

## Indium Tin Oxide (ITO) 투광성 박막의 제조 및 전자파 차폐특성

김영식 · 전용수 · 김성수  
충북대학교 재료공학과

### Fabrication of Indium Tin Oxide (ITO) Transparent Thin Films and Their Microwave Shielding Properties

Young-Sik Kim, Yong-Soo Jun and Sung-Soo Kim  
Department of Materials Engineering, Chungbuk National University

(1999년 6월 5일 받음, 1999년 9월 1일 최종수정본 받음)

**초 록** 투명차폐재를 목적으로 Indium Tin Oxide (ITO) 투광성 박막을 제조하고 전자파 차폐특성에 대해 조사하였다. 박막은 RF magnetron co-sputtering 증착장비를 사용하여 제작하였다. RF 인가전력, Ar 및 O<sub>2</sub> 분압, 기판온도를 변화시키며 전기전도도와 투광성을 겸비한 박막의 조성과 구조에 관한 실험을 진행하였다. 최적의 증착조건은 300 °C의 기판온도, 20 sccm의 아르곤 유량, 10 sccm의 산소유량, 그리고 In과 Sn의 인가전력이 각각 50 W와 30 W일 경우였으며, 이 때 얻어진 박막은 육안으로 분별할 정도의 투광성을 보였고  $5.6 \times 10^4$  mho/m의 높은 전기전도도를 나타내었다. 이렇게 제조된 ITO 박막의 전자파 차폐효과를 차폐이론에 의해 분석하였다. 박막의 전기전도도, 두께, skin depth로부터 차폐기구 (흡수손실, 반사손실, 다중반사 보정항)에 대해 고찰하였다. 계산된 차폐효과는 26 dB의 값을 보여 투광성 차폐재로 ITO 박막의 사용 가능성을 제시할 수 있었다.

**Abstract** Indium Tin Oxide (ITO) films were fabricated by vacuum deposition technique and their microwave shielding properties were investigated for the application to the transparent shield material. The vacuum coating was conducted in a RF co-sputtering machine. The film composition and structure associated with the sputtering conditions (argon and oxygen pressure, substrate temperature, RF input power) were investigated for the attainment of high electrical conductivity and good transparency. The electrical conductivity of ITO films fabricated under the optimum deposition conditions (substrate temperature : 300 °C, Ar flow rate : 20 sccm, Oxygen flow rate : 10 sccm, In/Sn input power : 50/30 W) showed  $5.6 \times 10^4$  mho/m. The optical transparency is also considerably good. The microwave shielding properties including the dominant shielding mechanism are investigated from the electrical conductivity, thickness and skin depth of the ITO films. The total shielding effectiveness is then estimated to be 26 dB, which provides a suggestion that the ITO films can be effectively used as the transparent shield material.

### 1. 서 론

전자, 통신기술의 발달로 인한 보다 많은 전자파의 이용은 이에 수반하여 불요 전자파도 함께 증가시키게 되었다. 따라서 이제 전자파 간섭 (Electro-Magnetic Interference : EMI)은 더 이상 간과할 수 없는 문제로, 가전 및 통신기에 EMI 규제가 강화되고 있다. 이와 같은 전자파 간섭은 기기로부터 직접 방사하는 방사 노이즈 간섭 (radiated EMI)과 전원선을 따라 외부로 누설되는 전도성 노이즈 간섭 (conducted EMI)이 있다. 이에 대한 대책으로 적절한 배선의 설계, 접지, 필터링 등을 통하여 발생원으로부터 외부로 방출되는 전자파를 억제하거나 기기의 내성 측면에서 피방해측에 대한 차폐 (shielding)가 사용되는데, 후자가 최후의 대책수단으로 보다 중요하게 취급되고 있다.<sup>1)</sup>

전자파 차폐재료로는 전기전도성이 우수한 금속재료를 전통적으로 많이 사용해 왔다. 근래에 들어 금속재료에 비해 값이 싸고, 가벼우며, 가공하기 쉬운 플라스틱 재료 및

복합재료 등이 개발되어 전자기기의 하우징재로 기존의 금속재료를 대체해 나가고 있다. 복합재료 제작에 사용되는 전형적인 지지재료는 에폭시 수지, 실리콘 분말, 은도금 유리구, 흑연 분말 등이 널리 사용되고 있다. 이러한 금속판재나 복합재료는 전자파 차단효과가 좋은 외부 하우징 또는 틸새의 가스켓 재료로 활용되어 큰 효과를 보고 있다. 최근에는 전형적인 복합재료 이외에도 플라스틱 또는 망사에 금속을 도금화 (분사, 증착)하는 방법들이 개발되어 차폐능의 향상과 아울러 기존의 복합재료가 사용될 수 없었던 분야 (예를 들어 차폐 커튼, 차폐 의류)에 응용 범위를 넓히고 있다.<sup>2~6)</sup>

그러나 디스플레이 패널, 모니터와 같이 투광성이 요구되는 부분에는 전자파의 누설을 효과적으로 차폐할 수 없는 실정에 있다. 따라서 투광성 전자파 차폐재의 개발이 절실히 요구되고 있다. 투광성 차폐재의 요구조건은 우선 차폐능이 20 dB 이상의 값을 가져야 하고 가시광 영역 (약 380 ~ 780 nm의 파장)에서 60 % 이상의 빛을 투과시킬 수 있어야 한다. 만약 구리가 이와 같은 증착재료로 사

