

Glass 위에 증착된 SnO₂/Ag/Nb₂O₅/SiO₂/SnO₂ 다층 투명전도막의 성능지수

김진균¹, 이상돈², 장건익^{1,a}

¹ 충북대학교 재료공학과

² 강릉원주대학교 전기공학과

Figure of Merit of SnO₂/Ag/Nb₂O₅/SiO₂/SnO₂ Transparent Conducting Multilayer Film Deposited on Glass Substrate

Jin-Gyun Kim¹, Sang-Don Lee², and Gun-Eik Jang^{1,a}

¹ Department of Materials Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

² Department of Electrical Engineering, Gangneung-Wonju National University, Gangneung 25457, Korea

(Received November 18, 2016; Revised December 27, 2016; Accepted December 30, 2016)

Abstract: SnO₂/Ag/Nb₂O₅/SiO₂/SnO₂ multilayer films were prepared on glass substrate by sequential using RF/DC magnetron sputtering at room temperature. The influence of top SnO₂ layer thickness on optical and electrical properties of the multilayer films was investigated. Experimentally measured results exhibit transmittances over 84.3 ~ 85.8% at 550 nm wavelength. As the top SnO₂ layer thickness increased from 40 to 55 nm, the sheet resistance (Rs) increased from 5.81 to 6.94 Ω/sq. The Haacke's figure of merit (FOM) calculated for the samples with various SnO₂ layer thicknesses was a maximum at 45 nm ($35.3 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$).

Keywords: TMT structure, Transmittance, Sheet resistance, Figure of merit

1. 서 론

최근 사람과 사물, 사물과 사물이 네트워크로 연결되는 초연결 사회가 도래하고, 일상생활에 ICT를 적극 활용하는 방향으로 라이프스타일이 변화되고 있다. 이러한 변화에 따라 디스플레이에 사용되는 투명전극에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다 [1-4]. 투명전극이 적용되는 조건으로는 $1 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 이하, 면 저항이

$10^3 \Omega/\text{sq}$ 이하로 전기전도성이 우수하고 380~780 nm의 가시광선 영역에서의 투과율이 80% 이상이 라는 두 가지 성질을 만족해야 한다.

투명전극 소재의 하나인 SnO₂ 계 박막은 제조원가가 ITO에 비하여 월등히 저렴하고 내화학성과 내마모성이 우수하면서도, 가시광 영역에서의 투과율이 80% 이상으로 좋다는 점으로 ITO를 대체할 재료로 주목을 받고 있다. SnO₂ 박막은 또한 3.5 eV 이상의 넓은 광학 밴드 갭을 갖는 n-type 반도체로서 광학 스펙트럼 영역에서 투명하며 높은 전기전도성을 가지므로 투명전극재료로 디스플레이 디바이스에 중요한 소재로 사용되고 있다.

단일막으로 제조된 투명 전극의 경우 상온에서 높은

a. Corresponding author; gejang@chungbuk.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.

면저항을 나타내며, $1\sim 2 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 이하의 비저항을 얻기 어렵기 때문에 $10\sim 20 \Omega/\text{sq}$ 이하의 낮은 면저항을 갖는 투명전극을 제조하기 위해서는 150 nm 이상의 두께를 갖는 박막을 제조해야한다. 하지만 두께가 증가할수록 열응력으로 인한 박막의 균일성, 깨짐 현상이 발생하게 된다.

최근에는 투명 전극 재료의 특성 개선을 위해 산화물/금속/산화물 다층구조의 투명 전극 연구가 활발히 진행되고 있다 [5-11].

다층박막 투명 전극은 산화물층 사이에 얇은 금속을 증착하여 빛이 투과할 수 있도록 하였으며, 상대적으로 단층막보다 낮은 면저항과 높은 가시광투과율을 구현하는 기술이다. 원래 산화물/금속/산화물 구조는 TiO_2 와 Ag를 이용하여 빛의 반사를 감소시키고 투과율을 향상시키는 반사방지 코팅에 많이 사용되어 왔지만 최근 투명전극 분야에 많이 응용이 되고 있다.

