

# ITO透明導電膜의 電氣, 光學的 特性 및 그 應用

## (The Application and Electrical, Optical Properties of $\text{In}_2\text{O}_3 : \text{Sn}$ Transparent Conducting Films)

李東薰\*, 朴基徹\*, 朴昌培\*, 金基完\*

(Dong Hoon Lee, Ki Cheol Park, Chang Bae Park  
and Ki Wan Kim)

### 要 約

電子線 加熱蒸着法을 사용하여  $\text{In}_2\text{O}_3 : \text{Sn}$ (ITO) 투명 도전막을 제조하고 그의 전기 및 광학적 특성을 조사하였다.

최적증착조건은  $5-10 \text{ \AA}/\text{sec}$ 의 蒸着率,  $4 \times 10^{-4} \text{ torr}$ 의 아르곤분압,  $300^\circ\text{C}$  이상의 基板溫度, 10mole %의  $\text{SnO}_2$ 첨가율 등이었다.

최적조건하에서 제조된 박막의 면저항과 가시광영역에서의 광투과율은 각각  $12\Omega/\square$  및 87-99%이었다. 따라서 제조된 투명도전막은 TV camera용 촬상관과 solar cell에 응용가능할 것으로 생각된다.

한편 ITO를 이용하여 제조된 SIS solar cell의 energy 변환효율은 9.61%였다.

### Abstract

$\text{In}_2\text{O}_3 : \text{Sn}$ (ITO) transparent conducting films were fabricated by the electron beam evaporation method. The dependence of their electrical and optical properties on deposition conditions were examined. The optimum evaporation conditions were such that the deposition rate was  $5-10 \text{ \AA}/\text{sec}$ , oxygen partial pressure was  $4 \times 10^{-4} \text{ torr}$ , substrate temperature was above  $300^\circ\text{C}$ , and  $\text{SnO}_2$  doping rate was 10 mol%. The values of sheet resistance and transmittance of the films in visible region fabricated under these optimum conditions were  $12\Omega/\square$  and 87-99%, respectively. And the energy conversion efficiency of the SIS solar cell fabricated using ITO was 9.16%. It is shown that the transparent conducting films can be applied to the TV camera pick-up tube and solar cell.

### I. 序 論

최근 光電子工學分野의 발전에 따라 透明도와 電氣傳導도가 높은 透明電極이 필요하게 되었다. 투명전극에 대한 최초의 보고는 1907년 Badeker<sup>1)</sup>가 Cd 薄膜을 熱酸化시켜서 만든 CdO 透明導電膜에 관한 것이었다.

透明導電膜의 재료로서는  $\text{SnO}_2$  (TO),<sup>2,4)</sup>  $\text{SnO}_2 : \text{Sb}$  (ATO),<sup>4)</sup>  $\text{SnO}_2 : \text{F}$  (FTO),<sup>15)</sup>  $\text{In}_2\text{O}_3$  (IO),<sup>16)</sup>  $\text{In}_2\text{O}_3 : \text{Sn}$  (ITO),<sup>12, 15)</sup>  $\text{ZnO}$  (IO)<sup>116)</sup> 등이 있다. 그 중에서 ITO 透明導電膜은 電氣傳導도와 光透過性이 우수하여 太陽電池의 무반사막, 攝像管用 광도전막, 電界發光素子 및 액정표시기의 투명전극, 항공기나 자동차유리의 투명발열막 등에 널리 利用되고 있다. 이러한 透明導電膜의 제조방법에는 CVD法,<sup>13,17)</sup> Spray法,<sup>14,5,16)</sup> Sputtering法,<sup>17,16)</sup> 진공증착법 및 전자선 가열증착법 등이 있다.

\*正會員, 慶北大學校 電子工學科  
(Dept. of Electronics. Eng., KNU)  
接受日字: 1986年 2月 28日

으며 本 論文에서는 특성이 우수한 ITO 透明導電膜을 電子線 加熱蒸着法으로 제조하여 그의 電氣 및 光學의 特性을 조사하고 제조된 ITO膜을 이용하여 太陽電池를 제조하여 그 特性을 조사하였다.

II. 實驗 및 測定

In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粉末(Wako, Japan, 99.9%)과 SnO<sub>2</sub>粉末(Aldrich, USA, 99.9%)을 원하는 mole비로 혼합한 다음 10t/cm<sup>2</sup>의 압력으로 압축성형하여 e-beam용 source를 제조하였다. 초기진공도는 8×10<sup>-6</sup>torr였으며 基板으로는 슬라이드 글라스(Kimble, USA)를 使用하였다. 표 1은 ITO증착시 제조 變數와 條件들을 나타낸 것이다.

