

# 인라인 마그네트론 스퍼터링에 의한 ITO/Ag/ITO 다층 구조 투명전극의 최적화에 관한 연구

이승용, 윤여탁, 조의식, 권상직<sup>a</sup>

가천대학교 전자공학과

## A Study on the Optimization of the ITO/Ag/ITO Multilayer Transparent Electrode by Using In-line Magnetron Sputtering

Seung Yong Lee, Yeo Tak Yoon, Eou Sik Cho, and Sang Jik Kwon<sup>a</sup>

Department of Electronics Engineering, Gachon University, Seongnam 13120, Korea

(Received September 29, 2016; Revised November 23, 2016; Accepted November 24, 2016)

**Abstract:** Indium tin oxide (ITO) thin films show a low sheet resistance and high transmittance in the visible range of the spectrum. Therefore, they play an important role as transparent electrodes for flat panel displays. However, their resistivity is rather high for use as a transparent electrode in large displays. One way to improve electrical and optical properties in large displays is to use ITO/Ag/ITO multilayer films. ITO/Ag/ITO multilayer films have lower sheet resistance than single layer ITO films with the same thickness. Prior to the ITO/Ag/ITO multilayer experiments, optimal condition for thickness change are necessary. Their thicknesses were deposited differently in order to analyze electrical and optical properties. However, when optimal single film characteristics are applied to ITO/Ag/ITO multilayer films, other phenomena appeared. After analyzing the electrical and optical properties by changing ITO and Ag film thickness, ITO/Ag/ITO multilayer films were optimized. By combining ITO film at 586 Å and Ag film at 10 nm, the ITO/Ag/ITO multilayer films showed optimized high optical transmittance of 87.65%, and the low sheet resistance of 5.5 Ω/sq.

**Keywords:** ITO, Ag, ITO/Ag/ITO, TCE (transparent composite electrode)

### 1. 서론

투명 전도성 산화물(transparent conductive oxide, TCO)은 넓은 밴드갭, 낮은 저항값, 가시영역에서 높은 투과율로 인해 터치스크린, 디스플레이 패널, 태양전지 등에 이용되고 있다. 투명 전도성 산화물은 디스플레이

에서 중요한 위치를 차지하고 있다 [1]. 현재 가장 널리 사용되고 있는 투명전극 재료는 ITO (indium tin oxide)인데 3.7 eV 이상의 밴드갭을 가진 n-형(n-type) 반도체로서, 우수한 투명전극 소재이다 [2]. 하지만 13인치 이상의 대형 터치스크린 제작시 높은 면저항으로 인해 ITO 성능 이상을 만족할만한 새로운 투명전극 개발 필요성이 대두되었다. 최근에는 Ag nanowires, graphene, CNT 등 차세대 투명전극 물질에 대한 연구가 진행 중이다. 또한 기존의 물질을 이용하여 새로운 방식으로 제작하는 방법도 연구 중에 있는데, 그 중 TCE (transparent composite electrode)는 대면적화 시 낮은 면저항, 높은 투과도를 확보할 수 있고

a. Corresponding author; [sjkwon@gachon.ac.kr](mailto:sjkwon@gachon.ac.kr)

Copyright ©2017 KIEEME. All rights reserved.  
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

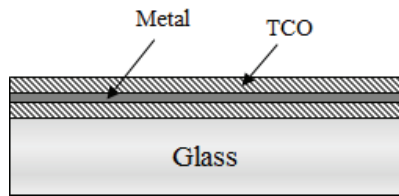


Fig. 1. Multilayer structure of the transparent composite electrode.

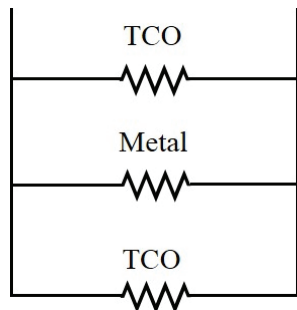


Fig. 2. The equivalent circuit of the transparent composite electrode.

산화물 재료가 다양하기 때문에 ITO 단일막을 대체할 수 있는 기술로 각광받고 있다. 그림 1에서 보여주는 바와 같이 투명합성전극은 TCO 층 사이에 얇은 금속 층을 삽입함으로써 제작하며, 일반적인 투명합성전극의 전체 면저항은 금속 층의 면저항에 의해 결정된다 [3]. 투명합성전극의 기본적인 등가회로는 그림 2와 같다. 따라서 본 연구에서는 ITO 박막을 이용하여 ITO/Ag/ITO 다층박막을 제작하였다. ITO/Ag/ITO 다층박막은 금속(Ag)의 삽입으로 상온에서 낮은 면저항과 높은 투과도를 갖는다. 이러한 원인으로 TCO 층 사이에 삽입된 금속(Ag)층이 상, 하부 TCO 층과 anti-reflection effect를 나타내기 때문에 10 nm 두께의 Ag 층이 삽입된 다층박막의 경우 단일막보다 높은 광학적 투과도를 나타낼 수 있다 [4]. 뿐만 아니라 비저항이 매우 낮은 금속을 삽입했기 때문에 상온에서도 매우 낮은 면저항 및 비저항을 갖는 투명전극을 제작할 수 있다. 투명합성전극의 박막 증착은 화학기상 증착(chemical vapor deposition, CVD), 전자빔 증착(electron beam evaporation), pulsed laser deposition, 스퍼터링(sputtering) 등에 의해 형성할 수 있다 [5-7].

