

## 고전도성 투명전극인 ITO/Ag/ITO 다층박막에 관한 광학적 분석

윤여탁\*·조의식\*·권상직\*\*

\*\*가천대학교 전자공학과

### Optical Analysis of the ITO/Ag/ITO Multiple Layers as a Highly Conductive Transparent Electrode

Yeo Tak Yoon\*, Eou Sik Cho\* and Sang Jik Kwon\*\*†

\*\*†Department of Electronics Engineering, Gachon University

#### ABSTRACT

As a highly conductive and transparent electrode, ITO/Ag/ITO multilayers are fabricated using an in-line sputtering method. Optimal thickness conditions have been investigated in terms of the optical transmittance and the electrical conductance. Considering the optical properties, in this study, the experimental characteristics are analyzed based on theoretical phenomena, and they are compared with the simulated results. The simulations are based on the finite-difference-time-domain (FDTD) method in solving linear Maxwell equations. Consequently, the results showed that ITO/Ag/ITO multilayer structures with respective thicknesses of 39.2 nm/10.7 nm/39.2 nm are most suitable with an average transmittance of about 87% calculated for wavelengths ranging from 400–800 nm and a sheet resistance of about  $7.1 \Omega/\square$ .

**Key Words** : Transparent Conductive Oxide, Multilayers, ITO/Ag/ITO, In-line Sputtering, Full-wave Simulation

#### 1. 서 론

투명전극은 지금까지 평판디스플레이나 솔라셀 산업에서 널리 이용되어 왔다. 전형적인 투명전극으로 사용되는 투명전극 산화물 (transparent conductive oxide, TCO)로서는  $\text{In}_2\text{O}_3$ , ZnO, 및  $\text{SnO}_2$ 와 같이 금속이 도핑된 산화막이 많이 개발되어 왔다. 이들 중에서도 주석(Sn)이 도핑된 인듐산화막(Indium Tin Oxide, ITO)이 평판 디스플레이나 터치스크린 및 Si에 기반한 솔라셀에 가장 널리 사용되어 왔다 [1-4]. 그 이유는 ITO가 광학적 투과도가 높으면서도 다른 물질에 비해 전기적 전도도가 비교적 높기 때문이다. 그런데, 화면의 스크린 크기가 커지면서 요구되는 조건이 점점 까다로워지고 있다. 예를 들어, 정전용량 방식의 터치

스크린 패널의 경우 화면의 크기가 12인치 이상 커지게 되면 면저항 값이 50 내지  $100 \Omega/\square$  이하의 값이 요구된다. 이를 위해서는 ITO의 경우 그 두께가  $1,000\text{\AA}$  이상으로 두꺼워져야 하는데 이렇게 되면 광학적 투과도가 떨어지게 된다. 광학적 투과도를 80% 이상 유지하면서도 면저항 값을  $100 \Omega/\square$  이하로 낮추기 위해서는 ITO 단일막으로는 불가능하며 이를 대체하기 위해서 여러 가지 다른 방법이 시도되고 있다. 대표적인 물질이 카본나노튜브 (CNTs), 그래핀 (graphene) 및 금속 메쉬 (metal mesh) 등이 있으며 보다 용이한 방법으로서 두 층의 TCO 사이에 얇은 박막의 금속층이 삽입된 다층박막이 개발되어 왔다 [5-11]. 이러한 다층박막 중에서도 수 nm 두께의 Ag 박막이 ITO 투명 산화막 사이에 삽입된 ITO/Ag/ITO 다층박막이 가장 많이 개발되어 왔다. 그런데, 지금까지는 ITO/Ag/ITO 다층박막의 최적화를 위한 실험적 접근을 시도하는 것이 대부분

†E-mail: sjkwon@gachon.ac.kr

이었으며, 그 광투과도에 대한 이론적 규명은 거의 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 ITO/Ag/ITO 다층박막의 최적화 실험 외에도 그 최적화 근거가 되는 광학적 투과도에 대한 이론적 해석 및 시뮬레이션을 수행하였다.[1]