용된다면 약 1.22 nm 만큼의 증착이 요구되나 안정성의 결여와 산화에 의한 변질 문제 때문에 투광성 차폐재로 사용하는 데는 한계점이 있다.<sup>2)</sup>

Badeker<sup>7)</sup>에 의해 열산화법으로 제조된 투명 전도성 CdO 박막이 개발된 이후 In, Sn, Cd, Zn 산화물과 그들의 화합물에 대한 전기적 특성과 광학적 특성에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 이 중에서도 Indium Tin Oxide (ITO) 화합물은 가시광 영역에서의 높은 투광성 (80% 이상)과 높은 전기전도도 (약  $10^5 \sim 10^6$  mho/m)를 동시에 갖는 재료로 알려져 있다.<sup>8,9)</sup> 그리고 ITO 박막을 얻기 위한 다양한 증착방법이 연구되어진 바 있다.<sup>10-13)</sup>

본 연구의 목적은 전도성이 우수한 ITO 박막을 제조하고, 투광성 차폐재로 그 응용 가능성을 검토하는데 있다. 차폐특성에 직결되는 물질상수는 전기전도도이기 때문에 전기전도도 향상에 필요한 증착조건에 대해 조사하고, 이로부터 차폐효과를 이론적으로 예측하였다. 박막 차폐재의 경우 다중반사에 의한 반사손실의 보정이 필요함을 제시하였으며, 이로부터 계산된 ITO 박막의 차폐효과는 20 dB 이상의 값을 보임으로써 투명 차폐재로 이용 가능성이 충분함을 제안하였다.

## 2. 실험 방법

### 2-1. ITO 박막의 제조

박막은 RF magnetron co-sputtering 장치를 이용하여 제작하였다. 스퍼터링 가스는 순도 99.99%의 Ar을 사용하였으며 반응성 가스는 순도 99.99% O<sub>2</sub>를 사용하였다. 진공조 내부의 음극 타겟으로는 직경이 1/4 inch인 In (99.99%)과 Sn (99.999%)을 사용하였다. 기판은 15 mm × 25 mm의 슬라이드 글라스를 사용하였으며 기판표면의 오염물질을 제거하기 위해 초음파세척기를 사용하여 아세톤에서 5 분, 알코올에서 10 분, 그리고 증류수를 사용하여 세정한 후 건조하였다.

진공은 로터리 펌프를 사용하여  $5 \times 10^{-2}$  Torr까지 배기시킨 후 터보 펌프를 사용하여  $5 \times 10^{-6}$  Torr 이하로 초기 진공도를 유지하여 스퍼터링시 잔류가스의 영향을 최소화하도록 하였다. 타겟의 표면산화 및 오염을 제거하고 플라즈마의 안정화를 위해 예비 스퍼터링을 5 분간 행하였다. 아울러 본 실험의 증착조건을 Table 1에 나타냈다.

### 2-2. 물성분석

박막의 두께는 Tencor 사의  $\alpha$ -step 500 surface profil-

er를 사용하여 측정하였다. 전기비저항의 측정은 4 단자법을 이용하였다. 바깥 단자에 전류원 (Keithley 220)을 연결하여 수 mA의 일정전류를 공급하였다. 안쪽 두 탐침에 전압측정장치 (HP 34401)를 연결하여 면저항을 측정하고, 박막두께로부터 전기비저항을 계산하였다. 박막의 조성분석은 AES (Auger Electron Spectroscopy), 구조분석은 XRD (X-Ray Diffractometer)를 사용하였다.

### 2-3. 차폐특성 분석

차폐특성에 직결되는 재료정수는 전기전도도이기 때문에 가장 양호한 전기전도도 값을 나타내는 Indium Tin Oxide (ITO) 박막의 전자과 차폐특성을 분석하기 위해서 Schelkunoff<sup>14)</sup>의 전자과 차폐이론에 의하여 박막의 차폐효과 (Shielding Effectiveness (SE))를 이론적으로 계산하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. ITO 박막의 증착거동 및 전기전도도

#### 3-1-1. RF Power의 영향

박막의 조성에 따른 증착속도와 전기전도도를 조사하기 위해 In 타겟의 인가전력을 고정시키고 Sn 타겟의 인가전력을 변화시켰다. Fig. 1은 기판온도 300 °C, 작업진공도  $5 \times 10^{-3}$  Torr, Ar/O<sub>2</sub>의 비 2/1, In 타겟의 인가전력을 50 W로 고정하고 Sn 타겟의 인가전력을 0 - 40 W까지 변화시켰을 때 얻어진 증착속도 결과이다. Sn 타겟의 인가전력이 0인 경우에는 순수한 In의 증착만 일어나는데 약 15 Å/min의 증착속도를 보인다. Sn 타겟의 인가전력이 증가하면 Sn의 증착속도가 커지기 때문에 전체 증착속도는 Fig. 1에서와 같이 거의 비례적인 증가 경향을 보인다. 따라서 박막의 조성 조절이 타겟의 인가전력을 변화시켜 가능함을 알 수 있다. Sn 타겟의 인가전력이 40 W일 때 전체 증착속도가 40 Å/min이고, 순수 In 타겟의 증착속도가 50 W의 인가전력에서 15 Å/min인 점을 감안할 때 In보다 Sn의 스퍼터 효율 (sputter yield)이 높음을 예측할 수 있다.