본 연구에서는 스퍼터링 방식을 사용하여 ITO/Ag/ITO 다층박막을 형성하는 실험을 하였다. 지금까지 ITO/Ag/ITO에 관한 많은 연구가 진행되어 왔지만 각

층의 최적조합에 의한 다층막의 최적 조건이 만족스럽지 않았다. 이는 ITO 혹은 Ag 개별 층의 최적조건을 사용하여 ITO/Ag/ITO 다층막에 적용했을 경우 최종 결과는 광학적 특성 측면에서 최적 값이 아니라는 데 있다. 즉, 투과도 향상 측면에서 보면 각 개별 층의 최적 조건 값과 다층박막에서의 각층의 최적조건이 다르다는 것이다. 이는 빛이 어떤 매질을 입사 시에 입사 영역의 매질과 투과영역의 매질간의 굴절계수(index of reflection)의 비율에 따라 반사도가 결정되는 성질과 관련 있기 때문이다. 이외에도 어떤 파장의 빛이 매질을 통과할 때 순방향 산란(forward scattering)을 하며 지나가는 산란파(scattered wave)의 총 광학적 통과거리(optical path length)가 산란 없이 통과하는 일차파(primary wave)와의 간섭 시 두 파 간의 위상차이에 의해 투과도가 달라지는 현상 때문이다. 따라서 ITO/Ag/ITO 다층막인 경우에 투과도를 최대화시키기 위해서는 각 층들 간의 조합(combination)에 대한 최적화 조건을 찾는 것이 중요하다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 박막의 대형 크기에 대해 균일하고 매우 얇은 박막의 증착이 필요하다. 따라서, 지그(jig)로 이송하면서 각각 원하는 물질이 있는 타겟으로부터 증착이 가능하고 기판이 이송하면서 동시에 증착이 진행이 가능한 인-라인 스퍼터링 방식이 반드시 필요하다. 또한 일련의 기판들을 연속으로 증착함으로써 생산성이 높은 장점도 가지고 있다.

소다라임 유리기판상에 ITO/Ag/ITO 다층박막 형성 실험을 하기 위해, 먼저 각 단일막에 대한 실험을 수행하였다. 실험 장비는 그림 3에서 보여주는 바와 같

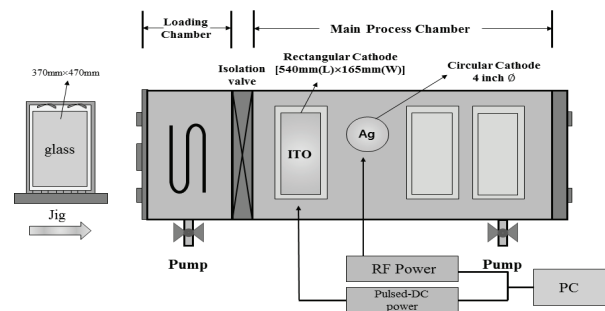


Fig. 3. The configuration of the In-line sputter system and Ag and ITO target position in the In-line sputtering equipment.

이 인-라인 스퍼터링 방식의 스퍼터(sputter)장치를 사용하였으며 기판이 일정속도로 이동하면서 증착하는 방식이다. 스퍼터는 2세대 크기로 370×470 mm의 유리 기판이 사용되며, 유리기판이 장착되는 로딩 챔버 (loading chamber)와 스퍼터가 진행되는 프로세스 챔버(process chamber)로 구분된다. 프로세스 챔버 내에는 4인치 타겟과 대형 타겟(target)이 설치되어 있다.

## 2.1 ITO 단일막 pulsed-DC 스퍼터링 공정

ITO 단일막의 두께에 따른 전기적 및 광학적 특성을 확인하기 위해 소다라임 유리 기판상에 ITO 단일막을 증착하는 실험을 하였다. '세로×가로×두께'가 '540×165×7 mm'인 대형 타겟으로 단위면적당 Power는 1.6 W/cm<sup>2</sup>이다. In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 SnO<sub>2</sub>의 중량비(wt%)가 90:10이고 순도 99.99%인 타겟을 사용하였다. 주어진 타겟 크기에 대해 ITO의 전기적 및 광학적 특성을 높게 얻을 수 있는 스퍼터링 조건으로서 power는 200 kHz 펄스로 1.5 kW의 전력을 적용하였다. 기판은 두께가 1.1 mm인 소다라임 유리기판을 사용하였고 실험을 위해 100×100 mm크기로 잘라서 기판홀드(jig)에 부착하여 챔버 내로 이송 시켰다. 프로세스 챔버에서는 로터리 펌프와 터보 펌프를 사용하여 약 2.5×10<sup>-5</sup> torr로 베이스 진공을 확보한 다음, 플라즈마 발생을 위한 가스를 주입시켰다. 플라즈마 활성 가스인 Ar 유입량을 50 sccm, 반응성 가스인 O<sub>2</sub>를 1.5 sccm으로 조절하였으며 throttle 밸브를 통해 압력을 6 mtorr로 조정하였다. 다음 1.5 kW의 펄스 전압을 인가하여 플라즈마가 형성되면 jig를 일정속도로 이송하면서 ITO 타겟 앞을 지나가게 되는데, 이 때 이송 속도는 120 cm/min로 조정하였으며 타겟과 기판 간의 거리는 10 cm로 유지되었다. 유리기판 위에 증착되는 ITO 두께는 기판이 타겟 앞을 지나가는 스캔 횟수에 의해 결정되는데 두께를 다양하게 변화시키기 위해 스캔 횟수를 1회, 3회, 5회로 다르게 하여 실험을 반복하였다.