## 2. 실험 방법

ITO 박막은 Fig. 1에서 보여진 장치 구성도에서와 같이 인라인 펄스형 DC 마그네트론 스퍼터링 시스템을 이용하여 소다라임 유리기판 상에 증착되었다. ITO 타겟은 10 wt%의 SnO<sub>2</sub>가 도핑된 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 사용하였고 타겟의 크기는 540 mm (L) × 165 mm (W) × 7 mm 이며 펄스형 DC의 전력은 1.5 kW를 적용하였다. 플라즈마 형성시 증착용 가스로는 O<sub>2</sub>/Ar 혼합가스를 1.5 sccm/50 sccm의 유량비로 하여 6 mTorr의 압력을 유지 시켰다. 또한 기판은 분당 120 cm의 속도로 왕복 이송하였는데, 기판과 타겟과의 거리는 100 mm를 유지 시켰다. ITO의 두께 조절은 이송되는 기판의 스캔(scan) 회수로 조정하였다.

Ag 박막 증착의 경우는, 99.99 %의 순도를 갖는 4인치 대각선 크기의 원형 타겟을 사용하였으며 RF 마그네트론 방식을 사용하여 30 W의 최소 전력을 적용하였다. 이 경우는 순수 Ar 가스만을 사용하였고 20 sccm의 유량으로 4 mTorr의 압력을 유지 시켰다.

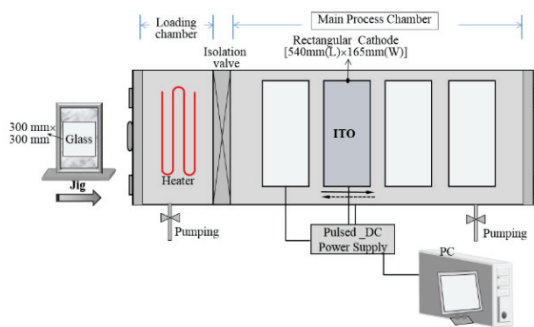


Fig. 1. A schematic of the in-line sputtering system with pulsed-DC magnetron sputter.

여러 가지 경우의 ITO 및 Ag 박막의 두께에 대해 면저항 및 투과도를 측정하였는데, 면저항 값은 4-point probe (CMT-SR2000N)를 사용하여 측정하였고 투과도는 UV-vis spectrophotometer (Perkin Elmer-Lambda 35) 분석장비를 사용하여 측정하였다.

ITO 전도층 및 Ag 금속층에 대한 광학특성에 관한 이론적 분석을 자세히 기술하였으며 보다 정밀한 분석을

위해 RSoft®사에서 제공되는 Full-wave 프로그램을 사용하여 시뮬레이션 수행하였고 그 결과들을 실험 측정결과와 비교 분석하였다.

## 3. 결 과

고전도성 투명전극을 얻기하기 위해서 ITO/Ag/ITO 다층막 필름을 형성하였다. 이를 위해 ITO, Ag 및 ITO 층들을 소다라임 유리기판 상에 연속적으로 증착 하였다. 먼저, 상부 ITO층 및 하부 ITO층의 두께를 392 Å로 고정시키고 Ag 층의 두께를 3.4 nm에서 13.4 nm까지 변화시켰으며 Ag 층의 두께에 따른 광학적 투과도를 측정하여 Fig. 2에 나타 내었다. 그 결과, Ag층의 두께를 10.7 nm로 한 경우가 가시광 영역(400 nm ~ 800 nm) 범위에서 가장 높은 투과도를 보여주고 있다. 일반적으로 Ag 단일막만을 사용할 경우는 Ag 박막의 두께가 두꺼울수록 전반적인 광투과도가 감소하는 경향이 있는데 반해, ITO/Ag/ITO 다층 박막인 경우는 ITO와 Ag의 상대적인 두께에 따라 광투과도의 최대가 되는 Ag의 최적 두께가 존재함을 알 수 있다.