본 연구에서는 SnO_2 투명전도막과 Ag 금속 사이에 스퍼터링 공법을 이용하여, SiO_2 , Nb_2O_5 층을 삽입하여 $\text{SnO}_2/\text{Ag}/\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$ 구조를 통해 우수한 광학적 성질과 전기적 성질을 얻고자 하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서 Ag 박막의 증착은 DC 마그네트론 스퍼터로 SiO_2 , SnO_2 , Nb_2O_5 박막은 RF 마그네트론 스퍼터를 이용하여 제조하였다. 기판은 $76 \times 26 \times 1 \text{ mm}^3$ 크기의 소다-석회 유리(Paul Marienfeld GmbH & Co, KG-Germany)를 사용하였다. 기판은 BUEHLER사의 ULTRAMET 2002 sonic cleaner 장비를 이용하여 아세톤, 에탄올, 증류수의 순서로 각각 30분 동안 세척한 후 N_2 가스로 건조하였다. 세척된 기판을 chamber에 장입 후 로타리 펌프로 1.0×10^{-2} torr 까지 진공을 유지한 후 터보펌프를 이용하여 초기진공 5.5×10^{-5} torr 이하까지 진공상태를 유지하였다. 플라즈마 활성화 가스로는 Ar을 사용하였으며 MFC (mass flow controller)로 가스 유입량을 35 sccm으로 유지시키며 작업진공을 5.3×10^{-3} torr가 되도록 하였다. 모든 박막은 상온에서 증착을 실시하였다.

그림 1은 $\text{SnO}_2/\text{Ag}/\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$ 구조의 다층막 모식도이다. 다층막의 투과율은 UV-VIS-NIR 분광광도계를 사용하였으며, 면저항 특성은 4-Point Probe로 측정하였다. XPS와 TEM을 이용하여 다층막의 계면특성, 성분비, 두께를 조사하였다.



Fig. 1. A schematic diagram illustrating the structure of $\text{SnO}_2/\text{Ag}/\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$ multi layer film.

3. 결과 및 고찰

고굴절 물질 SnO_2 ($n=2.09$), Nb_2O_5 (2.42)와 저굴절 물질 Ag (0.12), SiO_2 (1.52)을 통해 고굴절/저굴절/고굴절 구조의 다층막을 제조하여 투과율을 상승시키고자 하였다. SiO_2 , Nb_2O_5 , Ag, 하부층 SnO_2 두께를 각각 10, 10, 10, 30 nm로 고정하고 상부층 SnO_2 두께를 40~55 nm까지 5 nm 단위로 변화하여 그에 따른 가시광선 영역의 투과율을 측정하였다.

그림 2는 다층막의 실제 투과율 실험값을 나타낸 것이다. 가시광선 영역에서 상부층의 SnO_2 두께가 40, 45, 50, 55 nm일 때, 실험값의 결과는 84.8, 85.8,

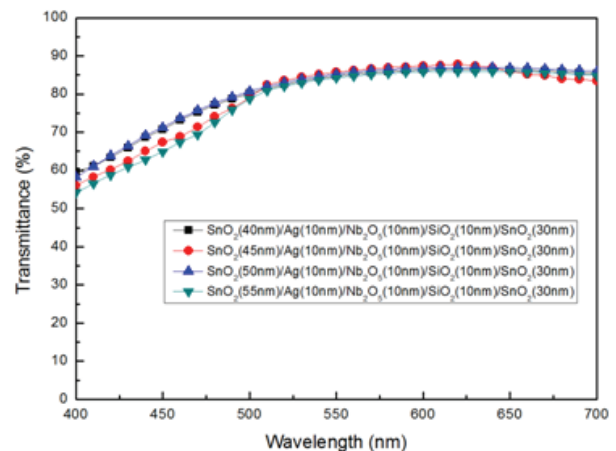


Fig. 2. Experimentally measured optical transmittance spectra on the SnO_2 (40~55 nm)/Ag(10 nm)/ Nb_2O_5 (10 nm)/ SiO_2 (10 nm)/ SnO_2 (30 nm) multi-layer film.