## 2.2 Ag 단일막 RF magnetron 스퍼터링 공정

Ag 단일막의 두께에 따른 전기적 및 광학적 특성을 분석하기 위한 실험을 위하여 소다라임 유리 기판상에 Ag 단일막을 증착하는 실험을 수행하였다. 실험방법은 ITO 증착과 마찬가지로 인-라인 스퍼터링 장치를 이용하였으며, 이때 증착 두께를 수 nm에서 수십 nm로 얇게 조절하기 위하여 RF 마그네트론 스퍼터링 방식을 적용하였다. 타겟은 4인치 직경의 원형인 순수 Ag 금

속물질 (순도, 99.99%)을 사용하였다. 프로세서 가스는 순수 Ar을 20 sccm 유량으로 주입시켰으며 압력은 4 mtorr로 조정하였다. Power는 플라즈마가 발생하는 최적 조건인 30 Watt를 적용하였고 사용한 타겟의 단위 면적당 power는 0.07 W/cm<sup>2</sup>이다. 플라즈마가 발생되면 jig를 일정한 속도(60 cm/min)로 이송하면서 Ag 타겟 앞을 지나가게 하였다. Ag 두께를 변화시키기 위해 ITO 증착실험의 경우와 마찬가지로 jig가 Ag 타겟 앞을 지나가는 스캔 횟수를 1회, 3회, 5회로 다르게 실험을 반복하였다. 기판의 온도는 상온으로 하였다.

## 2.3 ITO/Ag/ITO 다층막 스퍼터링 공정

앞에서 얻어진 여러 가지 ITO 단일막 및 Ag 단일막에 대해 두께별 전기적, 광학적 특성을 측정하였다. 전기적 특성은 4-point를 통한 면저항 값이며 광학적 특성은 UV spectrometer를 통한 투과도 스펙트럼이다. 이를 통해 단일막으로서 전기적, 광학적 특성을 동시에 만족하는 최적의 두께를 분석하였다. 그러나 ITO와 Ag의 단일막으로서 최적의 투과도를 갖는 조건일지라도 ITO/Ag/ITO 다층막일 경우 투과도 측면에서 다른 현상이 나타날 것으로 예측된다. 따라서 ITO/Ag/ITO 다층막에 대한 최적의 두께조합을 구하기 위해 단일막에 대한 최적 두께 값을 기준으로 하여 ITO 단일막 및 Ag 단일막의 두께 값을 다양하게 변화시킨 조합으로 ITO/Ag/ITO 다층막 시편들을 제작하였다. 먼저, 상부 및 하부층 ITO 두께를 212 Å으로 고정시키고 가운데 층인 Ag 박막을 2.3 nm, 6.0 nm, 10.5 nm로 변화시킨 ITO/Ag/ITO 다층막에 대한 면저항 및 광투과도를 측정하였다. 두 번째로는 Ag 박막의 두께를 10.5 nm로 고정시키고 ITO 박막의 두께를 212 Å, 392 Å, 587 Å로 변화시켜 가며 면저항 및 광투과도를 측정하였다. 이렇게 다른 두께 조합을 갖는 ITO/Ag/ITO 다층막을 제작하여 면저항 및 투과도를 측정함으로써, 적절한 면저항 값을 유지하면서 최적의 투과도를 갖는 ITO/Ag/ITO 다층막의 두께 조건을 얻을 수 있었다.

## 3. 실험 결과

### 3.1 두께 변화에 따른 ITO 단일막의 전기적 광학적 특성

소다라임 유리기판 상에 ITO를 증착하는 실험을 수행하였다. 스캔 횟수에 따른 두께 값을 알아보기 위해

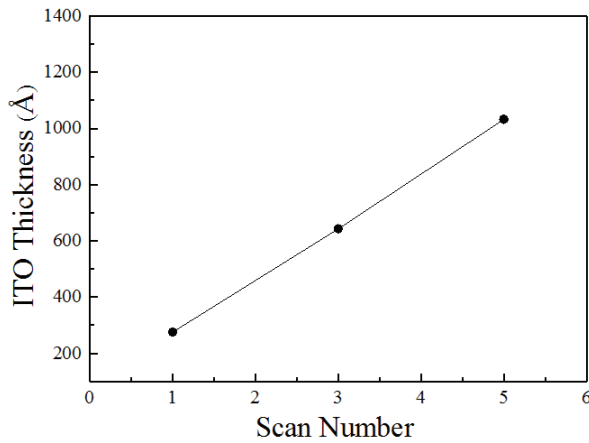


Fig. 4. The thickness variation of the ITO layer with the increase of sputtering scan numbers.

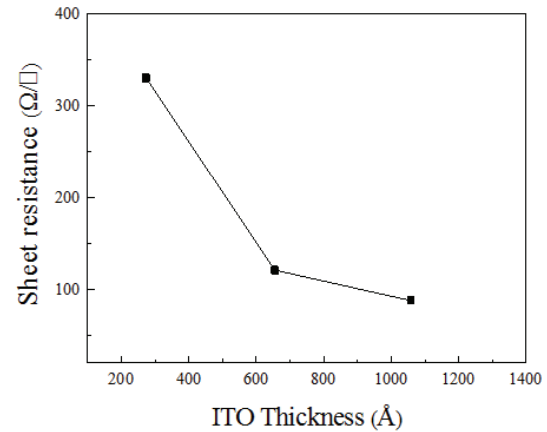


Fig. 5. The sheet resistance of the ITO layer with the increase of thickness.