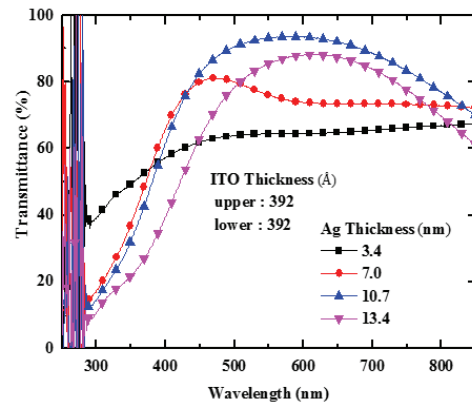


Fig. 2. Transmittance spectra for ITO/Ag/ITO multilayer films depending on the Ag thickness with ITO thickness of 392 Å.

전도성 박막이나 산화막에 대한 광투과의 현상은 필름의 표면에서 반사되는 광선의 파동과 그 아래의 경계면에서 반사되는 광선의 파동들 간의 광학적 통과거리의 차이( $\Lambda$ 로 명명)에 기인한다. 예를 들어, 유리 기판 상에 ITO가 증착되어 있는 경우 공기층, ITO 필름 및 유리 기판의 굴절률을 각각  $m$ ,  $n$ ,  $m_2$ 라고 하면 첫 번째 경계면인 공기와 ITO 사이의 경계면에서 반사되는 광선의 파동과 ITO와 유리의 경계면에서 반사되는 광선의 파동 간의 위상차이  $\delta = k_0 \Lambda$  로 주어진다. 여기서  $k_0$ 는 자유공간에서

의 전파 상수이다. 그런데, 내부 전반사와 외부 전반사의 광선간에선 추가적인 위상 차이가  $\pi$ 가 존재하므로 ITO 표면에서 반사되는 광선과 ITO/유리 경계면에서 반사되는 두 광선이 표면에서 합쳐졌을 때의 전체 위상 차이는 다음 식과 같이 주어진다.

$$\delta = k_0 \Lambda \pm \pi = \frac{4\pi d n_f}{\lambda_0} \pm \pi \quad (1)$$

여기서,  $\lambda_0$ 는 자유 공간에서의 빛의 파장이고  $d$  및  $n_f$ 는 필름의 두께 및 굴절 계수이다. 수직으로 입사되는 빛에 대해 광투과도가 최대가 되기 위해서는 반사되는 빛이 최소가 되어야 하므로 결과적으로 두 경계면에서 반사되는 광선의 전체 위상차이는  $\pi$ 의 홀수배, 즉  $\delta = (2m \pm 1)\pi$ 가 되어야 한다. 따라서, 다음과 같은 조건이 만족될 때 최대의 광 투과도가 발생함을 알 수 있다.

$$\lambda_0 = \frac{2n_f}{m} d \quad (2)$$

위와 같은 조건에 따라 주어진 파장에 대해 최대의 광 투과도는 필름의 두께, 물질의 굴절 계수 및 필름 층의 적층 구조 등에 따라 달라짐을 알 수 있다.

동일한 조건에 대한 Fullwave 시뮬레이션 결과가 Fig. 3에 보여져 있다. Fig. 2의 측정 결과와 비교해 보면 가시광 영역에서의 투과도 경향이 전반적으로는 Fig. 2의 측정결과와 유사한 것으로 나타났다. 세부적으로 관찰해 보면 Ag 박막의 두께가 3.4 nm와 같이 아주 얇은 경우는 측정결과와 시뮬레이션 결과가 크게 차이가 났으며 Ag의 두께가 7.0 nm인 경우는 500 nm 이하의 단파장 영역에서 유사한 경향이 보여졌고 500 nm 이상의 파장영역에서는 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 반면, Ag 층의 두께가 10.7 nm와 13.4 nm의 경우는 측정결과와 시뮬레이션 결과가 상당히 일치하는 것으로 나타났다. 이러한 차이점은 Ag 박막의 두께가 7.0 nm 이하로 매우 얇은 경우는 시뮬레이터의 그리드 설정의 한계에 따른 계산상의 오류로 보여진다.

