

## 제작 온도 및 산소 분압에 의존하는 인듐 주석 산화물의 전기적, 광학적 성질

황석민 · 주홍렬<sup>†</sup>

연세대학교 물리학과

Ⓣ 120-749 서울시 서대문구 신촌동 134 번지

박장우

한밭대학교 공업화학과

Ⓣ 305-719 대전시 유성구 덕명동 산 16-1

(2003년 1월 10일 받음, 2003년 5월 7일 수정본 받음)

자체 제작한 고밀도(이론 밀도의 99%) ITO( $\text{In}_2\text{O}_3 : \text{SnO}_2 = 90 \text{ wt\%} : 10 \text{ wt\%}$ ) 타깃과 직류 마그네트론 스퍼터링 방법을 이용하여 산소분압  $P_{\text{O}_2}$  ( $0 \leq P_{\text{O}_2} \leq 10^{-5} \text{ torr}$ )와 성장 온도  $T_S$  ( $100^\circ\text{C} \leq T_S \leq 350^\circ\text{C}$ )를 변화시키면서 ITO 박막을 제작하고 전기적, 광학적 특성을 조사하였다. ITO 박막의 비저항은 제작 온도가 증가함에 따라 감소하다가  $T_S = 300^\circ\text{C}$ 일 때 최저 비저항값  $0.30 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}$ 를 나타내었고  $T_S > 300^\circ\text{C}$  이상에서는 약간 증가하였다.  $T_S = 300^\circ\text{C}$ 에서 제작한 ITO 박막의 최대 전하 농도는  $6.6 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ 이었다.  $T_S$ 를 고정하고 ITO 박막 제작 시 사용한 산소분압이 증가함에 따라 전하농도, 전하유동도는 급격하게 감소하여 비저항이 크게 증가하는 것으로 나타났다. ITO 박막의 최저 비저항과 최대 전하 유동도는 각각  $0.3 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}$ 와  $39.3 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$ 였다. 또한 가시광 영역 (400~700 nm)에서 ITO박막의 광투과도는 80~90%로 높게 나타났다.

주제어 : ITO, transparent conducting oxides, transmittance, resistivity.

### I. 서 론

투명 전도막은 가시광 영역의 높은 광 투과도와 전기 전도도를 동시에 가지는 물성으로 인해 액정 박막 표시 장치(LCD-TFT), 광기전성 소자, 유기 발광 소자, 에너지 절약 창문 등에 다양하게 응용되고 있으며, 산업의 고도화와 더불어 활용도가 점점 증가되고 있는 추세이다.<sup>[1]</sup> 투명 전도막은 1907년 글로 방전함(glow discharge chamber)을 이용하여 제작한 CdO 박막에서 Badeker에 의하여 최초로 발견된 이후 지금까지 Al 첨가 ZnO, GdInO<sub>x</sub>, SnO<sub>2</sub>, F 첨가 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등과 같이 다양한 투명 전도막이 보고되고 있다.<sup>[1,2]</sup> 이와 같이 다양한 투명 전도막 중에서 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에 Sn을 첨가한 인듐 주석 산화물(ITO)은 표면 요철, 광투과도, 전기전도도, 재현성, 환경 안정성, 최소 성장 온도 등에 있어서 탁월한 성질을 가지기 때문에 현재 상업적으로 가장 많이 사용되고 있다.<sup>[1,3]</sup> ITO를 박막으로 성장시키는 방법으로는 전자빔 증착기, 스퍼터링, pulsed laser deposition 등 다양한 방법이 사용되고 있지만 특히 경제적 생산 단가, 대면적의 증착, 대량 생산의 용이, 저온 성장이 가능한 스퍼터링법을 이용한 ITO 박막 제조법이 가장 보편적으로 사용되고 있다.<sup>[3-5]</sup> ITO와 화학적, 구조적 특성이 유사한 단결정 기판을 사용하여 단결정 ITO 박막을 성장시킬 경우 최저 전기 비저항은  $0.1 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}$  보다 작은 것으로 보고되고 있으나, 널리 사용되고 있는 ITO용 기판인 Corning 유리 위에 제작된 ITO의 최저 전기 비저항은  $0.16 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}$ 이고, 상