일정한 속도(120 cm/min)로 1회, 3회, 5회 스캔을 하였고  $\alpha$ -step 장치(AS-500)를 이용하여 두께에 따른 ITO 단일막의 단차를 측정하였다. 그 결과 값은 그림 4에 보여져 있다. 스캔 횟수가 증가함에 따라 ITO 박막의 두께 또한 일정하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 다음으로, 4-point probe 장치(CMT-SR2000NW)를 이용하여 면저항을 측정하였다. 일반적으로 박막의 면저항 값은 비저항 값이 일정하다면 두께가 증가함에 따라 감소한다.

그림 5는 ITO 박막의 두께 변화에 따른 면저항 값을 보여주는 결과로서 두께가 273 Å, 655 Å, 1,058 Å로 증가함에 따라 면저항 값은 330 Ω/sq에서 71 Ω/sq로 감소하는 경향을 보여준다. 따라서 ITO 단일막 으로서는 두께를 1,058 Å로 두껍게 하여도 13인치 급 정전막 방식 터치스크린에서 요구되는 면저항 값인 50 Ω/sq 이하의 조건을 만족시키기 어렵다는 것을 알 수 있다.

다음은 UV/Vis spectrophotometer (Lambda 35)를 사용하여 투과도 스펙트럼을 측정분석하였다. ITO 단일막에 대해 두께에 따른 투과도 스펙트럼을 측정한 결과가 그림 6에 보여져 있다. ITO 단일막의 두께가 가장 작은 273 Å인 경우에는, 가시광선 영역(380~750 nm)에 걸쳐 투과도가 90~95%로 가장 높게 나타났다. 반면, 두께가 655 Å로 증가하면 투과도는 80% 이하까지 감소하였다. ITO 두께가 1,058 Å로 증가하면 투과도는 다시 증가하기 시작하여 85~90%까지 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 서론에서 언급한 바와 같이, 각 파장대 별로 매질(여기서는 ITO 막)을 통과하는 산란파의 광 경로에 따른 위상변화로 인해 일

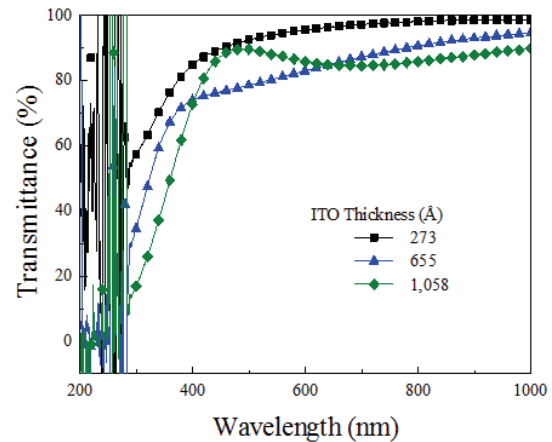


Fig. 6. The transmittance of the ITO layer with the increase of thickness.

차파와 얼마나 보강간섭(constructive interference)을 잘 하느냐와 관계가 된다. 따라서, 주어진 파장에 대해서는 투과도의 피크치가 발생하는 박막의 두께는 반복적으로 나타나며 마찬가지로 일정한 박막의 두께에 대해서는 투과도의 피크치가 발생하는 파장 값이 반복적으로 나타나게 된다. 그림 6의 투과도 그래프에서 보면, 빛의 파장이 500 nm 근처에서는 ITO 두께가 큰 1,058 Å인 경우가 두께가 작은 655 Å일 때보다 투과도가 오히려 높게 나타나며, 장파장인 800 nm 근처에서는 그 반대 현상이 나타나는 것을 볼 수 있다. 그렇기 때문에, 투과도 측면에서 박막 두께의 최적 값을 결정하기 위해서는 가시광 전체의 파장 영역인 330 nm에서 800 nm까지의 투과도를 평균한 값으로

판단하는 것이 적합하다고 볼 수 있다. 그림 5와 그림 6의 결과로부터 ITO 단일막으로서는 면저항 값을 50  $\Omega/\text{sq}$  이하를 유지하면서 투과도를 90% 이상 만족시키는 조건을 얻기가 어렵다는 것을 알 수 있다.

### 3.2 두께 변화에 따른 Ag 단일막의 전기적 광학적 특성

소다라임 유리 기판 상에 Ag 박막을 증착하는 실험을 수행하였다. 스캔 횟수에 따른 두께 값을 알아보기 위해 일정한 속도(60 cm/min)로 1회, 2회, 3회 스캔을 하였고 그 결과 값은 그림 7에 보여져 있다. 스캔

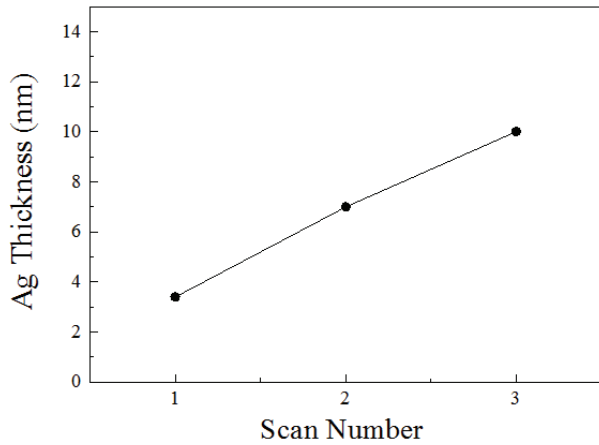


Fig. 7. The thickness variation of the Ag layer with the increase of sputtering scan numbers.