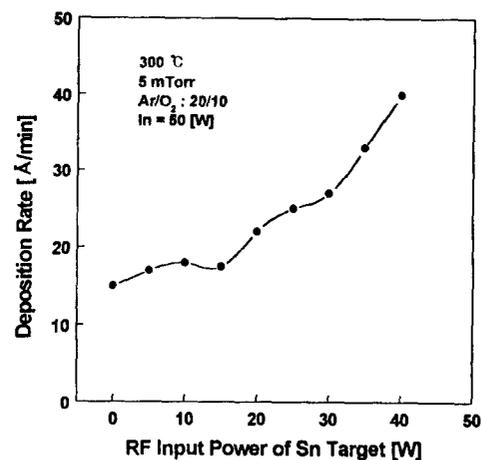


Fig. 1. Increase of deposition rate of ITO films with increase of RF input power of Sn target at a fixed power of In target (50 W).

Table 1. Deposition conditions for transparent ITO films.

Parameters	Deposition Conditions
Target - Substrate Distance	8 - 12 cm
Initial Vacuum	$< 5 \times 10^{-6}$ Torr
Substrate Temperature	300 °C
Ar Flow Rate	20 sccm
O <sub>2</sub> Flow Rate	0 - 20 sccm
RF Input Power	In: 50 W, Sn: 0 - 40 W
Presputtering Time	5 min

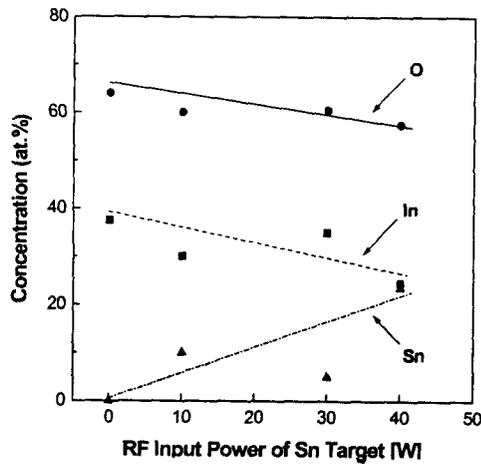


Fig. 2. Variation of film composition with RF input power of Sn target.

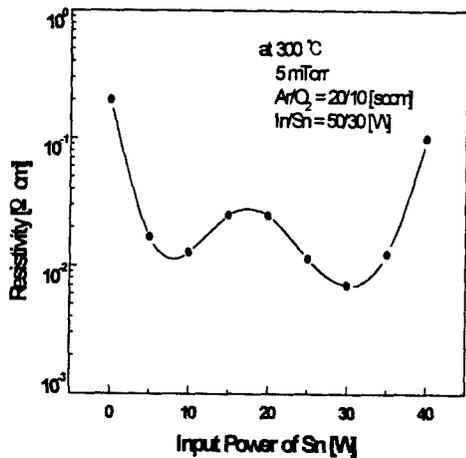


Fig. 3. Variation of resistivity of ITO films with RF input power of Sn target.

Fig. 2는 AES에 의한 박막의 조성분석 결과이다. Sn 타겟의 인가전력이 커짐에 따라 Sn의 함량이 거의 비례적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 하지만 Sn의 인가전력이 10 W인 경우 보다 30 W인 경우에 Sn의 양이 더 작아짐을 관찰할 수 있는데, 이는 챔버내에서 In과 Sn 타겟에 인가한 전력이 상호간섭을 일으켰거나 실험상의 오차로 인한 현상이라고 생각된다. ITO 박막에서 Sn의 적정 함량은 약 10 at%로 보고되고 있는데,<sup>15)</sup> Fig. 2의 결과에 의하면 Sn과 In의 인가전력 비는 1/5 ~ 3/5 범위내에서 조절되어야 할 것으로 보인다.

Fig. 3은 In 타겟의 인가전력을 50 W로 고정하고 Sn 타겟의 인가전력을 변화시켰을 때의 전기비저항을 나타낸 그림이다. Sn 타겟에 전력을 인가하지 않았을 경우에는 ITO 박막의 전도성에 기여하는 In 이온의 자리에 Sn 이온이 치환되지 않으므로 높은 전기비저항을 나타내고 있다. 하지만 Sn의 인가전력이 증가하면서 In 이온의 자리에 가전자 4개를 갖는 Sn 불순물이 치환되어 하나의 전도전자를 만들어 도우너로서 작용하기 때문에 전기비저항이 감소하는 경향을 보이고 있다. 그리고 Sn 타겟의 인가전력이

30W 일 때까지 거의 일정한 전기비저항 값을 유지하다가, 30 W 이상의 전력을 인가하면 다시 전기비저항이 급격히 증가하게 되는데, 이는 인가전력의 증가에 의한 과량의 Sn 이온이 ITO의 전도성에 기여하는 도우너로 작용하지 못하고 중성의 복합체를 형성하기 때문에 나타나는 현상이라고 생각된다.