업적으로 대량 생산되고 있는 ITO는 비저항 값이  $0.18 \sim 0.3 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}$ 를 가지는 것으로 알려져 있다.<sup>[5,6]</sup> 하지만 국내의 ITO 관련 연구와 투명 전도막 제작에 관한 연구는 많이 진행되어 왔고 또 진행되고 있지만 나노 분말을 이용한 고밀도 ITO 타깃 제작 및 고밀도 타깃을 이용하여 제작한 박막의 물성에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 나노 분말을 사용하여 고밀도(이론 밀도의 99%) ITO 타깃을 제조하고, 이 ITO 타깃과 반응성 직류 마그네트론 스퍼터링법을 이용하여 Ar/O<sub>2</sub> 혼합비와 성장 온도  $T_S$  ( $100^\circ\text{C} \leq T_S \leq 350^\circ\text{C}$ )를 변화시키면서, ITO 박막을 제작하고, 전기적 광학적 특성에 관한 연구를 수행하였으며, 이를 통하여 국내의 ITO 타깃 제작과 투명 전도막 연구의 폭을 넓히고자 하였다.

### II. 실험방법

본 실험에서 사용한 ITO( $\text{In}_2\text{O}_3 : \text{SnO}_2 = 90 \text{ wt\%} : 10 \text{ wt\%}$ ) 타깃은 나노신소재(주)에서 구입한 1차 입경이 10 nm이고 2차 입경이 300~400 nm인 ITO 나노 분말을 상온에서 유압프레스와 cold isostatic press를 사용하여 압착한 후, 1550°C에서 24 시간 열처리하여 제작하였으며, 타깃의 크기는 2"(지름)×0.25"(두께), 밀도는 이론 밀도의 99%였다. 이 ITO 타깃을 사용하여 반응성 직류 마그네트론 스퍼터링 방법으로 ITO박막을 제작하였으며, 기판은 TFT-LCD 제작에 사용하는 코닝 유리를 사용하였다. 반응성 직류 마그네트론 스퍼터링 장비의 초기 진공도는  $2 \times 10^{-6} \text{ torr}$ 로 유지하였으며 ITO 박막의 증착 속도와 두께는 약  $3.6 \text{ \AA}/\text{sec}$ , 약 170 nm였다. 코닝 유리 기판 세척

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

은 아세톤, 에탄올, 메탄올, 증류수 순으로 각 단계마다 5분간 초음파 세척을 한 후 고순도(99.999%)의 질소 기체를 분사하여 기판 표면을 건조시킨 후 사용하였다. 증착 압력, 전류, 전압 및 Ar 유량을 각각 5 mTorr, 150 mA, 270 V, 50 sccm으로 고정시킨 후 산소유량을 0에서 0.5 sccm (산소 분압 범위: 0 torr~ $5 \times 10^{-5}$  torr 또는  $O_2/Ar$  혼합비:  $0 \leq P_{O_2}/P_{Ar} \leq 1/100$ )까지 변화시키면서 시료 제작 온도  $100^\circ C \leq T_S \leq 350^\circ C$ 에서 ITO 박막을 제작하였다. 박막 두께 측정을 위하여  $\alpha$ -step을 사용하였으며 박막의 구조와 결정성을 조사하기 위하여 X-선 회절 장치(XRD)를 사용하였다. XRD의 주사속도는 분당  $0.2^\circ$ 로 하여  $0.02^\circ$  간격으로  $20^\circ \leq 2\theta \leq 60^\circ$ 의 영역을 측정하였다. ITO 박막의 표면 상태를 관측하기 위하여 원자력간 현미경(AFM)을 사용하였으며, 상온에서 van der Pauw 방법에 의한 Hall 측정을 통하여 전기 저항 ( $\rho$ ), 전하농도 ( $n_H$ )와 전하 이동도 ( $\mu_H$ )를 조사하였다. 광투과도를 측정을 위하여 백색광원인 Xe 램프(150 W)를 사용하여 350-900 nm까지 파장을 변화시키면서 파장 변화에 따른 광투과도 측정을 하였다.

### III. 실험결과 및 논의

제작온도와 산소 유량에 의존하는 ITO 박막의 표면 형상을 관측하기 위하여 AFM 측정을 하였고 그림 1은 대표적인 AFM 사진을 보여주고 있다. 그림 1(a), (b), (c)는 산소 유량

