

## 동일 증착 조건의 스퍼터링에 의해서 제작한 Indium Tin 산화물 박막의 증착위치에 따른 전기적 특성의 불균질성

유동주<sup>†</sup> · 최시경

한국과학기술원 재료공학과

(2001년 7월 11일 접수; 2001년 10월 22일 승인)

## Nonhomogeneity of the Electrical Properties with Deposition Position in an ITO Thin Film Deposited under a Given R.F. Magnetron Sputtering Condition

Dong-Joo You<sup>†</sup> and Si-Kyung Choi

Department of Materials Science and Engineering, Korea Advanced Institute of  
Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea

(Received July 11, 2001; Accepted October 22, 2001)

### 초 록

Sn을 도핑한 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (ITO) 박막을 R.F. 마그네트론 반응성 스퍼터링법에 의해서 증착하였다. 동일한 마그네트론 스퍼터링 조건에서 증착위치에 따른 ITO 박막의 저항, 자유 전하 농도 및 이동도 등의 전기적 특성을 조사하였다. 동일한 마그네트론 스퍼터링 조건임에도 불구하고, ITO 박막의 전기적 특성은 증착위치에 따라 불균질성을 나타내었다. 타겟의 중심에 위치한 기판 위에 증착된 ITO 박막의 저항은 최소 값인  $2\sim 4 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 인 반면, 중심에서 멀어질수록 박막의 전기 저항은 대칭적으로 증가하였다. ITO 박막의 밀도 측정 결과도 중심에서 이론 밀도 값의 97%에 해당하는  $7.0 \text{ g/cm}^3$ 를 나타내나, 위치가 중심에서 멀어질수록 박막의 밀도가 대칭적으로 감소하였다. 증착 위치에 따른 박막의 밀도 차이는 atomic self-shadowing effect와 관련된 source beam의 입사각도  $\alpha$ 로 설명이 가능하였다. ITO 박막에서 이동도와 전도도는 밀도에 직접적으로 영향을 받는 것이 실험적으로 확인되었다. ITO 박막의 밀도가  $7.0 \text{ g/cm}^3$ (이론 밀도의 97%)인 경우, 자유행정거리와 입자크기(=주상의 직경)가 동일한 값을 가지나, 밀도가 이 보다 감소하면 자유행정거리와 입자크기의 차이는 더욱 증가하였다. 이 결과는 ITO 박막의 밀도가  $7.0 \text{ g/cm}^3$ 인 경우는 입계가 자유 전자의 전도에 중요한 산란 원인으로 작용하는 반면, 그 외의 경우는 결정 내의 공격자점, 공공, 기공 등이 다른 산란 원인으로 작용하고 있다는 것을 나타낸다.

### ABSTRACT

Tin-doped indium oxide (ITO) thin films were deposited using r.f. magnetron reactive sputtering and the electrical properties, such as the resistivity, carrier concentration and mobility, were investigated as a function of the sample position under a given magnetron sputtering condition. The nonhomogeneity of the electrical properties with the sample position was observed under a given magnetron sputtering condition. The resistivity of ITO thin film on the substrate which corresponded to the center of the target had a minimum value,  $2\sim 4 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ , and it increased symmetrically when the substrate deviated from the center. The density measurement result also showed that ITO thin film deposited at the center had a maximum density of  $7.0 \text{ g/cm}^3$ , which was a relative density of about 97%, and the density decreased symmetrically as the substrate deviated from the center. The nonhomogeneity of electrical properties with the deposition position could be explained with the incidence angle of the source beam  $\alpha$ , which is related with an atomic self-shadowing effect. It was confirmed experimentally that the density in film affect both the carrier mobility and the conductivity. In the case where the density of ITO thin film is  $7.0 \text{ g/cm}^3$ , the magnitude of the mean free path was identical with that of the grain size (the diameter of column). However, in the other cases, the mean free path was smaller than the grain size. These results showed that the scattering of the free electrons at the grain boundary is the major factor for the electrical conduction in ITO thin films having a high density, and there exists other scattering sources such as vacancies, holes, or pores in ITO thin films having a low density.

**Key words :** ITO thin film, Deposition position, Nonhomogeneity of electrical properties, Film density

### 1. 서 론

Sn을 도핑한 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (ITO) 박막은 비교적 낮은 전기 저항과

높은 밴드갭 에너지(3.55 eV-3.75 eV)로 인하여 가시광선 영역에서 높은 투과도를 가진다.<sup>1)</sup> 이와 같은 특성 때문에, ITO 박막은 Liquid-Crystal Display(LCD), Electrolu-minescent Display(ELD) 그리고 Light-emitting 다이오드와 같은 다양

<sup>†</sup>Corresponding author : dongjoo@cais.kaist.ac.kr

한 표시 소자의 투명 전극으로 널리 사용되고 있다.<sup>1)</sup> 기술의 발전은 빠른 응답시간과 대 면적을 가진 표시소자를 요구하고, 이를 만족시키기 위해 낮은 저항을 가진 ITO 박막에 대한 연구가 진행되어 왔다.<sup>2,4)</sup> R.F. 마그네트론 스퍼터링법은 낮은 저항과 재현성을 가진 ITO 박막의 제조가 용이하다는 이점 때문에 공업적으로 널리 사용되고 있다.<sup>5,6)</sup>