### 3-1-2. 전체 가스압력의 영향

Fig. 4는 기판온도 300 °C, In/Sn 타겟의 인가전력 50/30 W, Ar/O<sub>2</sub>의 비율을 2/1로 고정시킨 상태에서 전체 가스압력을 1 mTorr에서 9 mTorr까지 변화시켰을 때의 증착속도를 나타낸 것이다. 가스압력이 1 mTorr일 경우에는 80 Å/min 정도의 증착속도를 보이지만, 가스압력이 증가함에 따라 증착속도가 감소하는 일반적인 경향을 보이고 있다.

Fig. 5는 가스압력의 변화에 따른 ITO 박막의 전기비저항을 나타낸 것이다. 3 mTorr에서 가장 낮은  $1.8 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}$ 의 전기비저항을 나타냈으며, 가스압력이 이보다 작거나 커지면 전기비저항은 증가하는 경향을 나타냈다.

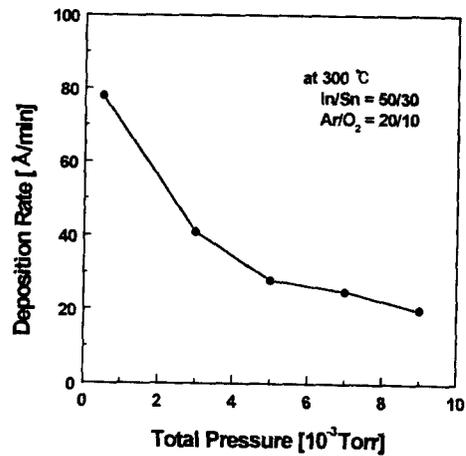


Fig. 4. Deposition rate of ITO films with total gas pressure.

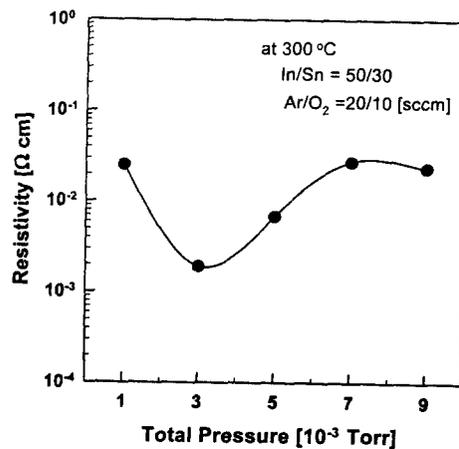


Fig. 5. Resistivity of ITO films vs total gas pressure.

### 3-1-3. 기판온도의 영향

Fig. 6은 가스압력을 5 mTorr, Ar/O<sub>2</sub>의 비율 2/1, In/

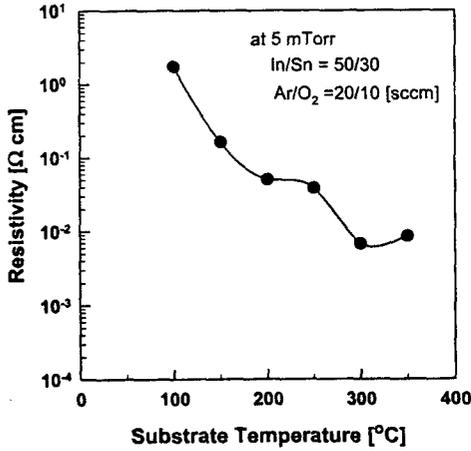


Fig. 6. Resistivity of ITO films vs substrate temperature.

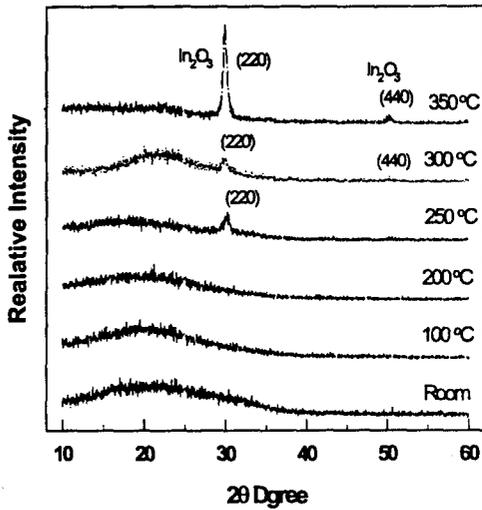


Fig. 7. X-ray diffraction patterns of ITO films deposited at the substrate temperatures.