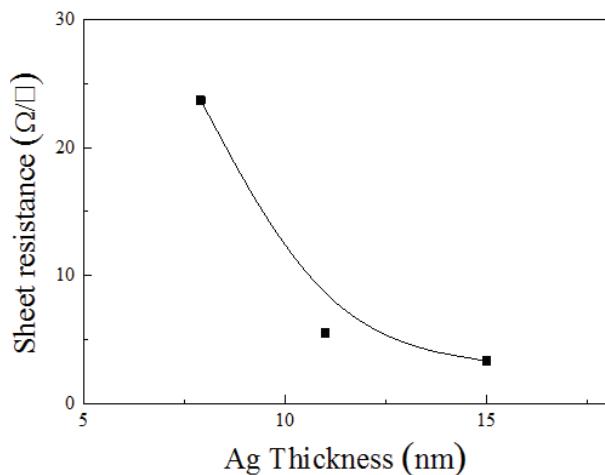


Fig. 8. The sheet resistance of the Ag layer with the increase of thickness.

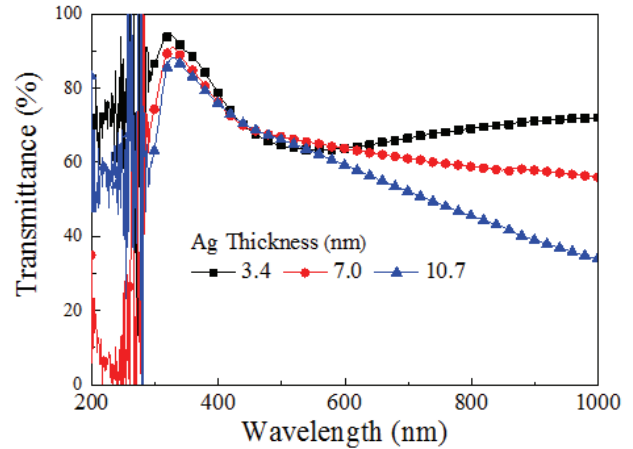


Fig. 9. The transmittance of the Ag layer with the increase of thickness.

횟수가 증가함에 따라 Ag 단일막의 두께 또한 일정하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. Ag 단일막의 두께 변화에 따른 전기적 광학적 특성을 알아보기 위해 면저항 및 투과도 값의 변화를 측정하였다.

그림 8에서 보는 바와 같이, Ag 단일막의 두께가 7.0 nm인 경우에는 24  $\Omega/\text{sq}$ 로 낮은 값이 측정되었고 10.7 nm보다 두꺼워지면 면저항 값이 5  $\Omega/\text{sq}$  이하로 급격하게 감소하였다. 다음으로 Ag 단일막의 두께 변화에 따른 투과도를 측정하였는데 그 결과가 그림 9에 나타나 있다. Ag는 금속물질이므로 가시광 영역에서는 모든 전자기파가 반사를 하는 특성을 가지지만, 두께가 얇아지면 전자기파의 광-터널링 효과에 의해 투과하는 성분을 갖게 된다.

그림 9에서 볼 수 있듯이 Ag 단일막의 두께가 대략 10 nm 이하로 얇아지면 가시광 파장 범위 전체에 걸쳐서 투과도가 증가하기 시작한다. Ag 단일막 만을 고려하면 Ag 박막의 두께가 가장 얇은 3.4 nm일 경우가 평균적으로 가장 낮은 투과도를 나타내는데 이는 Ag 금속막 내에 분포하고 있는 자유전자들의 플라즈마 주파수가 이 파장의 주파수 값인  $1.0 \times 10^{15}$  Hz ( $\lambda_0=330$  nm)에 해당하며 이로 인해 이 파장에서의 전자기파 투과도가 높아지기 때문인 것으로 추측된다.

앞의 실험 결과들에 의하면 ITO나 Ag 단일막으로는 면저항 값이 50  $\Omega/\text{sq}$  이하로 낮추면서 동시에 투과율을 90% 이상 높일 수 있는 조건을 얻기가 불가능하다고 볼 수 있다. ITO 단일막의 경우 두께를 273 Å 이하로 얇게 하면 투과도는 90% 이상으로 높일 수 있으나 면저항 값이 너무 높아진다. Ag 단일막의 경우 박

막의 두께를 7.0 nm 이상으로 할 경우 면저항 값을 24 Ω/sq 이하로 낮출 수 있으나 이 경우는 평균 투과율이 70%이하로 낮아지기 때문에 적합하지 못하다.