증착되는 원자의 이동도가 제한적일 때, 기상 증착법에 의해 제조되는 박막은 일반적으로 주상구조(columnar structure)로 성장한다.<sup>7)</sup> 주상구조의 성장 방향은 재료 자체의 특성뿐만 아니라 증착온도, 증착속도, 입사각도 등의 증착조건에 의존한다. 여기서, 입사각도란 기판 표면의 법선과 source beam이 들어오는 방향 사이의 각도  $\alpha$ 로 정의된다.<sup>7)</sup> 입사각도가 커지면 주상 조직의 성장 방향은 물론이고, atomic self-shadowing effect의 증가로 박막의 밀도도 감소하는 것으로 보고되고 있다.<sup>7,8)</sup> 최근, Co,<sup>8,9)</sup> Ni<sup>10)</sup> 및 Fe<sup>11)</sup> 박막에서는 입사각도가 결정구조, 자기 및 전기적 특성을 결정하는 중요한 변수로서 고려되고 있다. 마그네트론 스퍼터링의 경우, 입사각은 기판의 증착위치에 따라 변한다. 그러므로, 동일 증착 조건이라도, 기판의 위치에 따라 박막의 밀도가 변하고, 이 변화에 의해서 박막의 물성치가 위치에 따라서 불균질해 질 것으로 예상된다. 현재까지, 마그네트론 스퍼터링의 경우에 동일한 증착조건에서 기판의 위치에 따른 박막 물성치의 불균질성을 구체적으로 조사한 연구는 많지 않다. 또한 박막의 밀도를 실험적으로 측정하기가 어렵기 때문에, 박막의 물성치를 밀도와 연관시켜서 이해하려는 연구 결과도 많지가 않다.

본 연구에서는 R.F. 마그네트론 반응성 스퍼터링법을 사용하여 동일 증착 조건에서 ITO 박막을 증착하여 기판의 위치에 따른 전기적 특성의 불균질성을 확인하였다. 전기 저항과 캐리어 이동도가 기판의 중심 영역에서 최소 및 최대치를 나타내었다. 기판 위치에 따른 이들 전기적 특성의 불균질성을 실험적으로 측정하여 박막의 밀도 변화로 설명하였다.

## 2. 실험방법

R.F. 마그네트론 반응성 스퍼터링법에 의해서 2인치 크기의 In-10 wt%Sn 합금 타겟을 사용하여 ITO 박막을 제조하였다. 타겟과 기판과의 거리는 7 cm로 일정하게 하였다. 진공 증착 장치는 로터리 펌프와 터보분자 펌프로 구성되었으며, 초기진공은  $5 \times 10^{-6}$  torr로 고정하였다. Ar과 14 vol% O<sub>2</sub>의 혼합 가스를 작업 가스로 사용하였고, 작업압력은 5 mtorr로 고정하였다. R.F. 파워는 70 W로 일정하게 하였으며, 기판은 코닝 1737 유리를 이용하였다. 기판온도는 예비 실험을 통해서 낮은 저항과 높은 결정성을 나타내는 온도인 250°C로 일정하게 하였다. 재현성 있는 타겟 표면을 유지하기 위해서 박막증착 전에 10분간 동일조성의 혼합가스를 이용하여 10분간 예비 스퍼터링(presputtering)하였다. 일부 시

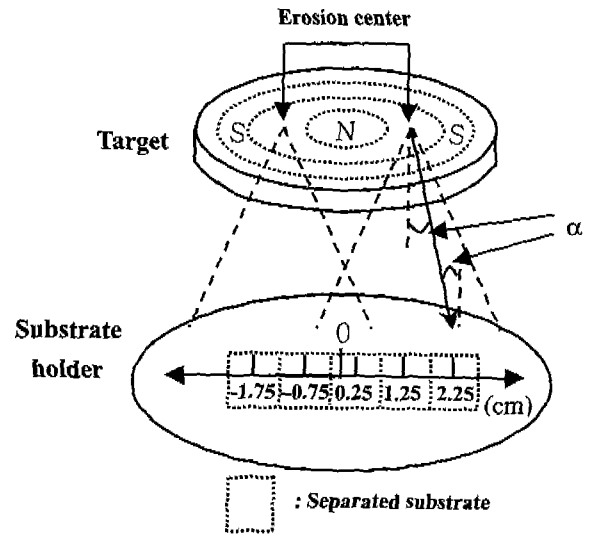


Fig. 1. Experimental set-up under a given magnetron sputtering condition. Each substrate ( $1 \times 1 \text{ cm}^2$ ) was lined in the x-direction on the substrate holder.

편은 진공상태에서 250°C, 1시간 열처리(annealing)하였다.