표 1. ITO 증착을 위한 제조변수와 조건  
Table 1. The parameters and conditions for ITO evaporation.

substrate distance	30cm
initial vacuum	8×10 <sup>-6</sup> torr
deposition rate	1-15 Å/sec
oxygen partial pressure	6×10 <sup>-4</sup> torr
substrate temperature	25-350℃
SnO <sub>2</sub> doping rate	0-25mole%

제조한 ITO膜은 1000Å의 두께에서 가장 높은 figure of merit(5×10<sup>-2</sup>Ω)를 나타내었으므로 膜제조시 두께는 이 값으로 고정시켰다. 제조된 薄膜의 두께는 Å-scope(Varian, 980-4000)로 測定하였으며 蒸着率은 수정발진자를 이용한 thickness monitor(Sloan MDC 9000)로 제어되었다. 제조된 薄膜의 Hall효과와 面抵抗값은 常溫에서 van der pauw法을 사용하여 측정하였으며 光透過率은 digital dual beam spectrophotometer(Shimadzu-UV 310)로 測定하였다.

III. 結果 및 考察

1. 蒸着率에 따른 特性變化

蒸着率에 따른 ITO膜의 面抵抗값과 波長 550nm에서의 光透過率의 變化를 그림 1에 나타내었다. 이 때 基板溫度, 산소분압 및 SnO<sub>2</sub>첨가율은 각각 300℃, 4×10<sup>-4</sup>torr 및 5mole%로 고정시키고 蒸着率을 변화시켰다.<sup>[1]</sup> 증착률이 18 Å/sec인 경우 薄膜의 面抵抗값은 15Ω/□로서 가장 낮은 값을 나타내었으며, 그 이상과 이하에서는 다소 증가함을 알 수 있다.

光透過率에 있어서는 증착률이 낮을 수록 높은 光透

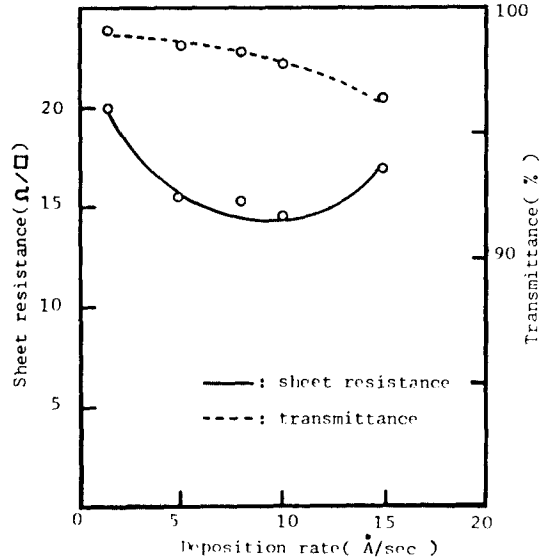


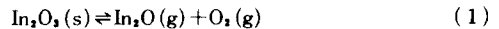
그림 1. 증착률에 따른 면저항 및 광투과율의 변화  
Fig. 1. Sheet resistance and transmittance vs deposition rate.

過率을 나타내었으며 약 5 Å/sec 이하일 때 99%의 光透過率을 나타내었다.

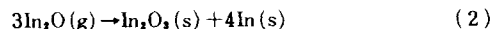
이상적인 ITO透明導電膜의 제조에는 膜중의 적절한 粒子의 成長과 非化學量論的인 組成이 요구된다.<sup>[1]</sup> 일반적으로 증착속도가 느리면 薄膜의 粒子成長에는 效果의이지만 박막증착시 chamber內的 산소와 충분히 반응하여 化學量論的인 組成에 가까운 ITO膜을 形成하며, 증착속도가 빠른 경우 粒子의 성장에 잘 이루어지지 않으므로 薄膜의 面抵抗값이 다소 증가하는 것으로 생각된다.<sup>[1]</sup>

2. 酸素分壓에 따른 特性變化

電子線 加熱蒸着法에 의한 ITO膜의 제조시 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 증발될 때 높은 에너지를 받게되어 酸素가 이탈되므로 chamber內的 적절한 산소분압이 요구된다. 蒸發 및 蒸着은 다음과 같은 反應式에 의하여 행하여진다고 보고되어 있다.<sup>[1]</sup>



그러나 박막증착시 基板上에서의 酸素分壓이 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 合成에 충분하지 못할 때에는 다음과 같은 反應식에 의해 In이 석출된다.



各 反應式에서 g와 s는 각각 gas와 solid를 나타낸다.

그림 2는 산소분압에 따른 ITO膜의 面抵抗값과 光

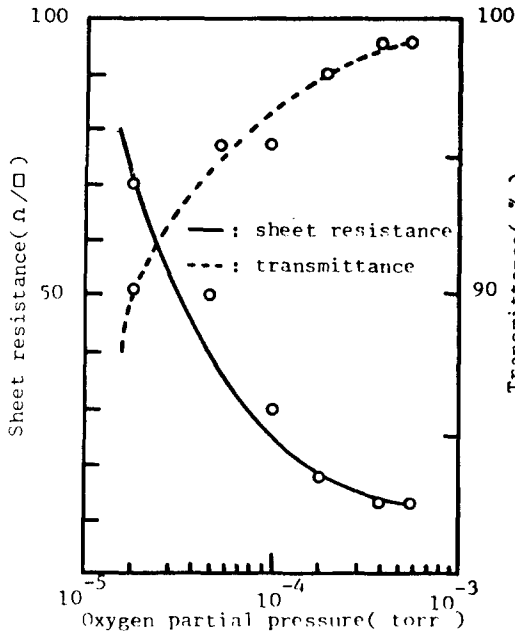


그림 2. 산소분압에 따른 면저항 및 광투과율의 변화  
Fig. 2. Sheet resistance and transmittance vs. oxygen partial pressure.