=0으로 고정한 후  $T_S = 100^\circ C, 300^\circ C, 350^\circ C$ 에서 제작한 ITO 박막의 AFM 사진이고, 그림 1(d)는 산소 유량 =0.5 sccm,  $T_S = 300^\circ C$ 에서 제작한 박막의 AFM 사진을 보여주고 있다.  $T_S = 100^\circ C, 300^\circ C, 350^\circ C$ 에서 제작한 ITO 박막의 평균 표면 거칠기(RMS roughness)와 최고-최저 높이차는 각각 0.8 nm, 2.2 nm, 3.1 nm와 8.4 nm, 17.6 nm, 22.2 nm였다.  $T_S = 100^\circ C$ 에서 제작한 시료는 비정질이었으며(그림 5 참조) 이 비정질 박막의 RMS 표면 거칠기와 최고-최저 높이차가 다른 조건으로 제작한 결정질 시료 보다 작은 것으로 판단된다. ITO의 결정화되는 온도인  $150^\circ C$  이상에서 제작한 시료는 표면 형상은 유사하나 RMS 표면 거칠기와 최고-최저 높이차는 제작 온도에 따라 증가하였다. 이 박막의 RMS 표면 거칠기는 2.5 nm, 최고-최저 높이차 16.3 nm로서 동일한 제작 온도에서 산소 유량(=0.0 sccm)으로 제작한 박막의 AFM 사진을 비교해 보면 비슷한 RMS 표면 거칠기를 가짐에도 불구하고 최고-최저 높이차는 상대적으로 작으며 이는 산소 유량(=0.5 sccm)에서 제작한 ITO 박막에서 관측되는 알갱이가 산소 유량(=0.0 sccm)으로 제작한 박막의 표면에서 관측되는 알갱이 보다 큰 것에 기인한 것으로 판단된다. 또한 산소 유량 증가에 따라 알갱이의 크기가 커지는 것은 산소 유량이 클수록 결정이 용이하게 자라기 때문으로 판단된다. 모든 ITO 박막의 두께가 약 170 nm인 것을 고려하면 RMS 표면 거칠기는 박막 두께의 2% 보다 작은 것으로 나타났다.