증착 위치에 따른 전기적 특성의 불균질성을 관찰하기 위한 실험 개요는 Fig. 1과 같다.  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  크기의 기판 5개를 x 축 방향으로 그림과 같이 기판 지지대 위에 정렬하였다. 각 위치에서 증착속도는 80 nm/min으로 거의 일정하였으며, 모든 ITO 박막의 두께는  $1600 \pm 50 \text{ \AA}$ 로 일정하게 하였다. 전기적 특성은 각 기판에서 복수로 측정하여 평균값을 그림에 표시한 위치에 대해서 나타내었다. 그림에서 알 수가 있듯이, 동일 스퍼터링 조건에서도 기판의 증착위치에 따라 source beam의 입사각은 변화한다. 증착위치가 -0.75 cm와 1.25 cm일 때는 수직인 각도에서 beam이 입사하고, 그 외의 경우는 비스듬하게 입사한다.

상분석은 X-Ray Diffractometer(XRD)를 이용하였다. 실험에 사용된 모든 시편은 (111) 우선배향성을 가진 ITO 상을 가졌다. 박막의 저항과 홀 계수는 상온에서 Van der pauw 법을 적용하였고, 홀계수를 이용하여 캐리어 농도와 이동도를 계산하였다. 박막의 표면과 단면은 Field Emission Scanning Electron Microscopy(FESEM)을 이용하여 관찰하였다. 박막 중의 잔류응력은 x-선 회절에 의한  $\sin^2\psi$  법에 의해서 평가하였다. 박막의 밀도는 Bede Scientific Instruments Ltd의 D3 system diffractometer를 사용하여 소각 입사 x-선 반사법(Grazing Incidence X-ray Reflectivity: GIXR)으로 측정하였다.<sup>12,13)</sup>

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 열처리 전후, 증착위치에 따른 ITO 박막의 전기 저항을 나타낸 것이다. ITO 박막에서 낮은 전기 저항 값을 얻기 위해서 본 연구에서는 진공 열처리 과정을 일부 시편

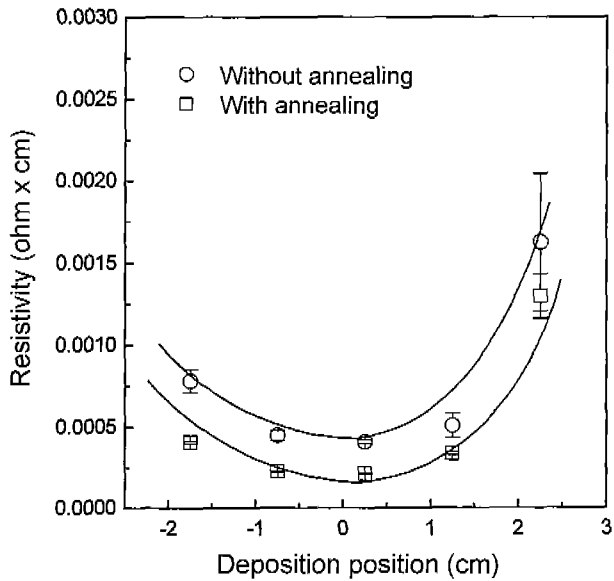


Fig. 2. Dependence of resistivity of ITO thin films on the sample position before and after annealing treatment.

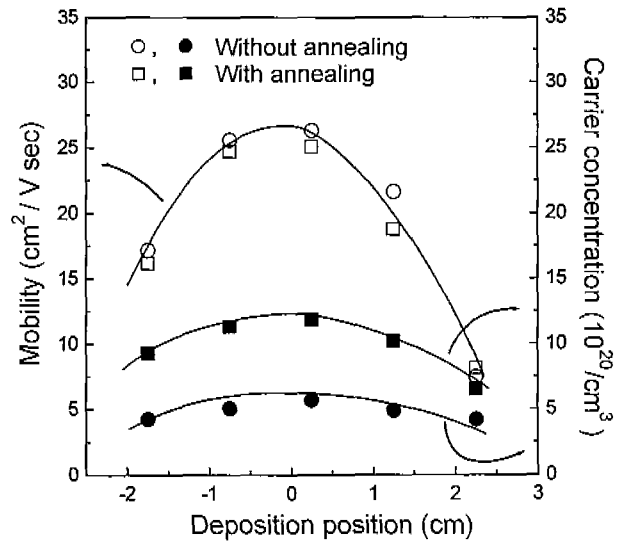


Fig. 3. Dependence of mobility and carrier concentration of ITO thin films on the sample position before and after annealing treatment.

에서 첨가하였다. 열처리를 하지 않은 경우, 기관의 증착 위치가 0.25 cm(이후 '중심'으로 표현)일 때 ITO 박막은 가장 낮은 저항 값을 나타내며, 중심에서 멀어질수록 저항 값은 대칭적으로 증가한다. 이 경향은 열처리 후에도 변하지 않는다. 열처리 후에는 모든 시편에서 저항 값이 조금씩 감소한다. 본 연구에서 얻어진 ITO 박막의 전기 저항의 최소 값은  $2\sim4 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 이며, 이는 다양한 증착법에 의해서 제조한 ITO 박막의 전기 저항 값과 비교할 때 최소 값에 해당한다.<sup>2,4)</sup> ITO 박막의 전기 저항의 위치에 따른 불균질성은 공업적 응용의 대면적 ITO 박막에서는 매우 중요한 관찰 결과이다.