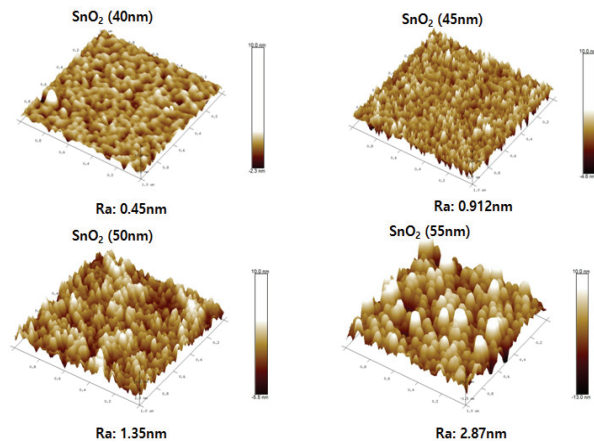


Fig. 3. AFM images of SnO₂(40~55 nm)/Ag(10 nm)/SnO₂(30 nm)/SiO₂(10 nm) /Nb₂O₅(10 nm) multi-layer film.

85.3, 84.3%를 각각 나타내었다. SnO₂의 두께가 증가할수록 투과율이 약간씩 감소하는 경향을 보였다. 실제 실험값에서는 SnO₂의 두께가 45 nm일 때 85.8%로 가장 높았다.

그림 3은 SiO₂, Nb₂O₅, Ag, 하부층 SnO₂ 두께를 각각 10 nm, 10 nm, 10 nm, 30 nm로 고정하고 상부층의 SnO₂ 두께를 40 nm, 45 nm, 50 nm, 55 nm로 변화하여 제작한 박막의 표면 분석을 위해 AFM 분석을 실시하였다. 표면 거칠기는 상부층 SnO₂ 두께가 40, 45, 50, 55 nm일 때 각각 0.45, 0.912, 1.35, 2.87 nm의 값을 보였다. 표면 거칠기 값은 상부 SnO₂ 층의 두께가 40 nm일 때 0.45 nm로 가장 낮은 값을 나타냈다.

광전자 분광기(XPS)를 이용하여 SnO₂/Ag/Nb₂O₅/SiO₂/SnO₂ 다층막 구조의 계면 확산을 파악하기 위하여 성분 분석을 실시하였다.

그림 4는 가장 높은 성능지수와 투과율을 나타내는 조건인 SnO₂(45 nm)/Ag(10 nm)/Nb₂O₅(10 nm)/SiO₂(10 nm)/SnO₂(30 nm) 다층막 구조에서의 계면특성 분석 결과이다. XPS 분석 결과 먼저 SnO₂/Ag/Nb₂O₅/SiO₂/SnO₂ 다층막구조의 설계 두께는 약 105 nm이고 스퍼터를 통해 증착한 막의 두께가 약 100 nm로 비슷하게 증착됨을 확인할 수 있었다. Ag는 약 60% 정도의 원자 농도를 나타내었으며 피크가 예리한 기울기를 가진 것으로 보아 SnO₂층과 Nb₂O₅층 사이에 비교적 확산은 적게 일어난 것으로 판단할 수 있다. 하지만 Nb₂O₅와 하부층 SnO₂ 경우 확산은 비교적

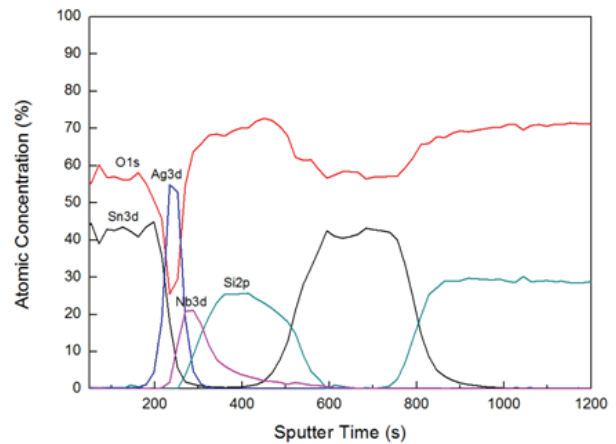


Fig. 4. XPS depth profiles of the SnO₂(45 nm)/Ag(10 nm) /Nb₂O₅(10 nm)/SiO₂(10 nm)/SnO₂(30 nm) multi layer film.