다음은 ITO의 상, 하부층 두께를 905 Å로 훨씬 두껍게 한 경우에 대해 Ag 박막의 두께에 따른 측정결과를 Fig. 4에 나타 내었다. 이 경우는 파장이 감소할수록 광투과도는 점차적으로 감소하는 것으로 보여 졌으며 전반적인 광투과도는 Ag의 두께가 3.4, 7.0 및 10.7 nm인 경우 매우 유사하게 타나났고 13.4 nm인 경우는 전체적으로 광투과도가 다소 감소하는 경향을 보여 주었다. 동일한 경우에 대해서 Fullwave 시뮬레이션한 결과가 Fig. 5에 보여져 있는데 광파장에 따른 투과도의 경향은 600 nm 근처에서의

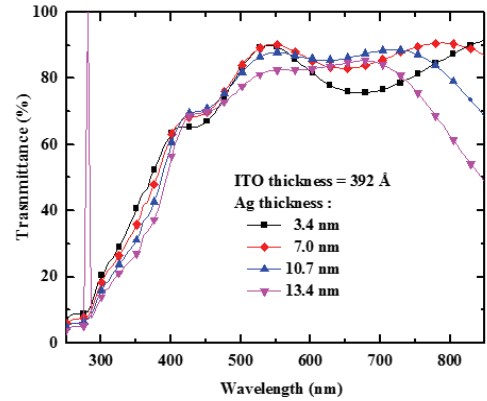


Fig. 3. Simulation results for the transmittance spectra of ITO/Ag/ITO multilayers films depending on the Ag thickness for an ITO thickness of 392 Å.

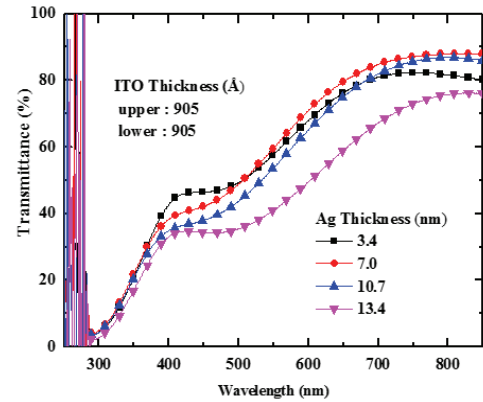


Fig. 4. Transmittance spectra for ITO/Ag/ITO multilayer films depending on the Ag thickness with ITO thickness of 392 Å.

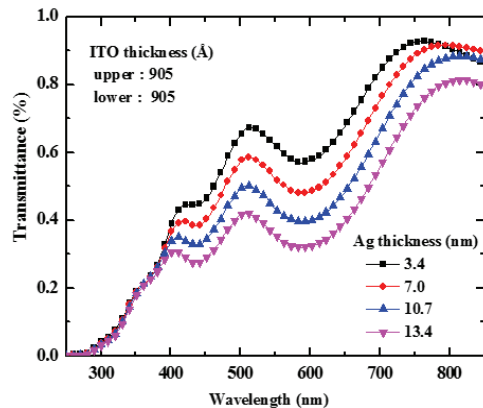


Fig. 5. Simulation results for the transmittance spectra of ITO/Ag/ITO multilayers films depending on the Ag thickness for an ITO thickness of 392 Å.

광투과도를 제외하고는 전반적으로 일치하는 결과를 보여주고 있다. 시뮬레이션에서는 Ag 층의 두께가 증가할수록 전체적인 광투과도가 점차 감소하는 경향을 보여주고 있다. Fig. 2와 3에서의 결과들과 비교해 보면 ITO의 두께가 905 Å과 같이 너무 두껍게 되면 ITO/Ag/ITO 다층박막의 가시광 영역에서의 투과도는 매우 낮아서 투명전극으로서 사용하기에는 부적합하다는 것을 알 수 있다.