저항  $\rho$ 은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$1/\rho = \sigma = \mu \cdot u \cdot e \quad (1)$$

$\sigma$ 는 전도도,  $\mu$ 는 자유전하의 이동도(mobility),  $n$ 은 자유전하의 농도,  $e$ 는 전하이다. 증착위치에 따른 ITO 박막의 자유전하 이동도와 농도는 홀 계수 측정을 통하여 계산하였다. 그 결과를 Fig. 3에 나타낸 것이다. 열처리를 실시하지 않은 ITO 박막의 이동도와 농도는 중심에서 최대 값을 가지고, 중심에서 멀어질수록 거의 대칭적으로 감소하며, 이 경향은 열처리 후에도 동일하다. 자유 전하의 이동도는 열처리와는 관계없이 거의 동일 위치에서 동일한 값을 나타내어, 증착

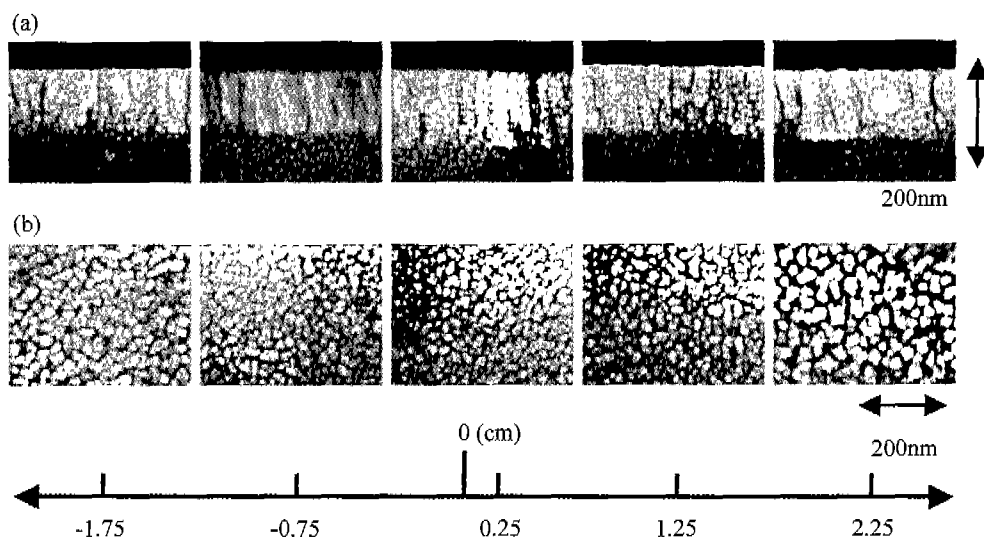


Fig. 4. Typical FE-SEM photographs of (a) cross-sectional view and (b) surface of ITO thin films before annealing treatment.

위치에 대해서 크게 의존한다. 그러나, 자유 전자 농도는 열처리를 통해서 약간 증가하지만, 증착 위치에 대해서는 이동도처럼 크게 의존하지 않는다. 진공에서의 열처리 식 (2)와 같이 산소 공공을 생성한다고 보고되었다.



산소공공은 이중 이온 도너로서 작용하며, 전기 전도에 최대 2개의 전자를 제공한다. 열처리에 의해서 자유 전자 농도는 증가하고, 이 증가에 의해서 전기 저항은 약간 감소 (Fig. 2)하는 것으로 생각된다. Fig. 2에 나타낸 저항은 식 (1)에서 알 수가 있듯이 비저항은 자유전하의 이동도와 농도에 의존한다. Fig. 3에서 자유전하의 이동도와 농도의 변화가 같은 상대크기로 나타낸 것을 고려하면, 본 연구에서 ITO 박막의 전기 저항 값이 위치에 따라서 변하는 것은 자유전하의 이동도에 크게 의존하는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 열처리를 실시하지 않은 ITO 박막에 대해서 FE-SEM으로 관찰한 단면 및 표면 미세 조직 사진을 증착 위치를 변수로 나타낸 것이다. 본 연구에서 전기적 특성의 관찰에 사용한 모든 시편은 주상구조로 성장한 ITO 박막이고, 두께는  $1600 \pm 50 \text{ \AA}$ 으로 일정하다. ITO 박막의 증착위치가 중심에서 멀어질수록 입자크기('주상의 직경'으로 정의)는 증가한다. 이러한 입자크기만으로 Fig. 2 및 Fig. 3에 나타낸 증착 위치에 따른 전기적 특성의 불균질을 설명할 수가 없다. Fig. 4의 표면사진을 관찰하면 중심으로 갈수록 막이 보다 치밀해지는 것을 관찰할 수 있다. 이는 막의 치밀도와 Fig. 2와 Fig. 3의 전기적 특성이 관련이 있을 것으로 기대된다.

