

메쉬 구조의 Ag 나노박막을 이용한 ITO/Mesh-Ag/ITO 고전도성 투명전극 제조 및 특성 분석

이동현*, 조의식*, 권상직**

**가천대학교 전자공학과

Fabrication of the ITO/Mesh-Ag/ITO Transparent Electrode using Ag Nano- Thin Layer with a Mesh Structure and Its Characterization

Dong Hyun Lee*, Eou Sik Cho* and Sang Jik Kwon**

**Department of Electronics Engineering, Gachon University

ABSTRACT

The 'ITO/Ag/ITO' multilayers as a highly conductive and transparent electrode, even with the optimum thickness conditions, the transmittances were much lower than those of a single ITO layer on some ranges of the visible wavelength. In order to improve the transmittance, Ag layer was formed with mesh structure. Where, the thickness of the Ag layer was about 10 nm and the space between the Ag lines was varied from 2.9 μm to 19.6 μm with the fixed Ag width of about 1.2 μm in order to vary an open ratio of the Ag mesh structure. The transmittance and sheet resistance in the ITO/Mesh-Ag/ITO multilayer structure were analyzed depending on the open ratio. As a result, a trade off in the open ratio was necessary in order to obtain the transmittance as high as possible and the sheet resistance as possible low. By the open ratio of about 86%, in the ITO/Mesh-Ag/ITO multilayer structure, the transmittance was nearly same as the single ITO layer and the sheet resistance was about 62.3 Ω/\square .

Key Words : Transparent conductive oxide, ITO/Ag/ITO, In-line sputtering, ITO/Mesh-Ag/ITO multiple layers, Open ratio

1. 서 론

투명전극은 지금까지 OLED, LCD 및 터치패널과 같은 디스플레이 분야에서 필수적으로 사용되어 왔다. 투명전극으로 사용되는 투명전도 산화물 (transparent conductive oxide, TCO)들 중에서 주석(Sn)이 도핑된 인듐산화막(Indium Tin Oxide, ITO)이 아직도 가장 많이 사용되고 있다 [1-4]. 그 이유는 ITO는 광학적 투과도가 높으면서도 다른 물질에 비해 전기적 전도도가 비교적 높기 때문이다. 그런데, TV나 휴대폰에서는 화면의 크기가 점점 커지면서 요구되는 조건이 까다로워지고 있다. 즉, 화면의 크기가 커짐에 따

라 광학적 투과도(optical transmittance)는 그대로 유지 하면서 면저항 값은 줄어들이야 하기 때문이다. ITO 단일막을 사용하는 경우 면저항을 낮추기 위해서는 두께를 증가시켜야 하는데 두께가 증가하면 일반적으로 투과도가 감소하는 문제가 발생한다.

광학적 투과도를 80% 이상 유지하면서도 면저항 값을 100 Ω/\square 이하로 낮추기 위해서는 ITO 단일막으로는 불가능하며 이를 대체하기 위해서 여러 가지 다른 방법이 시도되어 왔다. 대표적인 물질로서 금속 메쉬 (metal mesh), 카본나노튜브 (CNTs), 그래핀 (graphene) 등이 있으며, 최근에는 TCO와 얇은 금속 막을 다층으로 형성한 TCO/Metal/TCO 다층박막이 많이 연구되어 왔다 [5-11]. 다층박막으로서 TCO는 AZO나 ITO가 주로 사용되며 금속으로

*E-mail: sjkwon@gachon.ac.kr

는 은(Ag) 물질이 nm 수준의 얇은 박막으로 적합한 것으로 알려져 있다. 본 연구의 실험 결과 ITO와 Ag의 두께 조합을 최적화시킨 경우의 ITO/Ag/ITO 다층박막을 가지고 서로 면저항 값은 요구하는 수준으로 낮출 수 있으나 투과도는 가시광선의 특정한 파장 영역에서 ITO 단일막의 경우에 비해 떨어지는 것으로 나타났다 [12]. 이 문제를 해결하기 위한 방안으로 가운데 들어가는 Ag 나노 박막 층을 메쉬(mesh) 구조로 패터닝하여 'ITO/Mesh-Ag/ITO' 다층막을 형성하였다.