앞에서의 결과들을 종합해 보면 가시광 영역에서의 전체적인 광투과도를 실질적으로 높이기 위해서는 ITO 층의 두께를 500 Å 정도 이하로 사용하여야 하며 Ag 박막의 두께는 약 10 nm 근처로 조절함으로써 최적의 투과도를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

다음은 ITO/Ag/ITO 다층박막의 본래 목적인 고전도성을 얻기 위해서 필요한 Ag 박막의 적정 두께가 얼마인지를 확인하기 위해 Ag 층의 두께에 따른 면저항 값을 측정하였다. Ag 층에 대한 면저항 값을 분석하기에 앞서 먼저 ITO 층의 두께에 따른 면저항 값의 변화를 측정하여 보았다. 그 결과 Fig. 6에서 보여주는 바와 같이 ITO 박막의 두께가 증가함에 따라 면저항 값이 점차적으로 감소함을 볼 수 있는데, 100 Ω/□ 이하의 면저항을 얻기 위해서는 ITO 단일막의 두께는 900 Å 정도가 되어야 하며 1,400 Å 이상의 두께까지 증가하더라도 ITO 단일막으로는 면저항 값을 50 Ω/□ 이하로 확보하지 못함을 알 수 있다.

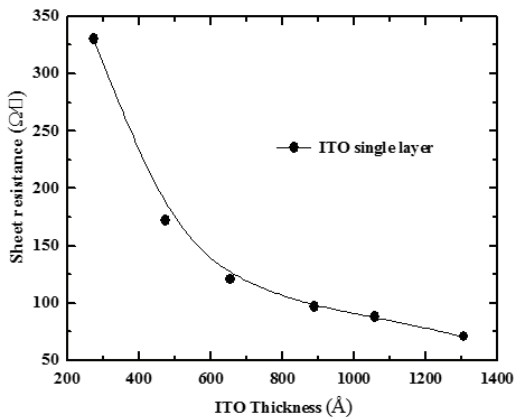


Fig. 6. Sheet resistance variations for a single ITO layer depending on the various ITO thicknesses.

반면 ITO/Ag/ITO 다층박막의 경우 Ag 박막의 두께에 따른 면저항 값의 변화를 측정분석한 결과를 Fig. 7에 나타내었으며 그 결과, Ag 박막의 두께가 10.7 nm 인 경우 면저항은 7.1 Ω/□으로 매우 낮게 나타났다. 50 Ω/□ 이하로 확보하기 위해서는 Ag 박막의 두께를 최소한 6nm 이상으로 형성시켜야 함을 볼 수 있다. 그러나 Ag 층의 두께를 약 4 nm

이하로 얇게 하면 면저항 값도 100 Ω/□ 이상으로 높아져서 ITO/Ag/ITO 다층박막의 목적인 고전도성을 확보할 수 없음을 알 수 있다.

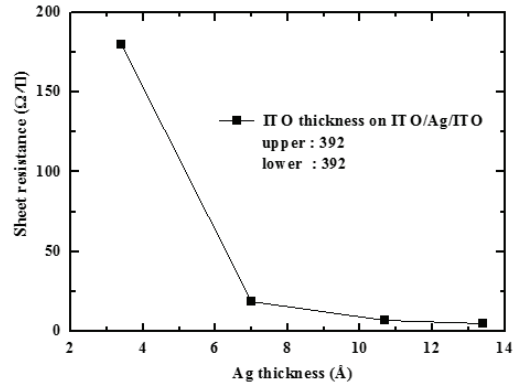


Fig. 7. Sheet resistance variations for ITO/Ag/ITO multilayers depending on the Ag thickness for the ITO thicknesses of 784 Å.