투과율의 변화를 나타낸 것이다. 이 결과는  $10 \text{ \AA}/\text{sec}$ 의 증착률,  $300^\circ\text{C}$ 의 기판 온도 및 5mole%의  $\text{SnO}_2$  첨가율이었을 때의 것이다.  $8 \times 10^{-6}$  torr의 초기진공도에서 산소분압이 증가할수록 제조된 ITO膜的 電氣 및 光學의 特性이 급격히 향상되어  $4 \times 10^{-4}$  torr이었을 때 가장 좋은 특성을 얻을 수 있었다. 이 때의 면저항값과 波長 550nm에서의 光透過율은 각각  $15 \Omega/\square$  및 99%이었다.

그림 3은 膜蒸着時 진공chamber內에서의 酸素의 有無에 따른 가시광영역에서의 光透過율의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서처럼 ITO膜 蒸着時 chamber內에 酸素를 주입하지 않았을 경우 식(2)와 같이 In의 석출에 의하여 膜의 黑化現象<sup>11)</sup>이 일어나므로 光透過율이 가시광 전영역에서 급격히 떨어짐을 알 수 있었다.

3.  $\text{SnO}_2$ 添加率에 따른 특성변화

순수한  $\text{In}_2\text{O}_3$ 膜的 電氣傳導는 박막성장 과정에 있어서 非化學量論的인 組成에 의한 산소결핍공에 의해 높은 電氣傳導度를 가지는 것으로 생각되며 여기에 불순물로서 적당량의  $\text{SnO}_2$ 를 첨가하면 한층 더 電氣傳導度를 증가시킬 수 있다.<sup>12,13,19)</sup> 그림 4는  $\text{SnO}_2$  첨가율에 따른 ITO膜的 면저항값과 波長 550nm에서의 光透過율의 변화를 나타낸 것이다. 이때 증착조건으로는 증착률  $10 \text{ \AA}/\text{sec}$ , 산소분압  $4 \times 10^{-4}$  torr 및 기판온도는

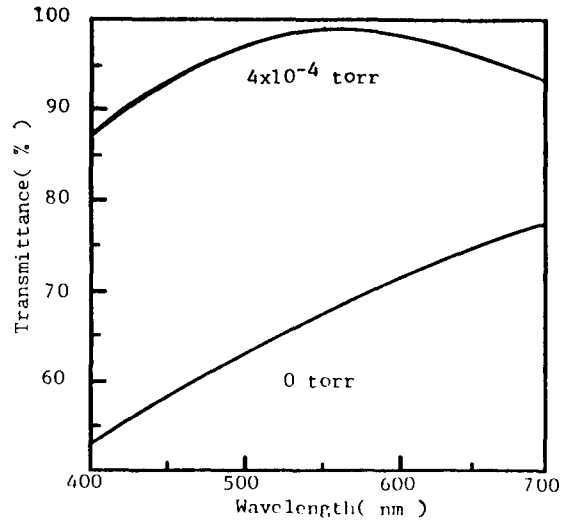


그림 3. 가시광 영역에서의 진공 chamber 내에서의 산소 유무에 따른 광투과율의 변화  
Fig. 3. Variations of transmittance in visible region.

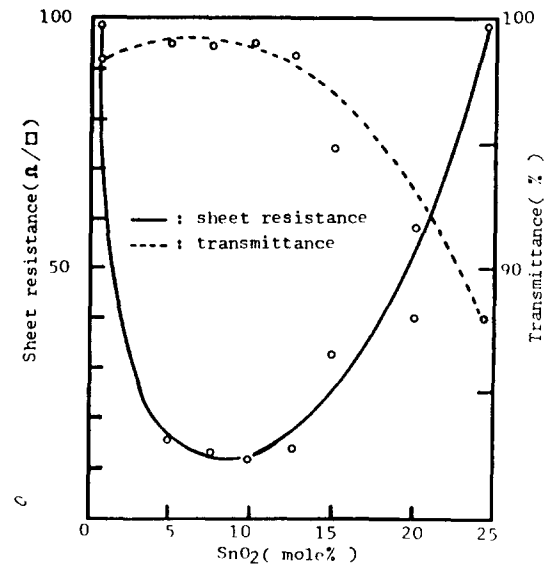


그림 4.  $\text{SnO}_2$ 첨가율에 따른 면저항 및 광투과율의 변화  
Fig. 4. Sheet resistance and transmittance vs.  $\text{SnO}_2$  doping rate.