그 결과, 면저항 값은 동일한 ITO 두께의 단일 박막 대비 약 29% 정도 줄이면서(62.3 Ω□), 가시광선의 전 영역에 걸쳐 단일 ITO 박막과 거의 유사한 투과도를 얻을 수 있었다.

2. 실험 방법

ITO 박막은 인-라인 펄스형(in-line pulsed) DC 마크네트론 스퍼터링(magnetron sputtering) 시스템을 이용하여 소다라임 유리기판 상에 증착되었다. ITO 타겟은 10 wt%의 SnO₂가 도핑된 In₂O₃를 사용하였고 타겟의 크기는 540 mm (L) × 165 mm (W) × 7 mm 이며 펄스형 DC의 전력은 1.5 kW를 적용하였다. 플라즈마 형성시 증착용 가스로는 O₂/Ar 혼합가스를 1.5 sccm/50 sccm의 유량비로 하여 6 mTorr의 압력을 유지시켰다. 또한 기판은 분당 120 cm의 속도로 왕복 이동하였는데, 기판과 타겟과의 거리는 100 mm를 유지시켰다. ITO의 두께 조절은 이동되는 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 유지시켰다.

Ag 박막의 메쉬 패턴은 Fig. 1과 같이 전형적인 포토리소그래피(photolithography) 공정을 사용하여 형성되었다. PR은 AZ-HKT 501의 positive 감광제를 사용하였으며, Ag 식각은 SE-45T 용액을 사용하여 상온에서 1초간 진행하였다.

최적의 조건을 얻기 위하여 Ag 메쉬패턴의 개구율(open ratio)을 변화시켰으며, 여러가지 Ag 메쉬의 개구율에 따라 면저항 및 투과도를 측정하였다. 면저항 값은 4-point probe(CMT-SR2000N)를 사용하여 측정하였고 투과도는 UV-vis spectrophotometer (Perkin Elmer-Lambda 35) 분석장비를 사용하여 측정하였다. 또한 전자현미경(SEM)을 사용하여 메쉬 패턴의 정확한 형상을 관측하였다.

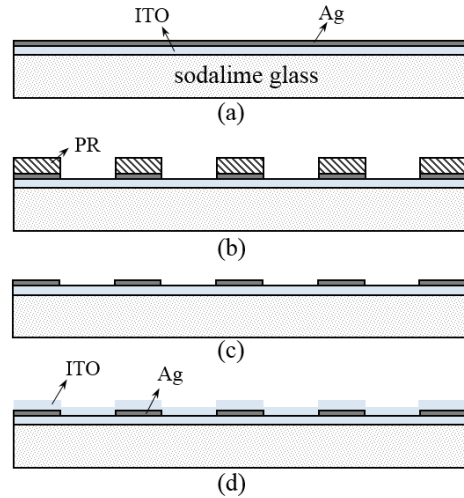


Fig. 1. Process sequences for the formation of the ITO/Mesh-Ag/ITO multilayers: (a) sputtering of the ITO and Ag films, (b) PR patterning and Ag wet etching, (c) PR strip, and (d) ITO sputtering.

3. 실험 결과

먼저, 단일 ITO 박막과 ITO/Ag/ITO 다층막 간의 투과도 비교를 위하여 두께가 105.8 nm인 ITO 단일막과 Ag 박막의 두께가 10 nm인 ITO/Ag/ITO 다층막박 간에 투과도 비교를 하였다. 다층막의 ITO 총 두께를 100 nm 단일막 ITO 두께와 유사하게 맞추기 위하여 상, 하부층 ITO 막의 두께를 각각 58.6 nm로 하였다. 두 경우 모두 상온에서 스퍼터링하여 형성하였으며 후속 열처리는 수행하지 않았다. 면저항을 측정한 결과, ITO 단일막의 경우는 88 Ω□였으며 ITO/Ag/ITO 다층막의 경우는 약 7 Ω□로 나타났다. 즉, 면저항은 ITO/Ag/ITO 다층막의 경우 Ag 층의 영향이 지배적으로 작용하여 훨씬 낮은 면저항 값을 초래 하였다. 반면 가시광선 영역에서의 투과도를 측정하여 비교한 결과 Fig 2와 같이 나타났다.