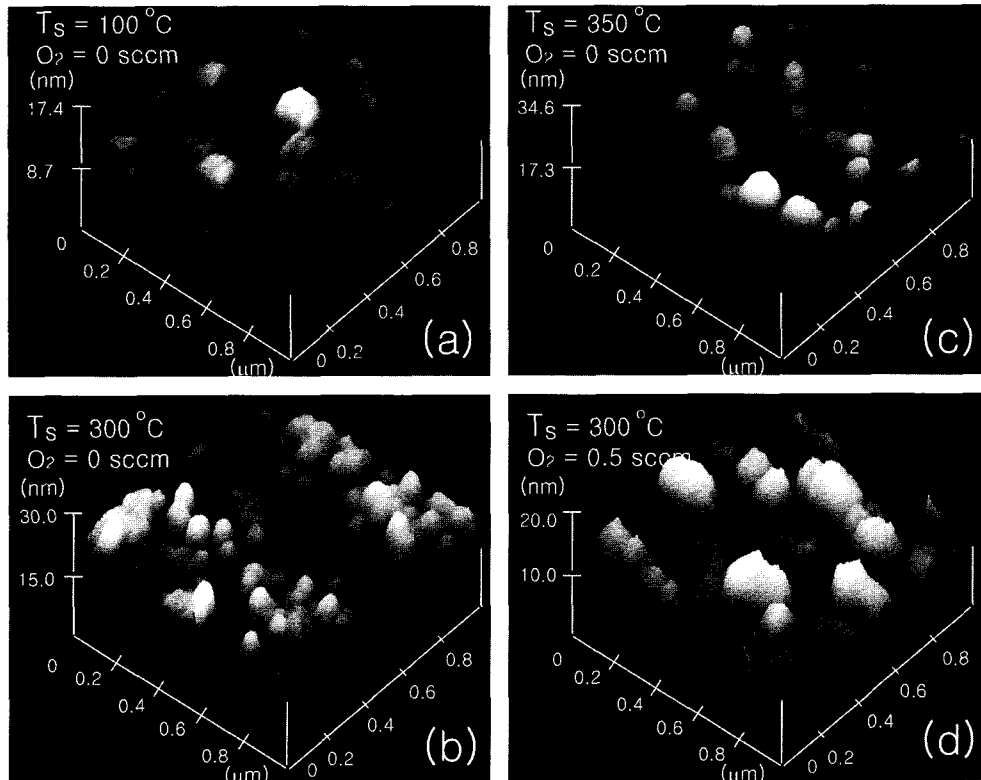


그림 1. ITO 박막의 AFM 사진들 (a) 제작온도  $T_S = 100^\circ C$ , 산소 = 0 sccm에서 제작한 박막. RMS 표면 거칠기(RMS roughness)가 0.8 nm 최고-최저 높이 차가 8.4 nm, (b)  $T_S = 300^\circ C$ , 산소 = 0 sccm에서 제작한 박막. RMS 표면 거칠기가 2.2 nm 최고-최저 높이 차가 17.6 nm, (c)  $T_S = 350^\circ C$ , 산소 = 0 sccm에서 제작한 박막. RMS 표면 거칠기가 3.1 nm 최고-최저 높이 차가 22.2 nm, (d)  $T_S = 300^\circ C$ , 산소 = 0.5 sccm에서 제작한 박막. RMS 표면 거칠기가 2.5 nm 최고-최저 높이 차가 16.3 nm.

ITO 박막을 제작 온도 200°C, 250°C, 300°C에서 산소 유량을 0 sccm에서 0.5 sccm(산소 분압 범위 : 0 torr~ $5 \times 10^{-5}$  torr)까지 변화시키면서 제작하고 전기 비저항을 측정된 결과 모든 제작 온도에서 산소 유량이 최소일 때(산소 유량 = 0일 때) 최저 비저항을 가지는 것으로 나타났다. 또한 이들 제작 온도에서 같은 산소 유량을 사용한 경우 300°C에서 제작한 시료가 가장 낮은 비저항 값을 가지는 것으로 나타났다. 그림 2는 300°C에서 제작한 ITO 박막의 산소 유량에 의존하는 전기 비저항( $\rho$ ), 전하농도( $n_H$ )와 전하 이동도( $\mu_H$ )를 보여 주고 있다. ITO 박막의 전기 비저항은 산소 유량(=0 sccm)일 때 최저값 0.3 m $\Omega \cdot \text{cm}$ 을 가지고 산소 유량이 증가함에 따라 비저항은 증가하여 산소 유량(=0.5 sccm)일 때 22.7 m $\Omega \cdot \text{cm}$ 에 달하였다. 산소 유량(=0 sccm)에서 제작한 ITO 박막의  $n_H$ 와  $\mu_H$ 는 각각  $6.0 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ , 33.5  $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 였고, 산소 유량이 증가함에 따라 감소하여 산소 유량 = 0.5 sccm일 때  $0.6 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ , 4.6  $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 였다. 산소 유량이 증가함에 따라 전기 저항이 증가하는 이유는 그림 2(b)에 나타난 바와 같이 산소 유량 증가로 산소 결함을 가진 ITO 분자들의 수가 작아지기 때문이다. 이 산소 결함을 통해 전자가 이동하므로, 산소 결함을 가진 ITO 분자들의 수가 작아질수록 전도 전자와 전하 이동도가 감소하게 된다. 일반적으로 증착시 산소 분압은 ITO 박막의 구조적 전기적 성질에 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며 산소 유량이 0이 아닌  $\text{O}_2$ 와 Ar의 분압비는 1/500~1/

200일 때 ITO 박막의 비저항이 최소값을 가지는 것으로 보고된 바 있다.<sup>[7]</sup> 산소 분압이 매우 적은 경우 ITO 박막은 모수 석상(dendritic)으로 성장하려는 경향이 있고, 이 엽상 결정을 가진 ITO 박막은 박막내의 연결성의 부족으로 인하여 큰 전기저항을 가지게 되며, 산소 분압 증가에 따라 연결성은 좋아지지만 전도전자를 생성하는 산소 결함이 감소하여 비저항 값은 최저값을 보인 후 증가하는 것으로 보고되었다.<sup>[7]</sup> 본 연구에서 제작한 ITO 박막은 고밀도 타겟을 사용하여 제작하였기 때문에 산소 유량이 적었을 때도 엽상으로 성장하지 않아서 최저 비저항이 산소 유량이 0일 때 나타난 것으로 추정되며, 현재 산소 유량에 따른 구조적 특성에 관한 연구가 진행 중에 있다. 하지만 최저 비저항인 ITO박막의 경우도 전하농도는  $6.0 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ 로서 최적의 전하농도로 알려진  $\sim 1.1 \times 10^{21}/\text{cm}^3$  보다 낮은데, 이는 산소 결함이 충분하지 않은 데 기인한 것이다.<sup>[6]</sup> 이 박막을 50 torr의 질소 분위기에서 250°C를 유지하면서 1시간동안 추가 열처리를 실시할 경우 전기 비저항, 전하 농도, 전하 이동도는 각각 0.19 m $\Omega \cdot \text{cm}$ ,  $1.1 \times 10^{21}/\text{cm}^3$ , 31.5  $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 의 값을 가지는 것으로 나타났다.