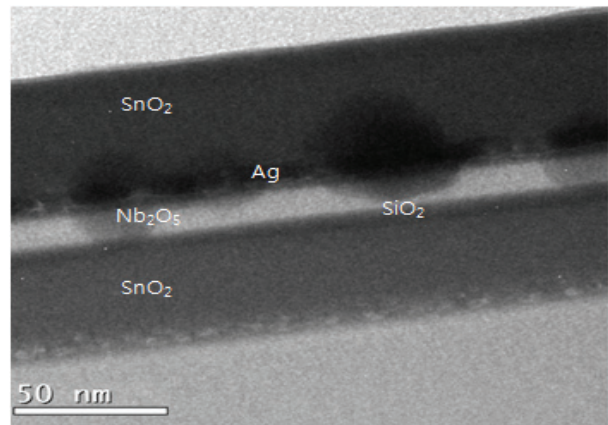


Fig. 5. TEM images of SnO₂(45 nm)/Ag(10 nm)/Nb₂O₅(10 nm)/SiO₂(10 nm)/SnO₂(30 nm) multilayer film.

많이 일어난 것을 확인할 수 있는데 그 이유는 증착두께가 10 nm로 매우 얇기 때문인 것으로 판단된다. Sn, Nb, Si의 원자 농도는 각각 40%, 20%, 25%로 나타났다.

그림 5는 SnO₂(45 nm)/Ag(10 nm)/Nb₂O₅(10 nm)/SiO₂(10 nm)/SnO₂(30 nm) 다층박막의 TEM 분석 결과이다. XPS 결과에서 알 수 있듯이 SiO₂와 Nb₂O₅는 계면에서 일부 확산층을 확인할 수 있었다.

그림 6은 SnO₂/Ag/Nb₂O₅/SiO₂/SnO₂ 다층막의 상부층 SnO₂ 두께 변화에 따른 면저항 변화를 나타낸 그래프이다. 면저항은 SnO₂ 두께가 40, 45, 50, 55

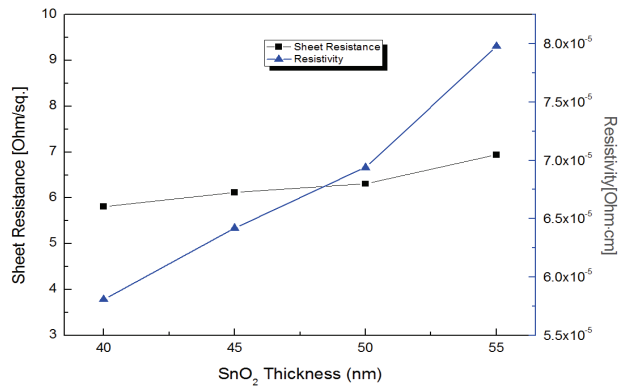


Fig. 6. The variation in sheet resistance (R_s) and resistivity (ρ) of $\text{SnO}_2/\text{Ag}/\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$ the coated multi-layers as a function of top SnO_2 layer thickness.

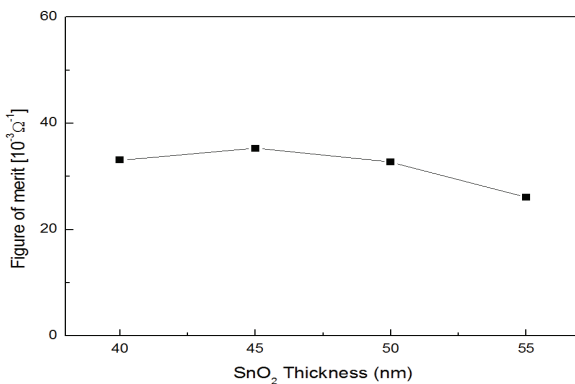


Fig. 7. The calculated Φ_{TC} with increasing the top SnO_2 layers in $\text{SnO}_2/\text{Ag}/\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$ multi-layer film.

nm일 때 각각 5.81, 6.12, 6.31, 6.94, Ω/sq 로 SnO_2 두께가 증가할수록 면저항이 약간씩 증가하였다. 비저항 또한 각각 5.81×10^{-5} , 6.42×10^{-5} , 6.94×10^{-5} , 7.98×10^{-5} $\Omega \cdot \text{cm}$ 로 면저항 수치와 유사한 경향을 보였다. 이는 표면 거칠기가 증가하면서 전기적 특성이 감소한 것으로 판단된다.