### 3.3 ITO/Ag/ITO 다층막에서 ITO와 Ag의 두께 변화에 따른 전기적 광학적 특성

ITO/Ag/ITO 다층막을 사용하는 근본 목적은 ITO 상, 하부 층의 가운데에 고전도성 물질인 Ag 층을 삽입함으로써 낮은 전기전도도를 보완하는데 목적이 있다. 따라서 ITO 층은 가능한 투과도를 높일 수 있는 조건을 찾는 것이 중요하다. 이런 목적에 부합하기 위해 앞의 실험을 토대로 Ag 단일막의 두께는 7.0 nm로 하면 낮은 면저항 값을 얻을 수 있다고 예상되었고 ITO 층은 가장 얇은 두께인 273 Å로 적용하면 투과도 측면에서 가장 적합한 결과가 얻어질 것으로 예상된다.

이러한 예측에 따라, ITO박막의 두께를 212 Å, 392 Å, 586 Å까지 변화시키고 Ag 층의 두께를 3.4 nm, 7.0 nm, 10.7 nm로 각각 적용시켜 ITO/Ag/ITO 다층막에 대한 면저항 및 광투과도를 측정하였다. ITO 박막과 Ag 박막의 두께 변화에 따른 ITO/Ag/ITO 다층막의 면저항 그래프를 그림 10에 나타내었다.

면저항 측정 결과, 그림 10에서 보여지는 바와 같이 Ag층의 두께를 7.0 nm로 적용하였을 경우 ITO/Ag/ITO 다층막의 전체 면저항은 16 Ω/sq로 나타났다. 이 값은 앞의 실험에서 Ag 단일막을 7 nm 두께로 적용했을 경우의 값인 24 Ω/sq 보다 더 낮은 값이다. 상, 하부층 ITO 박막을 합친 두께인 423 Å에 대한 면저항 값을 대략 180 Ω/sq로 가정하여 24 Ω/sq (Ag)와 180 Ω/sq (ITO)를 병렬로 합친 박막의 전체 저항 값은 대략 21 Ω/sq로 계산된다. 즉, ITO/Ag (8 nm)/ITO 다층막의 면저항 측정치(16 Ω/sq)가 이론적 계산치(21 Ω/sq)보다 훨씬 낮게 나타났는데, 이는 Ag 층을 단일막으로 하였을 경우 얇은 Ag 층에서의 islands로 인한 박막의 불연속성으로 인해 전자가 이동시 islands로 인한 산란현상이 크게 작용하여 전체적인 이동도를 저하시킨다. 반면, 다층막을 형성하면 Ag 단일막 상에 존재하는 islands가 ITO 층을 통해 연속성을 가지고 연결되기 때문에 전자 이동시 Ag islands로 인한 산란현상이 감소되기 때문인 것으로 여겨진다. 따라서 Ag 층의 두께가 약 10 nm 이상으로 증가하면 Ag islands 형성의 문제가 줄어들어 Ag 단일막에 의한 면저항 값이나 ITO/Ag/ITO 다층막의 면저항 값이 동일한 값을 갖게 된다. 반면에, Ag 층의

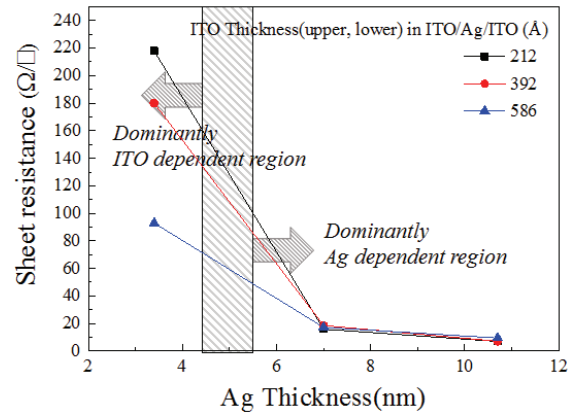


Fig. 10. The sheet resistance of ITO/Ag/ITO multilayer with the increase of the ITO film and Ag film.

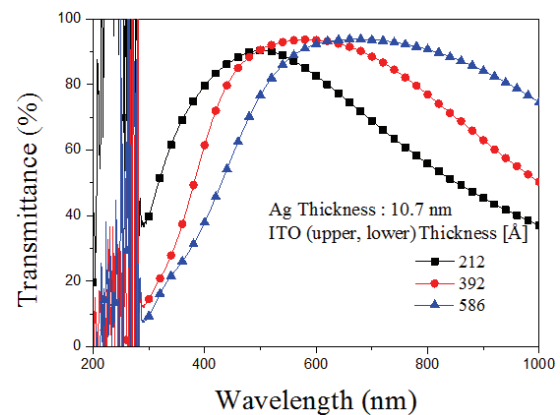


Fig. 11. The transmittance of the ITO/Ag/ITO multilayer with the increase of ITO thickness (Ag thickness : 10.5 nm).

두께가 5 nm 이하로 줄어들면 ITO/Ag/ITO 다층막 전체 면저항 값은 거의 ITO 단일막에 의한 값을 갖게 되어 Ag 층이 면저항에 기여하지 못하게 된다. 이 결과를 통해서 ITO/Ag/ITO 다층막 구조에서 높은 전도성을 갖기 위한 Ag 층의 최소 두께는 약 7 nm 이상이 되어야 함을 알 수 있다.