Sn의 전력을 50/30 W로 고정하고 기판의 온도를 변화시켰을 때 전기비저항을 나타낸 것이다. 기판온도를 300 °C로 증가시켰을 때  $8 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$ 의 가장 양호한 전기비저항을 나타냈는데, 이는 기판온도의 증가에 의한 첨가된 Sn 이온이 도우너로 작용할 수 있도록 충분한 activation이 이루어졌기 때문에 나타나는 현상이라고 생각된다. 아울러 Fig. 7은 동일한 증착조건에서 ITO 박막의 X선 회절 결과를 나타낸 것인데, 그림에서와 같이 상온에서 비정질 상태로 존재하다가 기판온도가 증가함에 따라 ITO 박막의 결정성이 향상되어 전기비저항 값이 다소 감소하는 경향을 나타내고 있다. 하지만 이러한 결정성의 향상은 박막의 전기비저항을 감소시킨 주된 원인이라고는 말할 수 없다. 한편 기판온도가 250 °C인 경우에는 300 °C일 때 보다 더 좋은 결정성을 가졌음에도 불구하고 전기비저항은 오히려 더 큰 값을 가졌는데, 이는 박막의 결정성이 아닌 미세구조의 변화로 이해가 가능하다. 즉 기판온도가 상대적으로 너무 낮게 되면 원자가 표면을 이동할 확률이 그 만큼 떨어지게 되고, 그 대신에 atomic shadowing 현상에 의해서 growth

open boundary에 의한 많은 수의 void를 생성하기 때문에 이런 경우에는 상대적으로 높은 전기비저항 값을 갖는다고 생각된다. 아울러 기판온도가 350 °C인 경우에는 300 °C일 때 보다 결정성은 훨씬 좋아졌지만 기판온도의 증가에 의한 타겟 표면의 산화에 의해 전기비저항 값은 약간 감소했다고 추정된다.

3-1-4. 산소유량의 영향

Fig. 8은 기판의 온도를 300 °C, 가스압력을  $3 \times 10^{-3}$  Torr, In/Sn 타겟의 인가전력을 50/30 W, Ar 유량을 20 sccm으로 고정시키고 O<sub>2</sub> 유량을 변화시켰을 때 증착속도의 변화를 나타낸 것이다. Ar gas만 흘렸을 때 증착율이 175 Å/min의 증착율을 보이다가 O<sub>2</sub> 양을 10 sccm으로 증가시키면 증착율이 급격히 떨어지고, 이후 20 sccm까지 매우 낮은 증착속도를 나타내고 있다. 이와 같이 산소유량이 높아지면서 증착속도가 감소하는 것은 산소 입자의 증가에 의한 전자의 평균자유행정의 감소와 산소의 증가로 인하여 타겟 표면에 형성되는 산화층의 증가로 인하여 전리효율이 감소하기 때문이라고 생각된다.

산소가스의 첨가량에 의한 비저항의 변화를 Fig. 9에 나타내었다. O<sub>2</sub>를 전혀 첨가하지 않은 In-Sn 화합물에서  $3 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$ 의 비저항을 보이다가 산소유량의 증가에 따

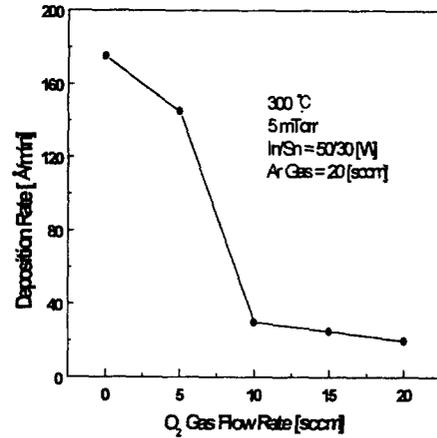


Fig. 8. Variation of deposition rate with the O<sub>2</sub> flow rate.

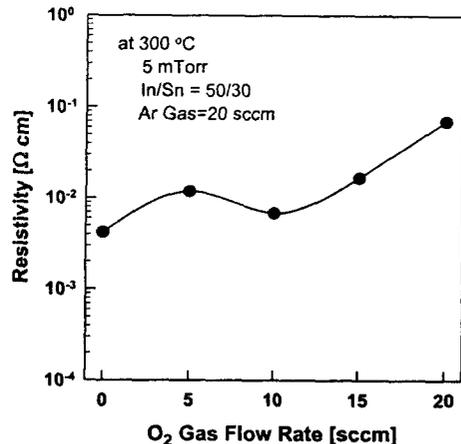


Fig. 9. Resistivity of ITO films vs O<sub>2</sub> flow rate.

라 전기비저항은 서서히 증가하는 경향을 보인다. 즉 과잉의 산소는 전도성에 기여하는 캐리어의 생성을 감소시키고, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 상과 SnO<sub>2</sub>의 독립된 상을 증가시켜서 도우너로 작용하는 인듐과 주석 산화물의 결합구조가 감소되어서 전기비저항이 증가하는 것으로 생각된다. 그러나 광투과성은 산소 유량의 증가에 따라 커지기 때문에 전기비저항 외에 광투과성을 고려한 산소유량의 조절이 필요하다.