그림 7은 다층박막에서 상부층 SnO_2 두께 변화에 따른 성능지수를 나타낸 그래프이다. FOM (figure of merit) 표현 방식은 여러 가지가 있으며 그 중에서 연구자들이 가장 많이 사용되는 것은 Haacke's figure of merit으로 다음과 같다 [12].

$$\Phi = T^{10}/R_s \quad (1)$$

Φ 는 성능지수, T 는 투과율, R_s 는 면저항을 나타낸다. 두께 변화에 따른 성능지수는 33.1, 35.3, 32.7, $26.1 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$ 으로 상부층 SnO_2 두께가 45 nm일 때 가장 높은 성능지수를 보였다. 이는 $\text{SnO}_2/\text{Ag}/\text{SnO}_2$ (25 nm/5 nm/25 nm) [13], (45 nm/10 nm/45 nm) [14]일 때, 각각의 성능지수가 16, $13.3 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$ 인 기존의 3중막과 비교하여 높은 수치를 나타낸다.

4. 결론

본 연구에서는 RF/DC magnetron sputtering을 이용하여 $\text{SnO}_2/\text{Ag}/\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$ 다층막구조에서 상부 SnO_2 층의 두께를 변화시키며 광학적 성질, 전기적 성질의 변화와 다층막의 성능지수를 평가하였다.

광학적 성질인 투과율은 SnO_2 의 두께가 45 nm에서 85.8%로 가장 우수하였고, 면저항과 비저항은 SnO_2 의 두께가 증가할수록 각각 증가하는 경향을 보였다. 투과율과 면저항으로 계산된 FOM은 SnO_2 의 두께가 45 nm에서 $35.3 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$ 로 가장 높은 값을 보이며 우수한 특성을 나타내었다.

이러한 전기적, 광학적 특성으로부터 $\text{SnO}_2/\text{Ag}/\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$ 다층막 구조는 투명전극소재로서 응용될 것을 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 충북대학교 학술연구지원사업의 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- [1] Y. Wang, T. Brezesinski, M. Antonietti, and B. Smarsly, *ACS Nano*, **3**, 1373 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1021/nn900108x>]
- [2] F. Rohlffing, D. Brezesinski, T. Rathousky, J. Feldhoff, A. Oekermann, T. Waga, M. Smarsly, and B. Ady, *Mater.*, **18**, 2980 (2006).
- [3] F. J. Yusta, M. L. Hitchman, and H. Shamlian, *J. Mater. Chem.*, **7**, 1421 (1997). [DOI: <https://doi.org/10.1039/a608525c>]

- [4] T. P. Chow, M. Ghezzi, and B. J. Baliga, *J. Electrochem. Soc.*, **129**, 1040 (1982). [DOI: <https://doi.org/10.1149/1.2124012>]
- [5] J. G. Kim, S. M. Yoon, and G. E. Jang, *Journal of Ceramic Processing Research*, **17**, 80 (2016).
- [6] J. G. Kim and G. E. Jang, *Journal of Ceramic Processing Research*, **17**, 103 (2016).
- [7] A. Dhar and T. L. Alford, *J. Appl. Phys.*, **112**, 103113 (2012).
- [8] A. Indluru and T. L. Alford, *J. Appl. Phys.*, **105**, 123528 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3153977>]
- [9] V. Sharma, S. Singh, K. Asokan, and K. Sachdev, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, **379**, 141 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2016.04.059>]
- [10] Y. Guo, W. Cheng, J. Jiang, S. Zuo, F. Shi, and J. Chu, *Vacuum*, **131**, 164 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2016.06.014>]
- [11] J. H. Kim, Y. J. Moon, S. K. Kim, Y. Z. Yoo, and T. Y. Seong, *Ceramics International*, **41**, 14805 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.08.001>]
- [12] G. Haacke, *J. Appl. Phys.*, **47**, 4086 (1976). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.323240>]
- [13] S. H. Yu, C. H. Jia, H. W. Zheng, L. H. Ding, and W. F. Zhang, *Materials Letters*, **85**, 68 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.06.108>]
- [14] A. Bou, P. Torchio, D. Barakel, F. Thierry, P. Y. Thoilon, and M. Ricci, *Proc. of SPIE*, **8987**, 898706 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2039067>]