Ishibashi<sup>15)</sup>등도 DC 마그네트론 스퍼터링을 이용하여 ITO 박막을 증착한 결과, 증착위치에 따라 저항이 바뀌는 것을 관찰하였다. 그들은 증착위치에 따른 저항의 불균질성을 음이온 손상(negative ions damage)으로 해석하였다. 그들의 연구에 따르면 스퍼터링 전압이 -250 V 이상으로 증가하면 음이온 손상 효과가 명확히 관찰되고, 스퍼터링 전압이 -110 V인 경우 음이온 손상 효과가 거의 관찰되지 않았다. RF 마그네트론 스퍼터링을 이용한 본 연구의 경우, DC 스퍼터링 전압에 해당되는 셀프 바이어스 전압(self bias voltage)은 -82 V이다. 그러므로, 본 연구에서 관찰된 증착 위치에 따른 ITO 박막의 전기적 특성의 불균질성은 Ishibashi<sup>15)</sup>등이 제안한 음이온 손상으로는 설명이 어렵다고 생각된다.

Fig. 5에 열처리 전의 ITO 박막에 대해서 x-선 회절을 이용한  $\sin^2\psi$ 법으로 잔류 응력을 측정된 결과를 증착 위치에 대해서 나타낸다. 박막중의 전체 잔류 응력  $\sigma_{total}$ 은, 증착시에 생성되는 고유 응력  $\sigma_{intrinsic}$ 과 기판과 박막의 열팽창 계수의 차이에서 발생하는 열 응력  $\sigma_{thermal}$ 의 합이다.<sup>16)</sup> X-선 회절에 의해서 측정되는 박막중의 잔류 응력은 전체 응력  $\sigma_{total}$ 이다. Fig. 5에서 y축의 음의 부호는 압축 응력을

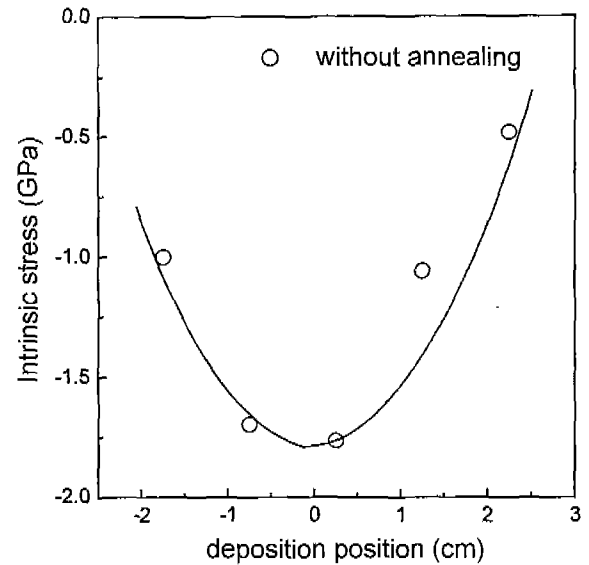


Fig. 5. Dependence of intrinsic stress of ITO thin films on the sample position before annealing treatment.

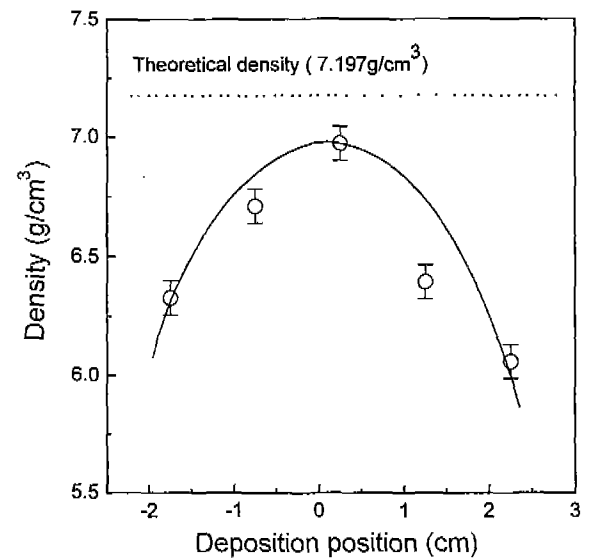


Fig. 6. Dependence of film density of ITO thin films on the sample position before annealing treatment.

나타낸다. 증착 위치가 중심인 ITO 박막 시편이 최대의 압축 응력을 나타내고, 위치가 중심에서 멀어질수록 압축 응력도 대칭적으로 감소한다. 스퍼터링법에 의해서 제조된 박막 중에 압축응력은 atomic peening 효과에 의해서 생성되는 것으로 잘 이해되고 있다.<sup>17)</sup> Atomic peening 효과가 클수록 압축응력은 증가하고, 박막의 밀도도 동시에 증가한다.<sup>18)</sup> 그러므로, Fig. 5는 증착위치에 따라서 ITO 박막의 밀도가 변한다는 것을 제시하는 결과이다.