300°C에서 제작한 ITO 박막의 산소 유량에 의존하는 X선 회절 결과를 그림 3에 나타내었다. ITO 박막은 bixbyite 구조를 가지며 (222) peak의 강도가 가장 컸다. (400) peak는 산소 유량이 0일 때 두 번째로 큰 peak의 강도를 가지다가 산소 유량이 0이 아닌 경우에서 나타나지 않았다. (440)와 (622) peak의 회절 강도는 산소 유량이 증가함에 따라 감소하였으며 산소 유량이 0.3 sccm 보다 큰 경우 강도가 거의 0이 되었고 따라서 (222) peak만 존재하였다. ITO 박막 X선 회절 강도의 산소 유량 의존성은 박막내의 알갱이들의 정렬과 결정성이 산소 유량에 따라 민감하게 의존함을 보여주는 것이다.

ITO 박막의 전기 비저항은 제작 온도가 같은 경우 산소 유량이 0에서 제작한 시료가 최저 비저항을 가지므로 산소 유량을 0으로 고정한 후 제작 온도를 달리하여 ITO 박막을 제작

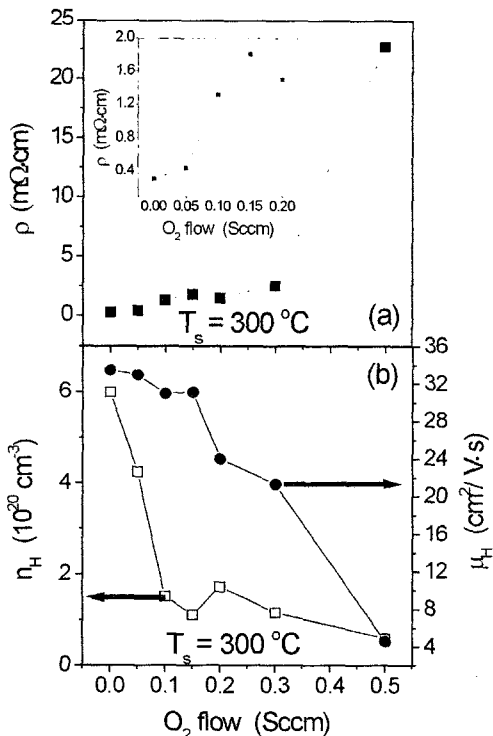


그림 2. Ar 유량 50 sccm, 증착압력을 5 mtorr, 제작온도  $T_s = 300^\circ\text{C}$ 로 고정한 후 산소 유량을 0 sccm에서 0.5 sccm까지 변화시키면서 제작한 ITO 박막의 van der Pauw Hall 측정에 의한 (a) 전기 비저항  $\rho$ , (b) 전하 농도  $n_H$ 와 전하 이동도  $\mu_H$ . (a) 내의 삼각형은 산소 유량이 0 sccm에서 0.2 sccm으로 변화시키면서 제작한 ITO 박막의.

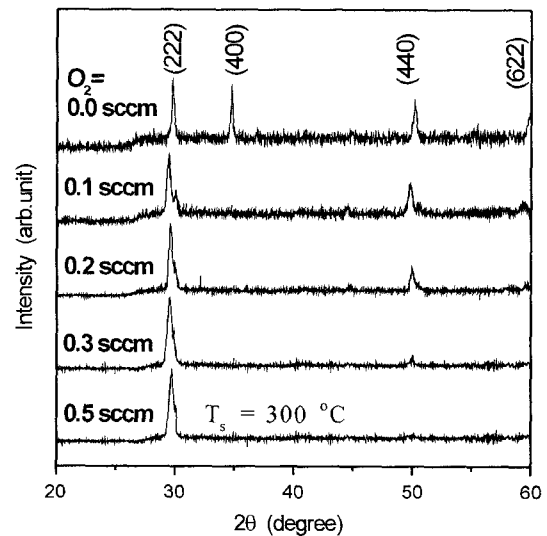


그림 3. Ar 유량 50 sccm, 증착압력을 5 mtorr, 제작온도 300°C로 고정한 후 산소 유량을 0 sccm에서 0.5 sccm까지 변화시키면서 제작한 ITO 박막의 X선 회절도.