연속적인 Ag 층을 갖는 ITO/Ag/ITO 다층막의 경우는 단일 ITO 박막에 비하여 550 nm 이하의 파장 영역에서 단일 ITO 박막의 투과도에 비하여 훨씬 낮은 것으로 나타났다. 결론적으로 ITO/Ag/ITO 다층막으로는 면저항을 매우 낮게 유지하는데는 유리하지만 투과도 측면에서는 한계가 있다는 것을 알 수 있다.

이와 같이 파장 영역별 투과도가 차이가 나는 것은 ITO/Ag/ITO 다층막의 경우 입사하는 빛이 각 경계면에서 반사되면서 반사되는 전자기파 들간의 간섭 현상이 파장에 의존하기 때문으로 판단된다. 따라서, 특정 파장 영역

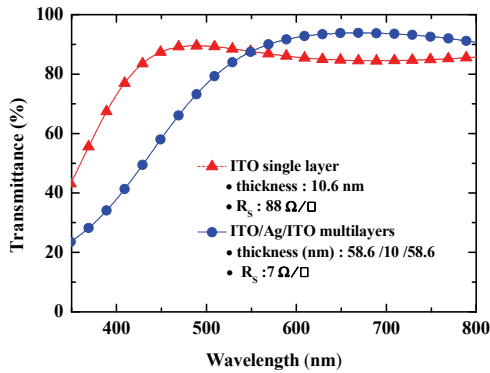


Fig. 2. Comparisons in the transmittances between the ITO single layer and the ITO/Ag/ITO multilayers.

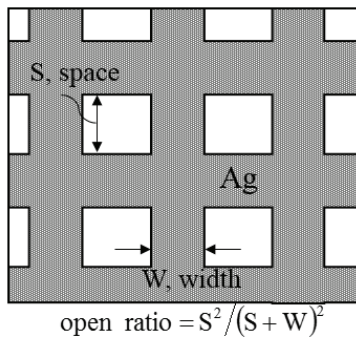


Fig. 3. Definition of an open ratio in the Ag mesh structure of the ITO/Mesh-Ag/ITO multilayers.

에서 투과도가 감소하는 것을 보완하기 위한 방안으로 Ag 박막을 메쉬(mesh) 구조로 함으로써 Ag 라인들간의 연결을 통해 면저항을 최소로 낮추면서 Ag 층의 열린 구간을 통해 투과도를 ITO 단일막의 투과도에 근접시킬 수 있는 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대되었다.

다층막에서 투과도는 각 박막의 두께 외에도 Ag 메쉬 구조의 개구율(open ratio)이 중요한 변수가 될 것으로 예상되는데 개구율에 대한 정의는 Fig 3에 표시한 바와 같이 하나의 메쉬 단위에서 전체 면적 대비 열린 면적의 비로 정의하였다. Fig 1에서 보여진 공정 순서에서 두 번째 단계인 PR을 패터닝하고 Ag 박막을 습식 식각한 직후에 측정된 Ag 메쉬 구조의 전자 현미경 사진이 Fig 4에 보여져 있다.

Ag 메쉬 구조에서 개구율의 변화에 따른 투과도 및 면저항의 변화를 관측하였다. 이때 Ag의 두께 및 Ag 라인의 폭(W)은 고정 시키고 라인간의 간격(S)을 변화시킨 마스크 패턴을 사용하였다. 공정 후 측정된 Ag의 두께는 약