3-1-5. 적정 증착조건 및 전기전도도

지금까지 RF magnetron co-sputtering 장비에 의해서 기관온도와 산소유량, 그리고 인가전력과 같은 증착조건에 의해서 Indium Tin Oxide (ITO) 박막의 전기적 성질의 변화를 관찰했다. 이상의 결과를 종합하여 볼 때 타겟의 인가전력이 너무 낮으면 In 자리에 Sn 불순물이 치환되어 도우너로 작용할 수 있는 가능성이 줄어들게 되고, 인가전력이 너무 크게 되면 고속의 입자에 의한 박막의 막손상이 발생하여 오히려 전기비저항이 증가한다는 단점이 있기 때문에, In과 Sn의 인가전력은 50/30일 때 가장 이상적이라고 생각된다. 아울러 기관온도가 너무 높거나 낮을 경우에는 타겟 표면의 산화현상과 박막의 결정성의 저하에 의한 전기비저항의 악화가 일어나기 때문에, 기관온도는 300 °C일 때 가장 이상적이라고 생각된다. 그리고 산소 유량의 증가와 함께 박막의 투광성은 좋아지지만, 전기비저항은 증가하는 경향을 나타내게 된다. 반면 산소 유량이 너무 낮게 되면 제작된 박막은 흑화현상이 발생하여 박막의 투광성은 저하되게 되지만, 전기비저항은 상당히 양호한 값을 나타내게 된다. 따라서 투광성이 높고 전기비저항이 양호한 10 sccm의 산소 유량이 가장 최적의 증착조건이라고 생각된다. 한편 이러한 조건하에서 증착된 ITO 박막은 5.6 × 10<sup>4</sup> mho/m의 상당히 양호한 전기전도도 값을 나타냈다.

3-2. ITO 박막의 전자파 차폐효과

Schelkunoff<sup>(4)</sup>의 전자파 차폐이론에 의하면 단층 매질에서의 차폐효과 (Shielding Effectiveness (SE))는 dB 단위로 다음과 같이 흡수손실 (A<sub>dB</sub>), 반사손실 (R<sub>dB</sub>), 다중반사 보정항 (B<sub>dB</sub>)의 합으로 표시된다.

$$SE(dB) = A_{dB} + R_{dB} + B_{dB}$$

$$= 20 \log e^{\alpha t} + 20 \log \frac{(1+K)^2}{4K} + 20 \log \left\{ 1 - \left( \frac{K-1}{K+1} \right)^2 e^{-2\alpha t} \right\} \quad (1)$$

여기서 α : 감쇠상수

t : 매질두께

K : 자유 공간의 파동임피던스 (Z<sub>w</sub>)와 매질의 고유임피던스 (Z<sub>m</sub>) 비 (= Z<sub>w</sub>/Z<sub>m</sub>)

ν : 전송상수 (= α + jβ 여기서 β는 페이즈 상수)

후막 또는 bulk 차폐재의 경우 흡수손실과 반사손실이 주된 차폐기구이나, 흡수손실이 작고, 시편의 두께가 skin

depth (δ)에 비해 작은 박막의 경우 (t/δ ≪ 1), 매질의 barrier 임피던스가 고유임피던스보다 작아지기 때문에 다중반사 보정항을 반드시 고려해야 한다. 따라서 먼저 ITO 박막에서 흡수손실과 skin depth에 대해 조사하였다.

흡수손실은 매질내에서 전파 감쇠에 의한 차폐효과로서 dB 단위로 다음과 같이 표시된다.

$$A_{dB} = 20 \log e^{\alpha t} = 8.686 \alpha t \quad (2)$$

전도성 매질의 경우 감쇠상수 α는 다음과 같이 전기전도도 (σ), 투자율 (μ), 주파수 (f)의 함수로 표시된다.

$$\alpha = \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (3)$$

ITO 박막의 σ ≅ 10<sup>5</sup> mho/m, μ = 1.25 × 10<sup>-6</sup> H/m (진공투자율과 같음), 그리고 박막의 두께 (t ≅ 10<sup>-6</sup> m)를 대입하여 흡수손실을 계산하면 100 MHz ~ 1 GHz 주파수 범위에서 10<sup>-1</sup> dB 이하의 작은 값을 갖는다. 따라서 ITO 박막에서 흡수손실에 의한 차폐효과는 무시할 수 있다.

전도성 매질의 skin depth (δ)는 다음 관계식을 만족함으로

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (4)$$

ITO 박막의 물질상수를 대입하여 δ를 주파수의 함수로 구하면 Fig. 10과 같다. 1 MHz에서 2.14 mm, 100 MHz에서 0.214 mm, 1 GHz에서 67.6 μm로 감소하나 박막의 두께를 1 μm 증착시켜도 t < δ/50 범위에 속한다. 따라서 앞에서 계산한 바와 같이 흡수손실은 무시할 정도로 작아지고, ITO 박막의 차폐효과 계산시 다중반사에 의한 보정항이 반드시 고려되어야 한다.

전도성 매질의 고유임피던스의 크기 (|Z<sub>m</sub>|)는 다음과 같이 주어진다.

$$|Z_m| = \left| \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} \right| = \frac{\sqrt{2}}{\sigma\delta} \quad (5)$$

σ ≅ 10<sup>5</sup> mho/m, Fig. 10의 δ를 대입하여 |Z<sub>m</sub>|을 계산하면 |Z<sub>m</sub>| ≅ 10<sup>-2</sup> Ω 정도로 원역장 평면파의 파동임피던스 (|Z<sub>w</sub>| = 377 Ω)에 비해 매우 낮다 (K = |Z<sub>w</sub>|/|Z<sub>m</sub>| ≫ 1). 따라서 식 (1)에 표시된 반사손실은 다음과 같이 근사화되어질 수 있다.

$$R_{dB} \cong 20 \log \left| \frac{Z_w}{4Z_m} \right| = 20 \log \left( \frac{377\sigma\delta}{4\sqrt{2}} \right) \quad (6)$$

σ, δ를 대입하여 R<sub>dB</sub>를 주파수의 함수로 나타내면 Fig. 11과 같다. 1 MHz에서 83 dB의 매우 큰 값을 보이고, 주파수가 증가함에 따라 서서히 감소하나 1 GHz에서도 53 dB의 비교적 큰 값을 보인다.