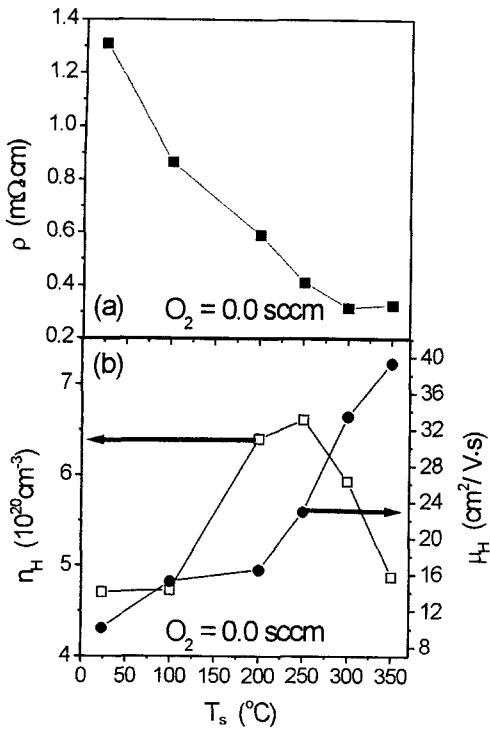


그림 4. Ar 유량 50 sccm, 증착압력을 5 mtorr, 산소 유량 = 0으로 고정된 후 제작온도  $T_s$ 를 100°C에서 350°C까지 변화시키면서 제작한 ITO 박막의 van der Pauw Hall 측정에 의한 (a) 전기 비저항  $\rho$ , (b) 전하 농도  $n_H$ 와 전하유동도  $\mu_H$ .

하였다. 그림 4는 박막 제조 온도를 달리하여 제작한 ITO 박막의  $\rho$ ,  $n_H$ 와  $\mu_H$ 를 보여주고 있다. 상온에서 제작한 ITO 박막의 비저항은 1.3 m $\Omega$ ·cm이었고 제작 온도가 높아질수록 감소하여  $T_s = 300^\circ\text{C}$ 에서 제작한 ITO 시료의  $\rho$ 는 최소값 0.3 m $\Omega$ ·cm이었고  $T_s$ 가 350°C인 경우는  $\rho$ 가 약간 증가하였다.  $n_H$ 는 상온에서 제작한 ITO 시료의 경우  $4.7 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ 이었고,  $T_s$ 가 증가함에 따라 증가하다가 250°C에서 제작한 시료의 경우  $6.6 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ 로 최대값을 가지고  $T_s > 300^\circ\text{C}$  이상인 경우는 전하농도가 감소하여 350°C에서 제작한 시료의  $n_H$ 는  $4.9 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ 였다. 한편  $\mu_H$ 는 상온 제작한 시료의 경우 10 cm $^2$ /V·s이다가  $T_s$ 가 증가함에 따라 계속 증가하였고, 350°C에서 제작한 시료의 경우 39.3 cm $^2$ /V·s에 달하였다.  $n_H$ 가 250°C에서 제작된 시료에서 최대값이 관측되고  $\mu_H$ 는 350°C에서 제작된 시료에서 관측되었기 때문에, 전기 비저항  $\rho = 1/n_H\mu_H$ 은  $n_H\mu_H$ 가 최대화되는 300°C에서 제작한 시료가 최소값을 가지는 것으로 나타났다. 250°C 이상에서 제작한 ITO 박막의 경우는  $n_H$ 는  $T_s$ 에 따라 감소하지만  $\mu_H$ 가 커서  $\rho$ 가 작은 것으로 관측되었는데 이는 투명 전도막의 특징이 높은 광투과도와 전기 전도성을 동시에 가지는 것을 고려할 때 작은 전하 농도와 함께 높은 전하 유동도를 가지는 것이 더 높은 광투과도를 가지게 되므로 고온( $T_s > 250^\circ\text{C}$ )에서 제작한 ITO 박막의 특성이 저온( $T_s < 250^\circ\text{C}$ )에서 제작한 ITO 박막 보다 대체로 우수하다고 판단된다.<sup>18)</sup>