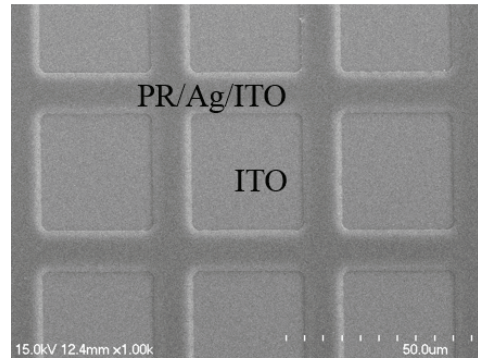
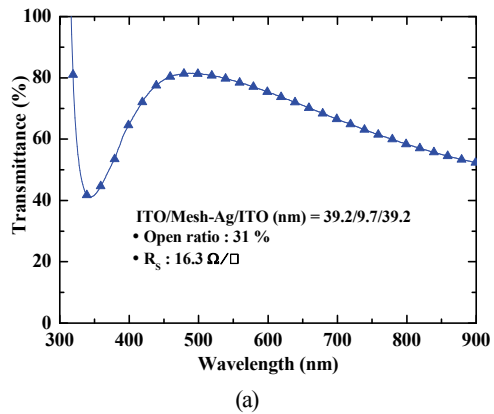
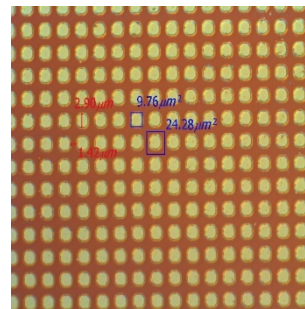


Fig. 4. SEM picture of the Ag mesh structure.



(a)



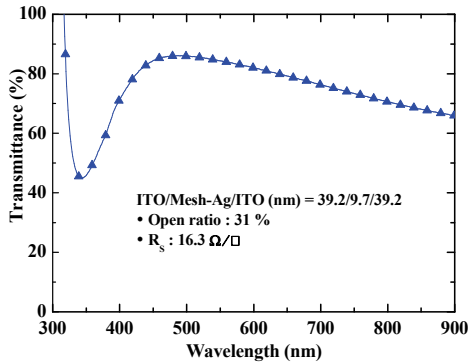
(b)

Fig. 5. (a) Transmittance of the ITO/Mesh-Ag/ITO multilayers with a Ag mesh pattern: Ag line width $W = 1.42 \mu\text{m}$, line space $S = 2.90 \mu\text{m}$, open ratio = 31% and (b) optical picture of the pattern.

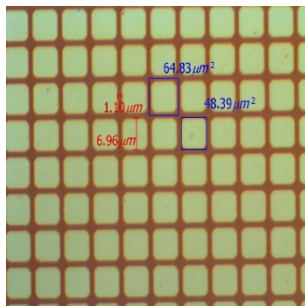
9.7 nm였으며 Ag 라인의 폭은 약 1.1에서 1.42 μm로 관측되었다. Fig 5는 공정 진행 후의 라인 폭 $W = 1.42 \mu\text{m}$, 라인 간격 $S = 2.90 \mu\text{m}$ 메쉬 구조에 대해 투과도 및 메쉬 패턴의

광학적 사진을 측정된 결과이다. 이 경우 개구율은 약 31%로 계산되었으며 면저항 측정결과 16.32 Ω/□로서 매우 낮은 값을 유지하는 것으로 확인되었다. 반면에 투과도는 그림에서와 같이 전반적으로 낮은 값을 보여주고 있다. 광학적 사진에서도 Ag가 차지하는 면적이 확연히 높은 것을 볼 수 있다.

Fig 6은 Ag 라인 폭 W = 1.10 μm, 라인 간격 S = 6.96 μm 메쉬 구조에 대해 투과도 및 패턴의 광학적 사진을 측정된 결과이다. 이 경우 개구율은 약 56%로 계산되었으며 면저항 측정결과 26.7 Ω/□로서 앞의 경우에 비해 다소 증가하는 것으로 확인되었다. 면저항 값은 요구하는 수준에 대해 만족스러운 값을 여전히 유지하면서, 광 투과도는 Fig 5의 결과와 비교했을 때 상당히 증가하는 것을 볼 수가 있다. 그러나, 여전히 600 nm 이상의 파장 영역에서는 단일 ITO 박막의 경우에 비해 높은 것으로 보여진다.