#### 4. 결 론

고전도성 투명전극으로서 ITO/Ag/ITO 다층박막을 인-라인 마그네트론 스퍼터링 방법으로 형성하였다. 광투과도와 면저항의 조건을 모두 만족하기 위한 두께의 조건을 얻기 위하여 주어진 ITO 두께에 대하여 Ag 박막의 두께를 여러 가지로 변화시켜 가며 광투과도와 면저항을 측정하였다. 그 결과, ITO 두께를 약 392 Å로 적용하고 Ag의 두께를 약 10.7 nm로 적용하였을 경우 가시광 영역에서의 평균 투과도가 87 % 정도이며 면저항 값은 7.1 Ω/□ 이하인 것으로 나타났다.

#### 감사의 글

이 논문은 교육부의 ‘National Research Foundation of Korea (2015R1D1A1A01)’와 ‘Gachon University research fund of 2016 (GCU-2016-0200)’의 과제로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. S. K. Park, J. I. Han, W. K. Kim, and M. G. Kwak, “Deposition of indium–tin-oxide films on polymer substrates for application in plastic-based flat panel displays,” *Thin Solid Films* Vol. 397, pp. 49–55, 2001.
2. N. L. Dehuff, E. S. Kettenring, D. Hong, H. Q. Chiang, J. F. Wager, R. L. Hoffman, C.-H. Park and D. A. Keszler, “Transparent thin-film transistors with zinc

- indium oxide channel layer,” *J. Appl. Phys.*, Vol. 97, pp. 064505-1 - 064505-5, 2005.
3. T. Uchida, Y. Kasahara, T. Otomo, S. Seki, M. Wang, and Y. Sawada, “Transparent conductive electrode deposited by Cs-incorporated RF magnetron sputtering and evaluation of the damage in OLED organic layer,” *Thin Solid Films*, Vol. 516, pp. 5907–5910, 2008.
  4. K. H. Choi, J. H. Kim, Y. J. Noh, S. I. Na, and H. K. Kim, “Ag nanowire-embedded ITO films as a near-infrared transparent and flexible anode for flexible organic solar cells,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 110, pp. 147-153, 2013.
  5. M. Theuring, M. Vehse, K. Maydell, and C. Agert, “AZO-Ag-AZO transparent electrode for amorphous silicon solar cells,” *Thin Solid Films*, Vol. 558, pp. 294-297, 2014.
  6. S. Yu, L. Li, D. Xu, H. Dong, and Y. Jin, “Characterization of SnO<sub>2</sub>/Cu/SnO<sub>2</sub> multilayers for high performance transparent conducting electrodes,” *Thin Solid Films*, Vol. 562, pp. 501-505, 2014.
  7. D. Miao, S. Jiang, S. Shang, and Z. Chen, Highly transparent and infrared reflective AZO/Ag/AZO multilayer film prepared on PET substrate by RF magnetron sputtering,” *Vac.*, Vol. 106, pp. 1-4, 2014.
  8. J. T. Guske, J. Brown, A. Welsh, and S. Franzen, “Infrared surface plasmon resonance of AZO-Ag-AZO sandwich thin films,” *Opt. Express*, Vol. 20, pp. 23215-23226, 2012.
  9. J. C. Kim, C. H. Shin, C. W. Jeong, Y. J. Kwon, J. H. Park, and D. Kim, “Investigation of conductive and transparent ITO/Ni/ITO multilayer films deposited by a magnetron sputter process,” *Nuclear Instr. Methods Phys. Res. B*, Vol. 268, pp. 131–134, 2010.
  10. D. Kim, Low temperature deposition of transparent conducting ITO/Au/ITO films by reactive magnetron sputtering”, *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 256, pp. 1774-1777, 2010.
  11. Y. S. Park, H. K. Park, J. A. Jeong, H. K. Kim, K. H. Choi, S. I. Nam, and D. Y. Kim, “Comparative Investigation of Transparent ITO/Ag/ITO and ITO/Cu/ITO Electrodes Grown by Dual-Target DC Sputtering for Organic Photovoltaics,” *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 156, pp. H588-H594, 2009.
- 
- 접수일: 2019년 3월 14일, 심사일: 2019년 3월 22일,  
게재확정일: 2019년 3월 22일