine, T. Whitson, D. Janiac, R. Beresford, and Cleve Ow Yang, "A study of low temperature crystallization of amorphous thin film indium-tin-oxide" *J. Appl. Phys.* vol. 85, no. 12, pp. 8445-8450, 1999.
- [9] M. Yan, M. Lane, C. R. Kannewurf, and R. P. H. Chang, "Highly conductive epitaxial CdO thin films prepared by pulsed laser deposition," *Appl. Phys. Lett.* vol. 78, no. 16, pp. 2342-2344, 2001.

## Transport and optical properties of transparent conducting oxide In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Zn

Kyung-Hun Noh, Moongoo Choi, Seung-Han Park, and Honglyoul Ju<sup>†</sup>

*Department of Physics, Yonsei University, Seoul 120-749, KOREA*

<sup>†</sup>*E-mail: hlju@phy.yonsei.ac.kr*

Chang-Oh Jeong and Kyuha Chung

*AMLCD Division, Samsung Electronics, Kyunggi-do 449-711, KOREA*

Changwoo Park

*Department of Chemical Engineering, Hanbat National University of Technology, Daejeon 305-710, KOREA*

(Received July 22, 2002 ; Revised manuscript received September 23, 2002)

The transport and optical properties of In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Zn (IZO) thin films grown by DC magnetron sputtering deposition have been studied. The deposition temperatures ( $T_S$ ) were varied from room temperature to 400°C in 50°C steps. The IZO films are an amorphous phase for  $T_S < 300^\circ\text{C}$  and polycrystalline phase for  $350^\circ\text{C} < T_S$ . In contrast to ordinary films, amorphous IZO films have lower resistivity and higher optical transmittance than polycrystalline IZO films. The resistivity of amorphous IZO was in the range of 0.29~0.4 mΩcm and that of polycrystalline IZO was in the range of 1~4 mΩcm. The carrier type for IZO film was found to be n-type, and the carrier density,  $n$ , was  $3\sim 5 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ . The Hall mobility,  $\mu_H$ , was 20~50 cm<sup>2</sup>/V · sec. The predominant scattering mechanisms in both amorphous and polycrystalline IZO films were believed to be ionized impurity scattering and lattice scattering. The visible transmittance of the IZO films, which decreases with an increase of  $T_S$ , was above 80%.

*Classification codes* : DT.010, OM.010, OM.020.