다음으로 ITO/Ag/ITO 다층막 구조에서 Ag 층을 10.7 nm으로 고정시키고 ITO 박막의 두께를 212 Å, 392 Å, 586 Å로 변화시켜 투과도 스펙트럼을 분석하였으며 그 결과가 그림 11에 보여져 있다. 앞의 그림 9에서 보여진 Ag 단일막에 대한 투과도 스펙트럼과 비교하면, ITO/Ag/ITO 다층막 구조인 경우가, 같은 두께의 Ag 단일막인 경우보다 가시광 전체 영역에 걸친 투과도가 훨씬 높게 나타났다. 이는 Ag 단일막인



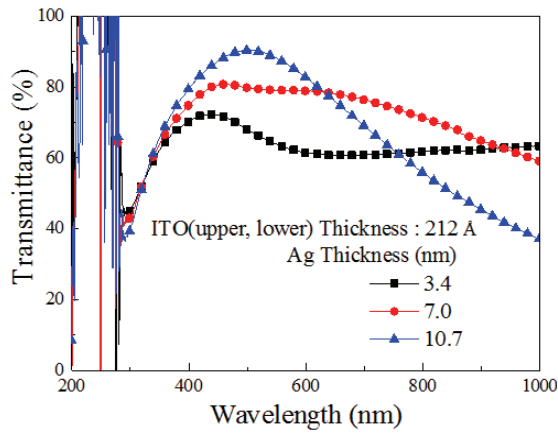


Fig. 12. The transmittance of the ITO/Ag/ITO multilayer with the increase of Ag thickness (ITO thickness : 212 Å).

경우는 가시광의 전자기파가 진행하는 경로가 '공기층 → Ag 박막 → 유리막'으로 구성되기 때문에 계면에서의 refractive index 값 변화가 급격히 발생함으로 인해 계면에서의 반사도가 높게 나타난다. 반면에, ITO/Ag/ITO 다층막 구조에서는 광 경로를 따른 박막의 변화가 '공기층 → ITO 박막 → Ag 박막 → ITO 박막 → 유리막'으로 진행 되므로 광파가 경험하는 계면에서의 refractive index 값의 변화가 상호 매칭이 되어 계면에서의 반사도가 훨씬 줄어들기 때문인 것으로 여겨진다.

그림 12에는 ITO를 212 Å으로 고정시키고 Ag의 두께를 3.4 nm, 7.0 nm, 10.7 nm으로 변화시켰다. 눈여겨 보아야할 부분은 ITO/Ag/ITO 다층막 구조에서 Ag의 두께가 증가할수록 투과도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 고려할 때는 Ag 단일막인 경우에서 본 결과처럼, Ag 박막이 두꺼워질수록 투과도는 감소할 것으로 예상되었으나 ITO/Ag/ITO 다층막 구조의 실험 결과에서는 그림 12에서 보는 바와 같이 330~620 nm 파장대에서 투과율이 계속 증가하는 모습을 보이고 있다. 반면 620~800 nm의 가시광 영역에서는 Ag 층의 두께를 7.0 nm로 한 경우가 투과도가 가장 높은 것으로 나타났다. 이는 가시광의 전자기파가 매질을 통과하여 나올 때 산란에 의한 2차파(secondary wave)와 산란을 겪지 않고 지나가는 일차파(primary wave) 간에 광 경로 거리의 차이에 따른 간섭현상 때문에 나타나는 현상으로 여겨진다. 즉, 각 층을 지나가는 전체 광 경로 거리는 식 (1)과 같이 주어지는데,  $n$  및  $t$ 는 각 층의 refractive index와 두께를 나타낸다.

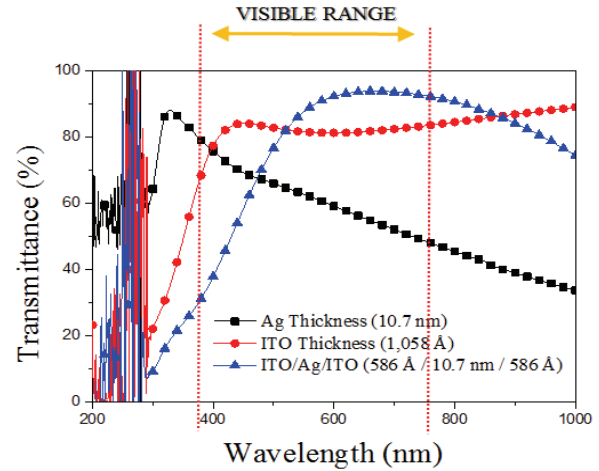


Fig. 13. The transmittance of the ITO layer, Ag layer and ITO/Ag/ITO multilayer with the wavelength.

Table 1. ITO film, Ag film and ITO/Ag/ITO multilayer films by the transmittance and sheet resistance of the figure of merit.

	ITO	Ag	ITO/Ag/ITO
T (ave, %) (380~750 nm)	87.58	62.73	87.65
$R_s$ ( $\Omega/\text{sq}$ )	88	6.98	5.5
F.O.M ( $\Omega^{-1}$ )	3.02E-03	1.35E-03	48.7E-03

$$OPL = n_{ITO-upper} \times t_{ITO-upper} + n_{Ag} \times t_{Ag} + n_{ITO-lower} \times t_{ITO-lower} \quad (1)$$

여기서 실제 전자기파가 ITO/Ag/ITO 층을 입사할 때, ITO 상부층에서 바로 반사되어 나오는 wave (wave-1)와 매질을 통과하면서 각 계면에서 다시 반사되어 나오는 wave (wave-2, wave-3, wave-4)들 간에 중첩에 의한 간섭현상이 발생하는데, 이 때 각 wave 간의 위상 차이가 파장거리의 1/2인  $\lambda/2$ 의 홀수 배수일 때 상쇄가 최대가 되며 이때의 반사율은 최저가 되므로 반대로 투과도는 최대가 된다. 이런 메카니즘에 의해 각 층의 두께에 따라 투과도가 최대가 되는 파장영역이 정해질 수 있을 것으로 판단된다.