$300^\circ\text{C}$ 이었다.  $\text{SnO}_2$ 가 첨가되지 않았을 때의 면저항값과 光透過율은 각각  $101 \Omega/\square$  및 98%였으며  $\text{SnO}_2$ 가 첨가됨에 따라 특성이 향상되어 10mole% 첨가되었을 때 면저항값은  $12 \Omega/\square$ , 光透過율은 99%였다. 그러나  $\text{SnO}_2$ 添加率이 10mole% 이상 증가되었을 때는 ITO膜

의 電氣 및 光學的 特性이 감소되어 添加率이 25mole 인 경우 面저항값과 광투과율은 각각  $100\Omega/\square$  및 87% 이었다. 이는 이온화된 不純物에 의한 搬送子の 移動度감소에 기인하는 것으로 생각된다.<sup>12)</sup>

그림 5는 SnO<sub>2</sub>添加率에 따른 透明導電膜의 가시광 영역에서의 光透過率의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 처럼 SnO<sub>2</sub>添加率이 5mole%일때 가시광 전영역에서 가장 높은 光透過率을 나타냈다. 이는 Moss-burstein shift<sup>12)</sup>에 의한 optical band gap의 증가에 의한 것으로 생각된다.

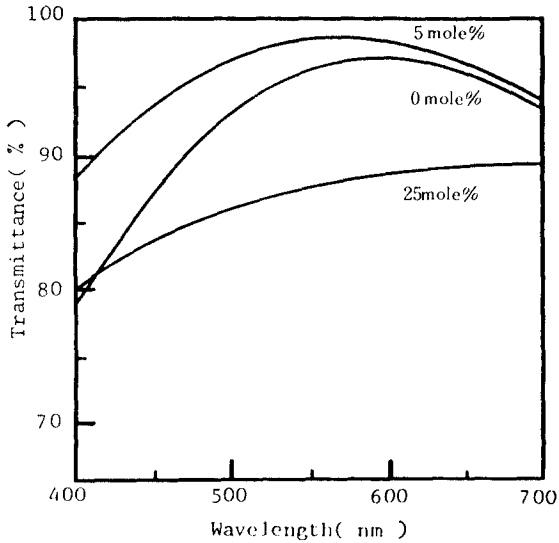


그림 5. SnO<sub>2</sub> 첨가율에 따른 가시광영역에서의 광투과율의 변화  
Fig. 5. Variations of transmittance in visible region.

4. 基板溫度에 따른 특성변화

그림 6은 基板溫度에 따른 ITO膜의 面저항값과 波長 550nm에서의 光透過率의 변화를 나타낸 것이다. 이때 증착율, 산소분압 및 SnO<sub>2</sub>첨가율은 각각  $10\text{Å}/\text{sec}$ ,  $4 \times 10^{-4}\text{torr}$  및 10mole%이었다. 基板을 加熱하지 않고 常溫에서 ITO膜을 제조하였을 때 面저항값은  $12\text{K}\Omega/\square$  波長 550nm에서의 光透過率은 22%였으나 基板溫度를 서서히 상승시켜 300°C가 되었을 때 面저항값과 광투과율은 각각  $12\Omega/\square$  및 99%였으며 300°C 이상에서는 뚜렷한 변화가 나타나지 않았다. 이는 상온에서 제조된 ITO膜은 非晶質구조를 가지며 基板溫度 상승에 따라 結晶性(crystallinity)이 향상되기 때문인 것으로 알려져 있다.<sup>12)</sup>

그림 7은 100°C와 300°C의 基板溫度에서, 가시광영

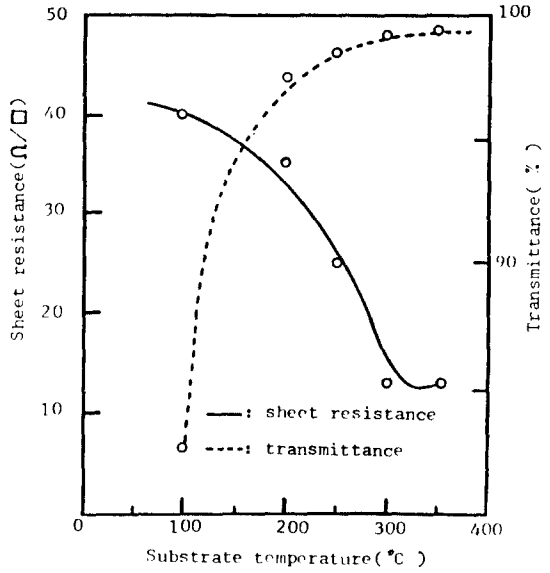


그림 6. 기판온도에 따른 면저항 및 광투과율의 변화  
Fig. 6. Sheet resistance and transmittance vs. substrate temperature.

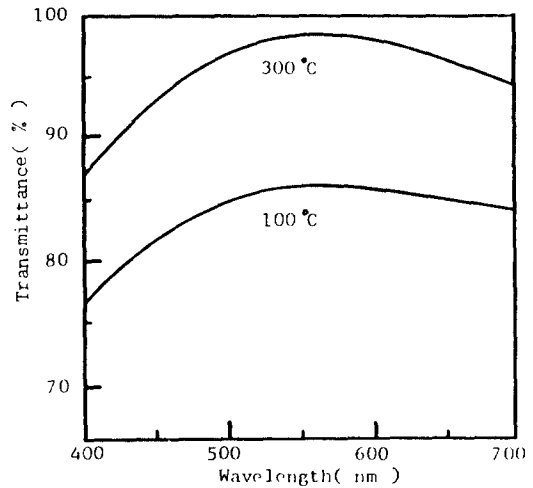


그림 7. 가시광영역에서의 광투과율의 변화  
Fig. 7. Variations of transmittance in visible region.