Fig. 6은 열처리 전의 ITO 박막에서 GIXR법을 사용하여 측정된 밀도를 증착위치에 대해서 나타낸 것이다. 그림 중

의 점선은 ITO 벌크 재료의 이론 밀도(7.197 g/cm<sup>3</sup>)를 나타낸 것이다. 대부분의 박막 증착법에 의해서 제조된 박막은 이론밀도 보다 낮은 밀도 값을 갖는 것으로 알려져 있다.<sup>12,19,20</sup> 본 연구에서 제조된 ITO 박막도 모두 이론 밀도 보다 낮은 밀도 값을 나타낸다. 중심에서 증착한 ITO 박막의 밀도는 7.0 g/cm<sup>3</sup>으로 최대 값을 가지며, 이 값은 이론 밀도의 97%에 해당한다. 증착 위치가 중심에서 멀어지면, ITO 박막의 밀도도 Fig. 5에서 예상할 수 있듯이 대칭적으로 감소한다.

증착위치에 따른 ITO 박막의 밀도 변화는 atomic self-shadowing effect로 설명이 가능하다.<sup>7,8</sup> Atomic self-shadowing은 주상 입자의 뒷면에 공간을 형성한다. 즉 atomic self-shadowing effect가 증가하면 박막의 밀도는 낮아진다. 중심(Fig. 1의 0.25 cm의 위치)에서 증착된 ITO 박막은 Fig. 1에 도식적으로 나타낸 바와 같이 두 개의 마그네트론 영역 하에 존재하기 때문에 가장 낮은 atomic self-shadowing effect가 예상된다. 기판 표면 법선과 source beam과의 각도  $\alpha$ 가 증가하면 atomic self-shadowing effect는 증가한다.<sup>7,8</sup> Fig. 1에서 알 수 있듯이 -0.75 cm와 1.25 cm의 위치에서 증착된 ITO 박막은 source beam이 수직하게 ( $\alpha=0$ ) 들어오는 효과를 나타내는 조건에서 성장한 것이고, 반면에 다른 위치에서 증착된 시편은 source beam이 비스듬하게 ( $\alpha > 0$ ) 입사하는 조건에서 성장한 것이다. 그러므로, -0.75 cm와 1.25 cm의 위치에서 증착된 ITO 박막은 -1.75 cm와 2.25 cm에서 증착된 박막에 비하여 낮은 atomic self-shadowing effect 하에서 성장한 박막이다. 그러므로, 증착 위치가 중심에서 멀어질수록 atomic self-shadowing effect는 증가하고, ITO 박막의 밀도는 Fig. 6과 같이 감소한다.

앞서, Fig. 2의 증착 위치에 따른 전기 저항의 변화는 자유 전하의 이동도에 크게 의존한다고 기술하였다. Fig. 7은

열처리 전의 ITO 박막의 밀도 변화에 대한 자유 전하의 이동도 및 전도도(전기 저항의 역수) 변화를 나타낸 것이다. 이동도와 전도도는 ITO 박막의 밀도가 증가함에 따라서 증가하다가, 이론 밀도에 접근함(~6.8 g/cm<sup>3</sup>이상)에 따라서 동일하게 포화되는 경향을 나타내고 있다. 이 결과는 자유 전하의 이동도가 박막의 밀도에 매우 민감함을 나타내고 있다.

평균 자유 행정(mean free path)을 퇴보 전자 가스 모델<sup>21</sup>(highly degenerate electron gas model)을 사용하여 계산하였다.

$$V_F = (3\pi^2)^{1/3} (\eta/m^*)n^{1/3} \quad (3)$$

$$L = V_F \times \tau = (3\pi^2)^{1/3} (\eta e^{-2})\rho^{-1} n^{-2/3} \quad (4)$$

여기서  $V_F$ 는 Fermi level에서의 전자속도,  $\eta$ 는 플랑크 상수,  $m^*$ 는 자유전자의 유효질량,  $n$ 은 자유전자의 농도,  $\tau$ 는 완화시간,  $\rho$ 는 저항이다. 공격자점, 공공, 기공, 전위, 결정 입계 및 상 경계등은 모두 평균 자유 행정에 크게 기여한다. Kamei *et al.*<sup>22</sup>와 Shigesato와 Paine<sup>23</sup>는 ITO 박막에서 평균 자유 행정은 평균 입자크기 보다 작으므로 입계에서의 전자 산란이 중요하지 않다고 제안하였다. 식(4)에서 계산한 평균 자유 행정을 ITO 박막의 밀도에 대해서 Fig. 8에 나타낸다. 그림에는 Fig. 4(b)의 표면 사진에서 측정된 입자 크기도 동시에 나타낸다. ITO 박막 밀도가 증가함에 따라 평균 자유 행정은 증가하다가, 6.7 g/cm<sup>3</sup> 이상의 밀도에서 포화된다. 입자 크기는 반대로 감소하다가 동일 밀도 이상에서 포화하는 경향을 나타낸다. ITO 박막의 밀도가 이론 밀도에 근접한 7.0 g/cm<sup>3</sup>인 경우, 평균 자유 행정 값은 최대를 나타내고, 이 값은 입자 크기와 거의 동일하다. 이 결과는 ITO 박막의 밀도가 이론밀도에 근접하는 경우, 입계에서의 전자산란이 ITO 박막의 이동도를 결정하는 중요한 인자일 수 있다는 것을 나타내고 있다. 그러나 ITO 박