그림 5는 산소 유량 = 0으로 고정된 후  $T_s$ 를 상온에서 350°C까지 변화시키면서 제작한 ITO 박막의 X-선 회절 결과를

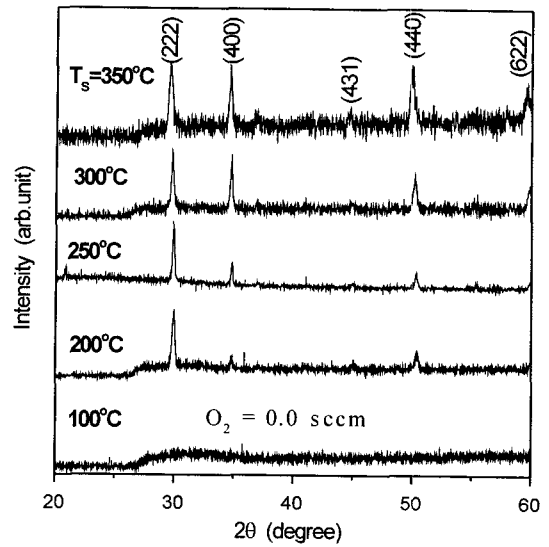


그림 5. Ar 유량 50 sccm, 증착압력 5 mtorr, 산소 유량 = 0으로 고정된 후 제작온도  $T_s$ 를 100°C에서 350°C까지 변화시키면서 제작한 ITO 박막의 X-선 회절도.

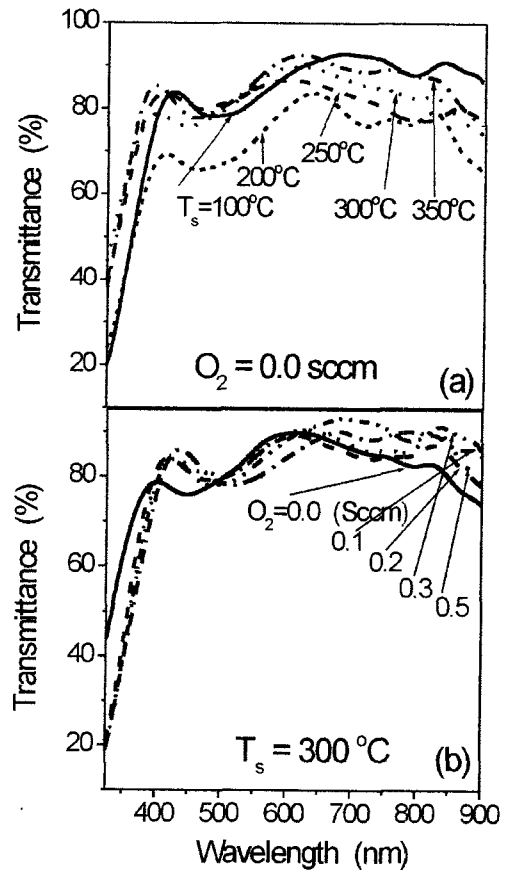


그림 6. (a) Ar 유량 50 sccm, 증착압력 5 mtorr, 산소 유량 = 0으로 고정된 후 제작온도  $T_s$ 를 100°C에서 350°C까지 변화시키면서 제작한 ITO 박막의 광투과도. (b) Ar 유량 50 sccm, 증착압력을 5 mtorr, 제작온도 300°C로 고정된 후 산소 유량을 0 sccm에서 0.5 sccm까지 변화시키면서 제작한 ITO 박막의 광투과도

보여주고 있다. 제작 온도가 100°C 이하인 경우 ITO 박막은 비정질이었으며 200°C 이상에서 제작한 ITO박막은 결정질로 나타났다. 이는 ITO 박막이 150°C에서 결정화된다고 알려진 것과 일치한다.<sup>1)</sup> 그림에 보이는 바와 같이 제작 온도를 달리 하여 제작한 ITO 박막의 X-선 회절 강도는 (222) peak의 강도가 가장 크고 (400), (440), (622) peak들의 강도는 시료 제작온도가 증가함에 따라 커져서 350°C에서 제작한 ITO의 경우 (222), (400), (440) peak들의 강도가 비슷하였다.

그림 6은 제작온도와 산소 유량을 변화시키면서 제작한 두께가 약 170 nm인 ITO 박막의 350~900 nm 영역에서의 광투과도를 보여주고 있다. 200°C에서 제작한 ITO를 제외한 모든 시료의 가시광선 영역인 400~700 nm에서의 광투과율은 80~90%로서 우수하였다. 파장이 430 nm 부근에서의 광투과율이 최고이고, 파장이 증가할수록 떨어지다가 530 nm 부근에서 최저의 광투과율을 나타내고 파장이 다시 증가함에 따라 광투과율이 증가하는 것으로 관측되었는데 이는 빛의 간섭 현상 때문으로 추정된다. 그림 6(a)에 나타난 바와 같이 상대적으로 전하 농도가 낮은 100°C, 300°C, 350°C에서 제작한 시료의 장파장 영역의 광투과도가 전하농도가 상대적으로 높은 250 °C에서 제작한 시료보다 큰 것으로 나타났는데 이는 전도 농도 커짐에 따라 전하에 의한 흡수도 증가하기 때문으로 판단된다. 또한 그림 6(b)에 나타난 바와 같이 300°C에서 산소 유량을 변화시키면서 제작한 ITO 박막의 경우도 장파장 영역의 광투과도는 전하 농도가 최대값을 가지는 산소 유량(= 0.0 sccm)에서 제작한 시료가 최소값을 보이는 것으로 나타났다.