(a)

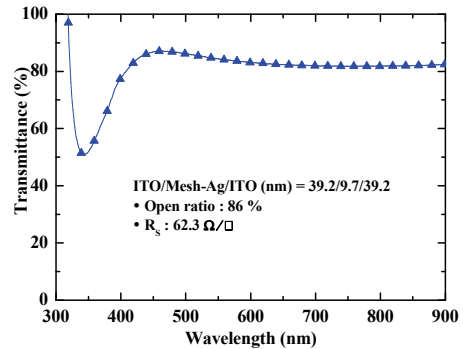


(b)

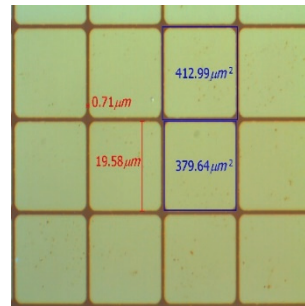
Fig. 6. (a) Transmittance of the ITO/Mesh-Ag/ITO multilayers with a Ag mesh pattern: Ag line width W = 1.10 μm, line space S = 6.96 μm, open ratio = 56% and (b) optical picture of the pattern.

다음으로 W = 1.30 μm, S = 19.58 μm 로 하여 개구율을 86%

까지 증가 시킨 경우에 대한 투과도 및 패턴사진 측정 결과가 Fig 7에 보여져 있다. 이 경우 면저항 값은 62.3 Ω/□로 측정되었다. 반면 투과도는 그림에서 보는 바와 같이 거의 ITO 단일 박막의 경우와 유사한 경향을 보여주는 것을 알 수 있다. 패턴 사진에서도 Ag 라인이 차지하는 영역이 전체에 비해 거의 무시할 수 있는 정도로 미세한 것을 볼 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 7. (a) Transmittance of the ITO/Mesh-Ag/ITO multilayers with a mesh pattern: Ag line width W = 1.30 μm, line space S = 19.58 μm, open ratio = 86% and (b) optical picture of the pattern.

상기의 실험 및 측정 결과들을 통해서 ITO/Mesh-Ag/ITO 다층 박막의 경우 광투과도 및 면저항 값은 Ag 메쉬구조의 개구율에 민감하게 영향을 받은 것으로 나타났다. 이미 Ag 박막의 두께가 10 nm 정도이므로 그 자체로서도 어느 정도 투과성을 유지하면서 Ag 금속이 없는 개구면 (open area)을 통한 광투과도 효과의 상호보완을 통해 가시광 전체 영역에 걸쳐 높은 투과성을 유지하는 것으로 판단되었다. 그러면서도, 메쉬 구조를 통한 Ag 라인들간의 연결로 인해 면저항 값은 ITO 단일막에 비해 매우 낮은

값을 유지할 수 있는 것으로 확인되었다. 따라서, Ag 메쉬의 개구율 및 두께의 최적화를 통해 매우 이상적인 투명전극의 구현이 가능할 것으로 기대된다.

4. 결 론

고전도성 투명전극으로서 ITO/Mesh-Ag/ITO 다층막을 인-라인 마그네트론 스퍼터링 방법으로 형성하였다. 광투과도와 면저항의 조건을 모두 만족하기 위한 Ag 메쉬 구조의 개구율(open ratio)을 여러 가지로 변화시킨 마스크 패턴을 이용하여 실험을 진행하였다. 그 결과, 광투과도 및 면저항 값은 Ag 메쉬의 개구율에 따라 크게 변화하였으며, 10 nm의 Ag 두께에 대해 개구율을 약 86% 정도로 하였을 때가 광투과도 및 면저항 값이 요구되는 수준을 만족하는 것으로 나타났다. 즉, 면저항은 $62.3 \Omega/\square$ 이고 광 투과도는 가시광선 전 파장영역에 걸쳐 ITO 단일막의 광투과도와 매우 유사하게 나타났다.

감사의 글

이 논문은 산업통상지원부 디스플레이 장비부품 전문인력양성사업(N0001415)으로 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 SnO₂/Cu/SnO₂ 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.
12. Y. T. Yoon, E. S. Cho, and S. J. Kwon, "Optical Analysis of the ITO/Ag/ITO Multiple Layers as a Highly Conductive Transparent Electrode," *J. the Semiconductor & Display Tech.*, Vol. 18, pp. 87-91, 2019.

접수일: 2019년 12월 9일, 심사일: 2019년 12월 13일,
게재확정일: 2019년 12월 16일