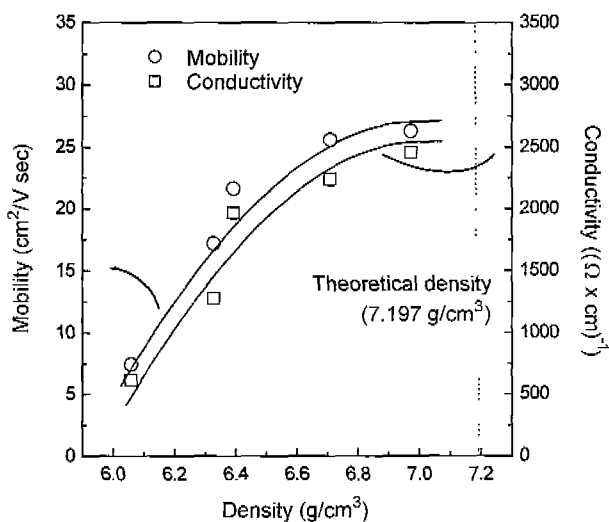


Fig. 7. Dependence of mobility and conductivity of ITO thin films as a function of density before annealing treatment.

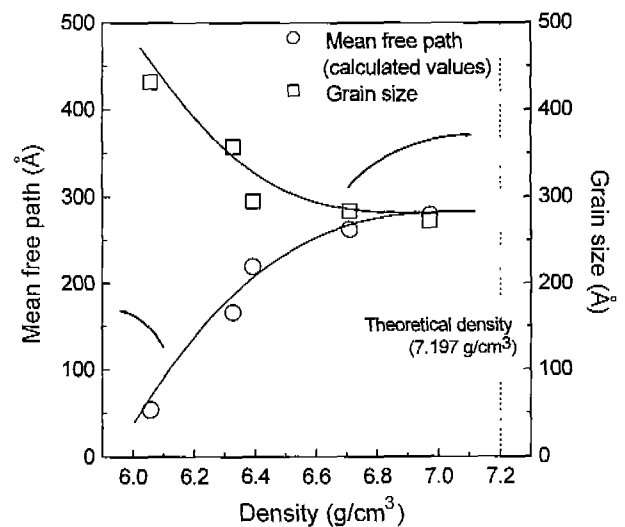


Fig. 8. Variation of mean free path and grain size of ITO thin films as a function of density before annealing treatment.

막의 밀도가  $7.0 \text{ g/cm}^3$  보다 작은 경우, 평균 자유 행정은 입자크기 보다 작다. ITO 박막의 밀도가 감소할수록, 입자크기와 평균 자유 행정과의 차이는 증가한다. 이 결과는 박막의 결정 내에 밀도에 직접적으로 영향을 미치는 공격자점, 공공, 기공 등이 자유 전자의 산란인자로서 작용하고 있다는 것을 나타내고 있다.

#### 4. 결 론

마그네트론 반응성 스퍼터링법을 사용해서 ITO 박막을 증착하는 경우, 동일 증착 조건에서 증착위치에 따른 박막의 전기적 특성의 불균질성을 관찰하였다. 타겟의 중심에 위치한 기관 위의 ITO 박막은  $2\sim 4 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 의 최소 저항 값을 나타낸 반면, 중심에서 멀어질수록 저항 값은 대칭적으로 증가하였다. 자유 전자의 이동도도 중심에서  $\sim 26.5 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$  로 최대치를 나타내다가 중심에서 멀어지면 대칭적으로 감소하였다. 또한, ITO 박막의 밀도 측정에서도, 중심에서는 이론 밀도의 97%에 해당하는  $7.0 \text{ g/cm}^3$ 의 최대 밀도를 나타내나, 중심에서 멀어질수록 대칭적으로 감소하였다. 증착 위치에 따른 ITO 박막의 밀도 변화는 atomic self-shadowing effect와 관련된 source beam의 입사각  $\alpha$ 로 설명이 가능하였다. 이동도와 전도도는 ITO 박막의 밀도가 증가함에 따라 증가하다가 이론밀도에 근접하면 포화되는 경향을 나타내었다. 이동도가 포화되는 밀도에서는 자유행정 거리는 입자크기와 비슷하나, 밀도가 감소할 수록 자유행정 거리와 입자크기와의 차이는 증가하였다. 이 결과는 ITO 박막의 밀도가 이론 밀도에 근접한 경우에는 입계가 자유전자의 전도에 중요한 산란 원이고, 밀도가 낮은 경우에는 밀도와 관련되는 공격자점공공, 기공 등의 다른 산란 원이 존재한다는 것을 나타내었다.