역에서의 ITO膜의 광투과율의 변화를 나타낸 것이다. 이때 증착율, 산소분압 및 SnO<sub>2</sub>첨가율은 각각  $10\text{Å}/\text{sec}$ ,  $4 \times 10^{-4}\text{torr}$  및 10mole%이었다.

5. 常溫에서 제조된 ITO透明導電膜의 熱處理特性  
常溫에서 제조된 ITO膜의 熱處理溫度에 따른 특성 변화를 그림 8에 나타내었다.

그림 9는 熱處理時間에 따른 특성의 변화를 나타낸

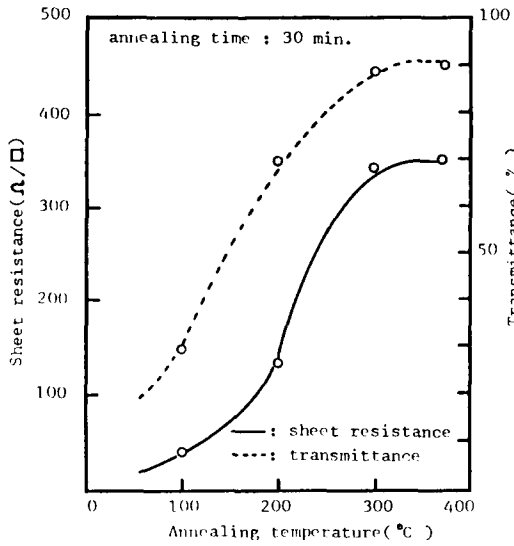


그림 8. 열처리온도에 따른 면저항 및 광투과율의 변화  
Fig. 8. Sheet resistance and transmittance vs. annealing temperature.

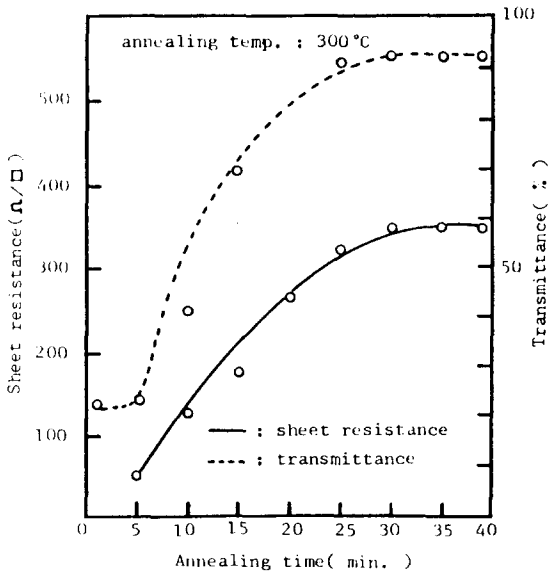


그림 9. 열처리시간에 따른 면저항 및 광투과율의 변화  
Fig. 9. Sheet resistance and transmittance vs. annealing time.

것이다.

두 그림에서 알 수 있는 바와 같이 常溫에서 ITO膜을 제조하여 대기중 300°C에서 30분간 열처리한 결과, 면저항값은 330 Ω/□이었으며 波長 550nm에서의 光透

過率は 90%였다. 이는 300°C로 基板을 加熱하면서 제조한 면저항값이 12Ω/□이고 광투과율이 99%인 ITO膜에 비해서 더 높은 면저항값과 더 낮은 광투과율을 나타내는 것이다.

그림10은 산소분압에 따라 상온에서 제조한 ITO膜을 대기중 300°C에서 30분간 열처리했을 때의 전기 및 광학적 특성변화를 나타낸 것이다. 基板을 加熱한 경우와는 달리 산소분압이  $5 \times 10^{-4}$  torr였을 때 가장 낮은 면저항값인 150 Ω/□를 나타냈다.

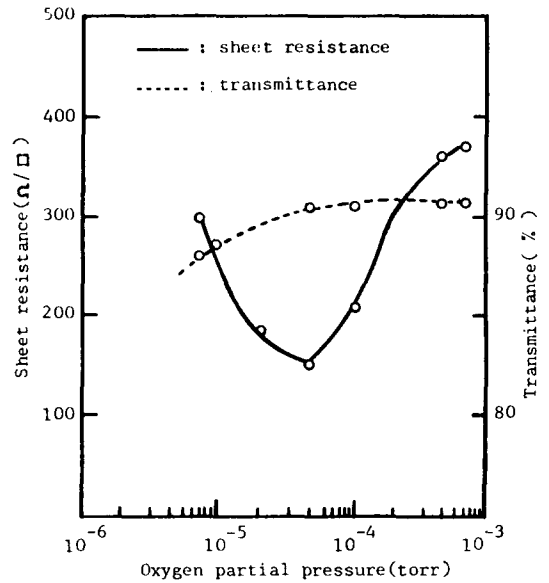


그림10. 상온에서 제조하여 열처리한 막의 산소분압에 따른 면저항 및 광투과율의 변화  
Fig. 10. Sheet resistance and transmittance vs. oxygen partial pressure.