그림 13에서는 ITO 단일막과 Ag 단일막 그리고 ITO/Ag/ITO 다층막의 가시광선 영역에서의 투과율을 비교하였다. Ag 단일막의 투과율은 ITO 단일막과 ITO/Ag/ITO 다층막보다 현저하게 떨어지는 것을 확인할 수 있다. ITO 단일막과 ITO/Ag/ITO 다층막을 비교해 보면 380~540 nm 사이의 파장대에서는 ITO 단일막이 더 우수한 것으로 보이나 540~800 nm 사이의 파장대에서는 ITO/Ag/ITO 다층막의 투과도가 더 우수한 것

으로 나타났다. 표 1에서는 마그네트론 스퍼터링 방식을 이용하여 제작한 ITO 단일막, Ag 단일막 그리고 ITO/Ag/ITO 다층막의 광학적 투과도와 면저항을 통해 계산되어 투명 전극의 상대적인 성능 지수를 확인할 수 있는 figure of merit 값을 나타내었다. Figure of merit 값은 다음 수식을 이용하여 계산하였다.

$$\text{Figure of merit (F.O.M.)} = T^{10}/R_s \Omega^{-1} \quad (2)$$

F.O.M 값은 투명전극에 의한 전기전도도와 투과도의 상반된 성질을 절충한 값을 나타내는 변수로서 투명전극의 전기적, 광학적 특성의 최적 조건을 찾기 위한 기준으로 이용된다. 표 1에서의 결과를 보면 최적 조건으로 형성된 ITO/Ag/ITO 다층막의 F.O.M 값은  $48.7 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$ 으로서 ITO 단일막의 최적값인  $3.02 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$ 와 Ag 단일막의 최적값인  $1.35 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$ 에 비해 훨씬 높게 나타났다. 따라서 ITO/Ag/ITO 다층막에 의한 투명전극 제작 시 각 층의 특성을 최적화 시키는 것 외에도 각 층간의 두께 조합을 최적화시킴으로써 전기적 및 광학적 특성이 동시에 우수한 투명전극의 형성이 가능하다는 것을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

연구에서는 디스플레이에 가장 많이 사용되고 있는 ITO의 전기적 특성을 향상시키기 위하여 중간층에 Ag 층을 삽입하여 투명합성전극을 제작하는 실험을 수행하였다. ITO/Ag/ITO 다층막의 최적의 두께를 확인하기 위해 ITO 단일막과 Ag 단일막의 두께 변화에 따른 전기적, 광학적 특성을 확인하였다. 하지만 단일막으로서 최적의 투과도를 갖는 조건일지라도 다층막에 적용할 경우 다른 현상이 나타났다. 따라서, ITO/Ag/ITO 다층막에 대한 최적의 두께 조합을 구하기 위하여 단일막에 대한 최적 두께 값을 기준으로 하여 ITO 층 및 Ag 층의 두께 값을 다양하게 변화시켜 최적의 ITO/Ag/ITO 다층막 두께 조건을 찾아내었다. 본 연구를 통해 제작된 ITO/Ag/ITO 다층막의 경우  $5.5 \Omega/\text{sq}$ 의

낮은 면저항과 87.65%의 높은 투과도로 인하여  $48.7 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$ 의 높은 figure of merit 값을 가지는 것을 알 수 있으며, 이는 ITO 단일막의 figure of merit 값보다 높은 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 이러한 높은 figure of merit 값은 높은 투과도와 낮은 면저항에 의해 나타나는 것이므로 ITO/Ag/ITO 다층막이 매우 우수한 광학적 전기적 특성을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 380~540 nm 파장대에서는 ITO 단일막에 비해 ITO/Ag/ITO 다층막의 투과도가 낮게 나타났는데 이를 개선하기 위한 추가 연구가 진행 중에 있다.

#### 감사의 글

본 논문은 한국 연구재단 기초연구사업(No. 2015R1D1A1A0105850) 및 산업통상자원부 디스플레이 장비부품 전문인력양성사업(N0001415)으로 수행되었습니다.

#### REFERENCES

- [1] B. G. Lewis and D. C. Paine, *MRS Bull.*, **25**, 22 (2000). [DOI: <https://doi.org/10.1557/mrs2000.147>]
- [2] T. Minami, *Thin Solid Films*, **516**, 5822 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.10.063>]
- [3] B. G. Lewis and D. C. Paine, *MRS Bull.*, **25**, 22 (2000). [DOI: <https://doi.org/10.1557/mrs2000.147>]
- [4] C. C. Fan, J. Bachner, H. Foley, and M. Zavracky, *Appl. Phys. Letts.*, **25**, 693 (1974). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1655364>]
- [5] H. Jeon, V. P. Verma, K. Noh, D. H. Kim, W. Choi, and M. Jeon, *J. Korean Vacuum Soc.*, **6**, 359 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.5757/JKVS.2007.16.5.359>]
- [6] S. H. Jeong, S. B. Lee, and J. H. Boo, *Curr. Appl. Phys.*, **4**, 655 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cap.2003.11.065>]
- [7] H. Kim and J. Kim, *J. Korean Vacuum Soc.*, **14**, 238 (2005).