#### 감사의 글

본 연구는 2001년도 BK 21 사업 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### REFERENCES

1. K. L. Chopra, S. Major and D. K. Pandya, "Transparent Conductors-A Status Review," *Thin Solid Films*, **102**, 1-8 (1983).
2. S. Takaki, K. Matsumoto and K. Suzuki, "Properties of Highly Conducting ITO Films Prepared by Ion Plating," *Appl. Surf. Sci.*, **33/34**, 919-925 (1988).
3. S. Ishibashi, Y. Higuchi, Y. Ota and K. Nakamura, "Low Resistivity Indium-tin Oxide Transparent Conductive Films. II. Effect of Sputtering Voltage on Electrical Property of Films," *J. Vac. Sci. Technol.*, **A8**, 1403-1406 (1990).
4. Y. Shigesato, S. Takaki and T. Haranoh, "Electrical and Structural Properties of Low Resistivity Tin-doped Indium Oxide Films," *J. Appl. Phys.*, **71**, 3356-3364 (1992).
5. W. F. W and B. S. Chiou, "Effect of Annealing on Electrical and Optical Properties of RF Magnetron Sputtered Indium Tin Oxide Films," *Appl. Surf. Sci.*, **68**, 497-504 (1993).
6. B. S. Chiou and S. T. Hsieh, "RF Magnetron-sputtered Indium Tin Oxide Film on a Reactively Ion-etched Acrylic Substrate," *Thin Solid Films*, **229**, 146-155 (1993).
7. A. G. Dirks and H. J. Leamy, "Columnar Microstructure in Vapor Deposited Thin Films," *Thin Solid Films*, **47**, 219-233 (1977).
8. K. Itoh, K. Okamoto and T. Hashimoto, "Crystallographic Contribution to the Formation of the Columnar Grain Structure in Cobalt Films Deposited at Oblique Incidence," *J. Magn. Magn. Mater.*, **190**, 176-182 (1998).
9. K. Hara, K. Itoh, K. Okamoto and T. Hashimoto, "Crystallographic Contribution to the Formation of the Columnar Grain Structure in Cobalt Films," *J. Magn. Magn. Mater.*, **162**, 177-182 (1996).
10. T. Otiti, G. A. Niklasson, P. Svedlindh and C. G. Granqvist, "Anisotropic Optical, Magnetic, and Electrical Properties of Obliquely Evaporated Ni Films," *Thin Solid Films*, **307**, 245-249 (1997).
11. S. Iwatsubo, T. Takahashi and M. Naoe, "Angular Dependence of Magnetism of Fe Films Sputtered with Ion Beam Perpendicular to Target," *J. Appl. Phys.*, **85**, 5995-5997 (1999).
12. M. Huppaufl, K. Bange and B. Lengeler, "Density, Thickness and Interface Roughness of  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  and  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  on BK-7 Glasses Analyzed by X-ray Reflection," *Thin Solid Films*, **230**, 191-198 (1993).
13. G. S. Lodha, S. Basu, A. Gupta, S. Pandita and R. V. Nandedkar, "X-ray and Neutron Reflectivity Measurements for Characterizing Thin Gold Film X-ray Reflectors," *Phys. Stat. Sol. (a)*, **163**, 415-424 (1997).
14. S. Honda, A. Tsujimoto, M. Watamori and K. Oura, "Oxygen Content of Indium Tin Oxide Films Fabricated by Reactive Sputtering," *J. Vac. Sci. Technol.*, **A13**, 1100-1103 (1995).
15. S. Ishibashi, Y. Higuchi, Y. Ota and K. Nakamura, "Low Resistivity Indium-tin Oxide Transparent Conductive Films. II. Effect of Sputtering Voltage on Electrical Property of Films," *J. Vac. Sci. Technol.*, **A8**, 1403-1406 (1990).
16. V. Orlinov and G. Sarov, "Mechanical Stresses in D.C. Reactively Sputtered  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  Thin Films," *Thin Solid Films*, **68**, 333-343 (1980).
17. F. M. D'Heurle and J. M. E Harper, "Note on the Origin of Intrinsic Stresses in Films Deposited via Evaporation and Sputtering," *Thin Solid Films*, **171**, 81-92 (1989).
18. H. M. Choi, S. K. Choi, O. Anderson and K. Bange, "Influence of Film Density on Residual Stress and Resistivity for Cu Thin Films Deposited by Bias Sputtering," *Thin Solid Films*, **358**, 202-205 (2000).
19. H. K. Pulker, *Coatings on Glass*, Elsevier, Amsterdam (1984).
20. K. H. Gurtler, K. Bange, W. Wagner, F. Rauch and H. Hantsche, "Characterization of  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  Layers by Electron

- Spectroscopy for Chemical Analysis Rutherford Back Scattering Spectrometry, Nuclear Reaction Analysis and Optical Methods," *Thin Solid Films*, **175**, 185-189 (1989).
21. C. Kittel, Introduction to Solid State Physics, 5th ed, Chap. 6 (1985).
  22. M. Kamei, T. Yagami, S. Takaki and Y. Shigesato, "Heteroepitaxial Growth of Tin Doped Indium Oxide Films on Single Crystalline Ytria Stabilized Zirconia Substrates," *Appl. Phys. Lett.*, **64**, 2712-2714 (1994).
  23. Y. Shigesato and D. C. Paine, "Study of the Effect of Sn Doping on the Electronic Transport Properties of Thin Film Indium Oxide," *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 1268-1270 (1993).