### 6. 透明導電膜에 있어서의 Hall 效果

그림11과 12는 각각 SnO<sub>2</sub> 첨가율에 따른 ITO膜의 搬送子濃度和 SnO<sub>2</sub> 첨가율에 따른 반송자의 移動도를 나타낸 것이다. 이때 ITO膜은 10 Å/sec의 증착율,  $4 \times 10^{-4}$  torr의 산소분압 및 300°C의 기판온도에서 제조된 것이다. SnO<sub>2</sub> 첨가율이 10mole%일때 가장 큰 반송자 농도인  $1.26 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$ 을 나타내었다. 搬送子の 移動도는 SnO<sub>2</sub>를 添加하지 않았을 경우  $57 \text{cm}^2/\text{v} \cdot \text{sec}$ 로서 가장 큰 값을 나타내었으며 SnO<sub>2</sub> 첨가율을 증가시킬 수록 移動도는 감소되어 SnO<sub>2</sub> 첨가율이 25mole%인 경우  $17 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$ 의 移動도를 나타냈다. 이는 이온화된 불순물에 기인한 搬送子の 散亂에 기인하는 것으로 생각된다!<sup>20)</sup>

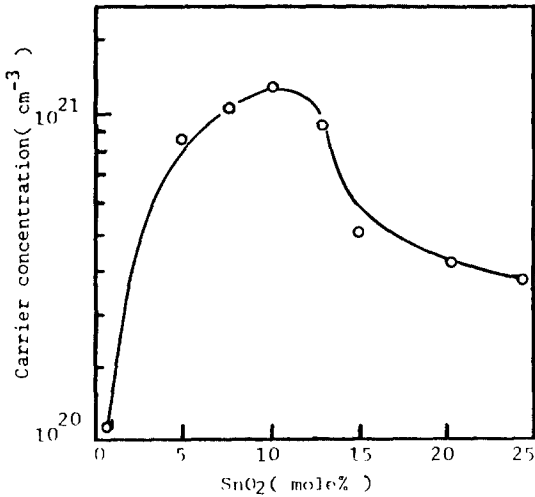


그림11. SnO<sub>2</sub>첨가율에 따른 반송자농도 변화  
 Fig. 11. Carrier concentration vs. SnO<sub>2</sub> doping rate.

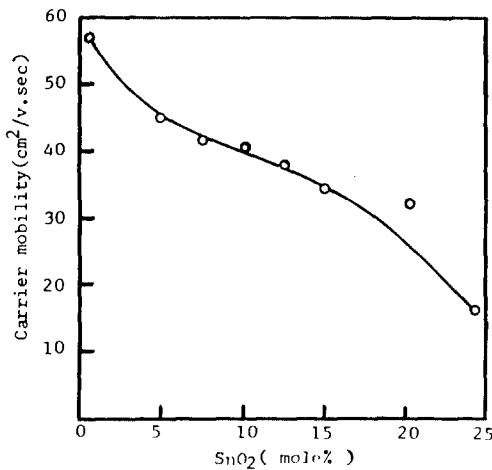


그림12. SnO<sub>2</sub>첨가율에 따른 반송자 이동도의 변화  
 Fig. 12. Carrier mobility vs. SnO<sub>2</sub> doping rate.

IV. SIS (ITO/n-Si) Solar Cell의 제조 및 그 특성

1. 製 造

ITO膜 제조시 基板으로 사용된 Si-wafer를加熱하여 solar cell을 제조한 경우 불순물에 기인하여 그 특성이 아주 나빴으므로 상온에서 제조하여 열처리한 ITO膜으로 solar cell을 제조하였다.

그림13은 SIS 구조를 갖는 ITO/n-Si solar cell의 제조공정도이다.

그림14는 제조된 solar cell의 구조도이다. 基板으로

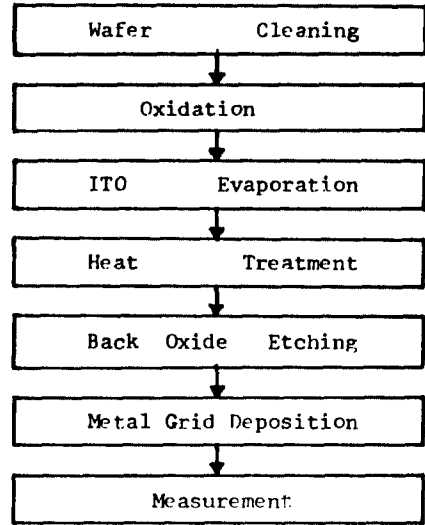


그림13. SIS solar cell의 제조공정도  
 Fig. 13. Fabrication process for the SIS solar cell.

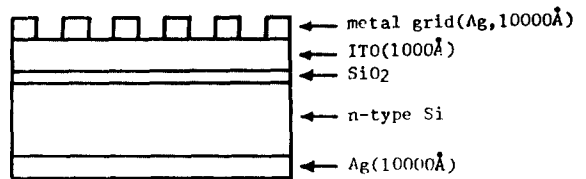


그림14. SIS 태양전지의 구조도  
 Fig. 14. The structure of SIS solar cell.