그러나 시편의 두께가 skin depth에 비해 매우 작기 때

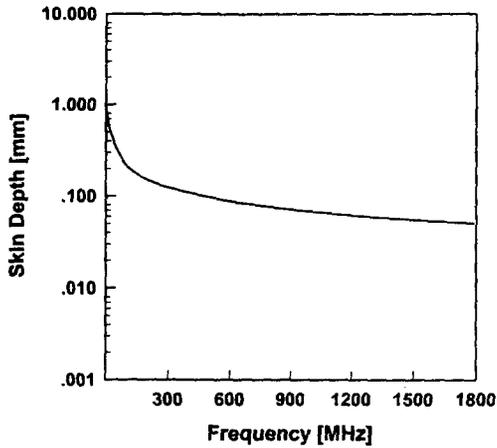


Fig. 10. Frequency dependence of skin depth calculated from electrical conductivity.

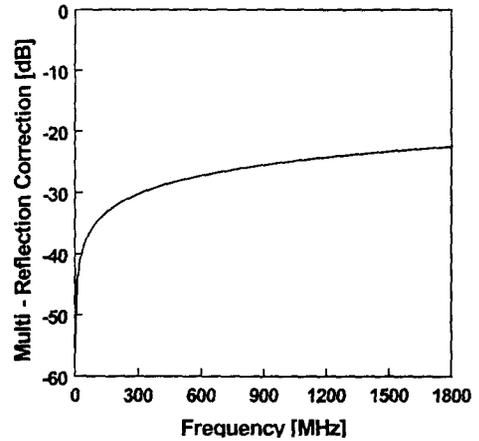


Fig. 12. Multi-reflection correction estimated in ITO films as a function of frequency.

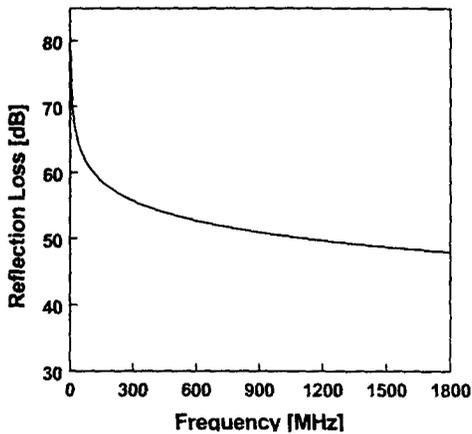


Fig. 11. Calculated reflection loss as a function of frequency.

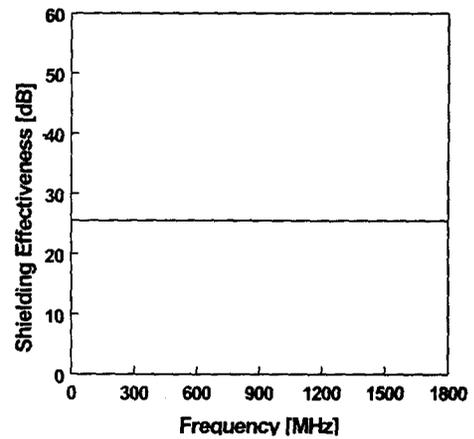


Fig. 13. Shielding effectiveness estimated in ITO films.

문에 ( $t/\delta \ll 1$ ), 위에서 계산한 반사손실은 다중반사 보정항에 의해 수정되어야 한다.  $K \gg 1$ ,  $t/\delta \ll 1$ 의 조건하에서 다중반사 보정항은 다음과 같이 근사화된다.<sup>2)</sup>

$$B_{dB} = 20 \log \left| 1 - \left( \frac{K-1}{K+1} \right)^2 e^{-2\gamma t} \right|$$

$$\cong 20 \log \left( \frac{2\sqrt{2}t}{\delta} \right) \quad (7)$$

$t \cong 10^{-6}$  m,  $\delta$ 를 대입하여 계산한  $B_{dB}$ 는 Fig. 12와 같다. 1 MHz에서 -57 dB, 100 MHz에서 -37 dB, 1 GHz에서 -27 dB의 값을 보이고 있다. 차폐효과가 음(-)의 값을 갖는 의미는 다중반사에 의해 매질 배면으로 빠지는 투과파의 크기가 커짐을 의미하며, 이는 전체 차폐효과의 감소를 의미한다. Skin depth에 비해 시료의 두께가 얇아 질수록 투과 전자파가 커지게 되고, 이는 다중반사 보정항에 의한 차폐효과의 감소로 나타난다.