#### IV. 결 론

직류 스퍼터링 방법으로 성장 온도  $T_s(100^\circ\text{C} \leq T_s \leq 350^\circ\text{C})$ 와 산소 유량( $0 \text{ sccm} \leq \text{산소유량} \leq 0.5 \text{ sccm}$ )을 변화시키면서 제작한 ITO 박막의 전기적, 광학적 특성을 조사하였다. ITO 박막의 최대 전하농도, 최대 전하 유동도, 최소 전기 비저항은 각각  $6.6 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ ,  $39.3 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ,  $0.3 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}$ 였다. 동일 온도에서 제작한 ITO 박막의 경우 산소 유량이 적을수록 전하농도, 전하 유동도는 크게 나타났으며, 전기 비저항은 작게 나타났다. 제작 온도를 변화시키면서 제작한 ITO 박막의 경우 제작 온도가 증가함에 따라 전기 비저항은 감소하고 전하 유

동도는 증가하는 것으로 나타났다. ITO 박막의 광투과율은 가시 광 영역에서 80~90%이었으며, 전하 농도의 증가와 더불어 광투과율은 다소 감소하는 경향을 보였다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 : 2002-2-12100-002-3) 지원으로 수행되었음.

#### 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] H. Kim, C. M. Gilmore, A. Pique, J. S. Horwitz, H. Mattoussi, H. Murata, Z. H. Kafafi, D. B. Chrisey, "Electrical, optical, and structural properties of indium-tin-oxide thin films for organic light-emitting devices," *J. Appl. Phys.* vol 86, no. 11, pp. 6451-6461, 1999.
- [7] Hyo-Young Yeom, Natasha Popovich, Eric Chason, David C. Paine, "A study of effect of process oxygen on stress evolution in d.c. magnetron-deposited tin-doped indium oxide," *Thin Solid Films* vol 411, 17-22, 2000.
- [8] 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.
- [9] 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.

**Transport and optical properties of indium tin oxide films  
fabricated by reactive magnetron sputtering**

Seokmin Hwang and H. L. Ju<sup>†</sup>

*Departemnt of Physics, Yonsei University Shinchon Dong, Seodaemoon-gu, Seoul 120-749, KOREA*

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

Changwoo Park

*Department of Chemical Engineering, Hanbat National University of Technology, Yuseung-Ku, Taejon 305-710, KOREA*

(Received January 10, Revised manuscript May 7, 2003)

Indium tin oxide (ITO) thin films (170 nm) were grown by DC magnetron sputtering deposition on Corning glass substrates without a post annealing. The electrical transport and optical properties of the films have been investigated as a function of deposition temperature  $T_S$  ( $100^\circ\text{C} \leq T_S \leq 350^\circ\text{C}$ ) and oxygen partial pressure  $P_{O_2}$  ( $0 \leq P_{O_2} \leq 10^{-5}$  torr). Films were deposited from a high density (99% of theoretical density) ITO target ( $\text{In}_2\text{O}_3 : \text{SnO}_2 = 90 \text{ wt\%} : 10 \text{ wt\%}$ ) made of ITO nano powders. With an increase of  $T_S$  the electrical resistivity  $\rho$  of ITO thin films was found to decrease, but the mobility  $\mu_H$  was found to increase. The carrier density  $n_H$  shows the maximum value of  $6.6 \times 10^{20}/\text{cm}^3$  at  $T_S = 300^\circ\text{C}$ . At fixed  $T_S$ , with an increase of the oxygen partial pressure,  $n_H$  and  $\mu_H$  were found to decrease, but  $\rho$  was found to increase. The minimum resistivity and maximum mobility values of the ITO films were found to be  $0.3 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}$  and  $39.3 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ , respectively. The visible transmittance of the ITO films was above 80%.

OCIS Codes : 318.6860, 310.6870, 310.1860, 310.3840.