는 비저항 및 결정방향이 각각 3~5Ω/cm 및 (100)인 n-type wafer (Monsanto)를 사용했다. 절연층인 SiO<sub>2</sub>를 성장시키기 위하여 대기중 500℃에서 5분간 熱處理하였다. ITO膜의 두께는 1000Å이었으며 ITO膜 증착시 ITO vapor stream과 Si기판의 수선과의 각도는 45°였다.<sup>12)</sup> 常溫에서 증착된 ITO膜의 熱處理는 300℃에서 30분간 하였으며 앞면과 뒷면의 電極으로 silver를 각각 10000Å씩 증착시켰다.

2. 結 果

그림15는 酸化과정을 거치지 않은 ITO/n-Si 태양電池의 電流-電壓特性曲線이다.

그림16은 酸化과정을 거친 solar cell의 電流-電壓特性曲線이다.

그림17은 光源이 100mW/cm²인 AM1상대에서의 電流-電壓特性曲線을 X-Y recoder로 나타낸 것이다. 광원은 500W의 tungsten halogen lamp를 사용하였으며 充實度(F·F)와 에너지變換效率(η)는 다음식에

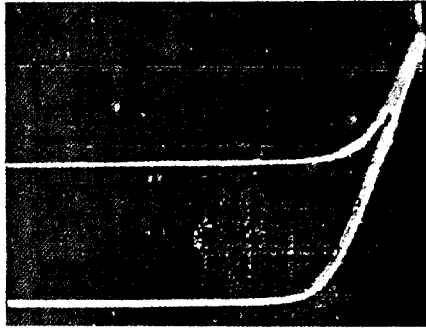


그림 15. ITO/n-Si 太陽電池의 暗전류 및 光전류(AMI) - 전압특성곡선  
 Fig. 15. Dark and photo(AMI) I-V characteristics of the ITO/n-Si solar cell.

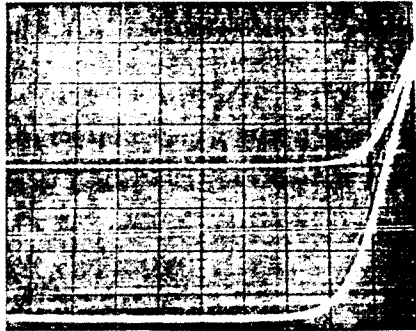


그림 16. 산화과정을 거친 ITO/n-Si 太陽電池의 暗전류 및 光전류(AMI) - 전압특성곡선  
 Fig. 16. Dark and photo(AMI) I-V characteristics of the ITO/SiO<sub>2</sub>/n-Si solar cell.

서 구할 수 있다.

$$F \cdot F = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{F \cdot F \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}}{P_{in} \cdot A}$$

여기서  $I_m$ 과  $V_m$ 은 최대출력을 나타내는 P점에 대응되는 전류 및 전압값이며,  $P_{in}$ 은 입사광의 세기,  $A$ 는 太陽電池의 면적이다.

그림 17과 위의 두 식으로 부터 얻어진 값들을 표 2에 나타내었다.

### V. 結 論

電子線 加熱蒸着法을 사용하여 ITO투명도전막을 제조하고 제조시 증착률, 산소분압, SnO<sub>2</sub>첨가율 및 기판온도에 따른 ITO투명도전막의 電氣 및 光學의 특성

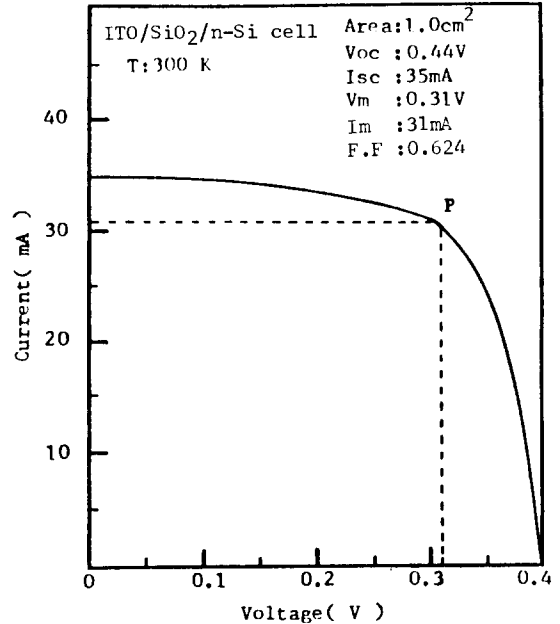


그림 17. AMI하에서의 ITO/SiO<sub>2</sub>/n-Si 太陽電池의 전류-전압곡선  
 Fig. 17. I-V characteristics of the ITO/SiO<sub>2</sub>/n-Si solar cell under AMI illumination.

표 2. 제조된 太陽電池의 특성

Table 2. The characteristics of solar cells fabricated in the experiment.