전체 차폐효과는 반사손실과 다중반사 보정항의 합으로 표시되며 Fig. 13에서와 같이 주파수에 따라 일정한 26 dB의 차폐효과를 보인다. 반사손실은  $\delta$ 에 비례하고 다중반사 보정항은  $\delta$ 에 반비례하기 때문에 전체 차폐효과는 주파

수에 따라 일정해진다. 이는 파원으로부터의 거리가 파장에 비해 매우 큰 원역장 (far-field) 차폐에 국한되며, 따라서 근역장 (near-field) 전계 차폐의 경우에는 차폐효과가 이보다 더 커질 것이 예상된다.<sup>16)</sup> ITO 박막을 이용한 투광성 차폐재의 실용화 가능성은 충분하다.

#### 4. 결 론

RF magnetron co-sputter로 제조된 ITO 투광성 박막에서 전자파 차폐효과를 이론적으로 고찰하였다. 투광성과 전도성을 동시에 갖는 ITO 박막을 제조하기 위해 박막의 증착조건에 대해 조사하였다. 본 연구에 사용된 sputter 장비에서 최적의 증착조건은 In/Sn 타겟의 인가전력 50/30 W, 작업압력  $3 \times 10^{-3}$  Torr, 기판온도 300 °C, Ar/O<sub>2</sub>의 유량비 2/1이었다. 이러한 조건하에서 제조된 ITO 박막은 육안상으로 투명하고,  $5.6 \times 10^4$  mho/m의 높은 전기전도도를 나타내었다.

Schelkunoff<sup>15)</sup>의 전자파 차폐이론을 이용하여 제조된 ITO 박막의 차폐효과에 대해 분석하였다. 측정된 전기전도도로부터 계산된 흡수손실은 10<sup>-1</sup> dB 이하로 무시할 수 있었다. 따라서 ITO 박막의 차폐효과는 주로 반사손실에 의

해 결정된다. 그러나 박막의 두께가 skin depth에 비해 매우 작기 때문에 (1 GHz에서  $t < \delta/50$ ), 다중반사 보정항으로 대변되는 차폐효과의 감소를 반드시 고려하여야 했다. 이로부터 계산된 차폐효과는 주파수에 따라 일정한 26 dB의 값을 보였고, 투광성 차폐재로 ITO 박막의 사용 가능성을 제시할 수 있었다.

### 감사의 글

이 논문은 1998년도 한국학술진흥재단 학제간 연구비 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. 清水康敬, "電磁波の吸收と遮蔽," 니치덴, pp. 1-94 (1989).
2. Donald R. J. White and Michael Mardiguian, *Electromagnetic Shielding*, Vol. 3. (1988).
3. Y. Ohki and S. Yasufuku, "Third EMC Japan 1990 Held in Tokyo," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 9/10, Vol. 6, No. 5, pp. 65-66 (1990).
4. Hun-Nam Lim, You-Kee Lee and Jong-Wan Park, "Electrical and Optical Properties of ITO Thin Films for Automobile Heatable Windshield," *Korean Journal of Materials Research*, Vol. 6, No. 6, pp. 618-625 (1996).
5. 森本幸彦, "表面處理による導電性プラスチックの開発," *Mar.* pp. 81-85 (1983).
6. Li-Jian Meng, M. P. dos Santos, "Properties of Indium Tin Oxide (ITO) Films Prepared by RF Reactive Magnetron Sputtering at Different Pressures," *Thin Solid Films*, Vol. 303, pp. 151-155 (1997).
7. K. Badeker, *Ann. Pys. (Leipzig)*, vol. 22, pp. 749 (1907).
8. Wolfram Scharff, Klaus Hammer, "Application of Optical, mechanical Resistant Coatings," *High Performance Ceramic Films and Coatings*, pp. 695-711 (1991).
9. K. L. Chopra, S. Major and D. K. Pandya, "Transparent Conductors-A Status Review," *Thin Solid Films*, pp. 1-46 (1983).
10. Hideaki Yasui and Yoshiyuki Tsuda, "ITO Thin Films Prepared by Magnetron Sputtering Method Using ITO Target," *Jpn., Mech. Soc.*, pp. 593-598 (1993).
11. J. C. Manificier and L. Szepessy, "The Efficient Sprayed  $In_2O_3 : Sn$  n-type silicon Heterojunction Solar Cell," *J. Electrochem. Soc.* (1977).
12. S. Takaki, K. Matsumoto and K. Suzuki, "Properties of Highly Conducting ITO Films Prepared by Ion Plating," *Applied Surface Science*, pp. 919-925 (1988).
13. A. Hjortsberg, I. Hamberg and C. G. Granqvist, "Transparent and Heat-Reflecting Indium Tin Oxide Films Prepared by Reactive Electron Beam Evaporation," *Thin Solid Films*, Vol. 90, pp. 323-326 (1982).
14. S. A. Schelkunoff, *Electromagnetic Waves*, Van Nostrand, New York, (1943).
15. John C. C. Fan, Frank J. Bachner, "Properties of Sn-doped  $In_2O_3$  Films Prepared by RF sputtering," *J. Electrochem. Soc.*, Dec, pp. 1719-1725 (1975).
16. H. A. Lasitter, "Low-Frequency Shielding Effectiveness of Conductive Glass," *IEEE Trans. EMC*, Vol. 6, pp. 17-30 (1964).