Device	Jsc(mA)	Voc(V)	F.F (%)
ITO/n-Si	32	0.4	0.57 7.28
ITO/SiO <sub>2</sub> /n-Si	35	0.44	0.62 9.61

을 조사하였다. 5~10 Å/sec의 蒸着率, 4×10<sup>-4</sup> torr의 산소분압, 10mole%의 SnO<sub>2</sub>添加率 및 300°C의 基板溫度에서 가장좋은 특성을 나타내었다. 위의 제조조건으로 ITO투명 도전막을 제조한 결과 面抵抗값은 12 12Ω/□이었으며, 가시광영역에서의 光透過率은 87~99%로서 투명전극용으로서의 큰 활용이 기대된다.

또한 常溫에서 ITO膜을 증착한후 熱處理하는 방법으로 SIS구조의 太陽電池를 제조하여 9.61%의 에너지변환효율을 얻었다.

### 參 考 文 獻

[1] K. Badeker, Ann. Pys. (Leipzig), vol. 22, pp. 749, 1907.  
 [2] K.L. Chopra, S. Major and D.K. Pandya, "Transparent conductors A status review," Thin Solid Films, vol. 102, pp. 1-46, 1983.

- [3] K.B. Sundaram and G.K. Bhagavat, "X-ray and electron diffraction studies of chemically vapour-deposited tin oxide films," *Thin Solid Films*, vol. 78, pp. 35-40, 1981.
- [4] E. Shanthi, V. Dutta, A. Banerjee and K.L. Chopra, "Electrical and optical properties of undoped and antimony doped tin oxide films," *J. Appl. Phys.*, vol. 51, pp. 6243-6251, 1980.
- [5] E. Shanthi, A. Banerjee, V. Dutta and K.L. Chopra, "Electrical and optical properties of tin oxide films doped with F and (Sb+F)," *J. Appl. Phys.*, vol. 53, pp. 1615-1621, 1982.
- [6] Tze-chiang chen, Tso-ping Ma and Richard c. Dadeker, "Infrared transparent and electrically conductive thin films of  $\text{In}_2\text{O}_3$ ," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 43, pp. 901-903, 1983.
- [7] John C.C. Fan, Frank J. Bachner and George H. Foley, "Effect of  $\text{O}_2$  pressure during deposition on properties of rf-sputtered Sn-doped  $\text{In}_2\text{O}_3$  films," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 31, pp. 773-775, 1977.
- [8] William G. Haines and Richard H. Bube, "Effects of heat treatment of the optical and electrical properties of indium-tin oxide films," *J. Appl. Phys.*, vol. 49, pp. 304-307, 1978.
- [9] Kuniyoshi Itoyama, "Properties of Sn-doped indium oxide prepared by high rate and low temperature rf-sputtering," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.17, pp. 1191-1196, 1978.
- [10] C.A. Pan and T.P. Ma, "High-quality transparent conductive indium oxide films prepared by thermal evaporation," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 37, pp. 163-165, 1980.
- [11] Daniel Laser, "Properties of indium oxide films prepared by the reactive evaporation of indium, *Thin Solid Films*," vol. 90, pp. 323-326, 1982.
- [12] A. Balasubramanian, M. Radhakrishnan and C. Balasubraminian, "Electrical properties of electron-beam evaporated indium oxide thin films," *Thin Solid Films*, vol. 91, pp. 71-79, 1982.
- [13] A. Hjortsberg, I. Hamberg and C.C. Granqvist, "Transparent and heat-reflecting indium tin oxide films prepared by reactive electron beam evaporation," *Thin Solid Films*, vol. 90, pp. 317-321, 1982.
- [14] H.U. Habermeier, "Properties of indium tin oxide thin films prepared by reactive evaporation," *Thin Solid Films*, vol. 80, pp. 157-160, 1981.
- [15] T. Horodyski, K. Budzynska and E. Leja, "The influence of the hydrogen reduction process on the electrical properties of  $\text{In}_2\text{O}_3$ : Sn thin films," *Thin Solid Films*, vol. 106, pp. 195-202, 1983.
- [16] J.B. Webb and D.F. Williams, "Transparent and highly conductive films of ZnO prepared by rf reactive magnetron sputtering," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 39, pp. 640-642, 1981.
- [17] Gerard Blandenet, Michel Court and Yves Lagarde, "Thin layers deposited by the Pyrosol process," *Thin Solid Films*, vol. 77, pp. 81-90, 1981.
- [18] J.C. Manificier and L. Szepessy, "Efficient sprayed  $\text{In}_2\text{O}_3$ : Sn n-type silicon heterojunction solar cell," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 31, pp. 459-462, 1977.
- [19] Ki-Seon Lee, "Fabrication of transparent conductive films, of  $\text{In}_2\text{O}_3$  by vacuum deposition," *J. Korea Inst. Electron Eng.*, vol. 17, pp. 43-47, 1980.
- [20] John C.C. Fan and John B. Goodnough, "X-ray photoemission spectroscopy studies of Sn-doped indium oxide films," *J. Appl. Phys.*, vol. 48, pp. 3524-3531, 1977.
- [21] T. Feng, Amal K. Ghosh and Charles Fishman, "Efficient electron-beam deposited ITO/n-Si solar cells," *J. Appl. Phys.*, vol. 50, pp. 4972-2974, 1979.