

# RF 마그네트론 스퍼터링을 이용한 $WO_3/Ag/WO_3$ 투명전극의 전기·광학적 특성 연구

## A Electrical and Optical studies of $WO_3/Ag/WO_3$ Transparent Electrode by RF Magnetron Sputtering

강 동 수\* · 이 봉 주<sup>†</sup> · 권 홍 규\*\* · 신 백 균\*  
(Dong-Soo Kang · Boong-Joo Lee · Hong-Kyu Kwon · Paik-Kyun Shin)

**Abstract** -  $WO_3/Ag/WO_3$  multilayer was researched by using RF magnetron sputtering with transparent electrode. Process gas flow ratio with Ar/O<sub>2</sub> were selected the optimum conditions at 70sccm/2sccm and  $WO_3$  thin film at its conditions was appeared at transmittance about 80% in the visible light region to the average.

$WO_3/Ag/WO_3$  multilayer thin films were fabricated from the same process condition which was the same gas flow ratio of Ar and O<sub>2</sub>.  $WO_3/Ag/WO_3$  thin films were appeared transmittance about 93% and sheet resistance about 6.41 Ω/□. From the SEM images, each thin films were appeared when  $WO_3$  is 40nm and O<sub>2</sub> is 10nm.

**Key Words** : Multilayer,  $WO_3$  thin film, Process gas flow ratio

### 1. 서 론

현 시대는 정보화 사회의 발전으로 우리는 정보를 제공하는 많은 디지털 장비 속에 살고 있다. 이에 따라 정확한 정보를 주고 받을 수 있도록 디스플레이 장치들의 개발이 반드시 필요하다. 시각적으로 정보를 전달하는 디스플레이 장치는 CRT(Cathode Ray), LCD(Liquid Crystal Display), PDP(Plasma Display Panel), FED(Field Emission Device), OLED(Organic Light Emitting Diode) 등으로 다양한 원리 및 공정으로 개발되어 왔다.

한편, 많은 디스플레이 장치에 중요한 부품으로 대부분 사용되고 있는 투명전극은 특정 파장 영역의 빛을 통과시키면서 기본적으로 80%이상의 높은 투과도를 가져야하며 10<sup>3</sup> Ω/□ 이하의 낮은 면저항을 갖는 특성이 있다[1]. 대표적인 투명전극으로는 ITO를 들 수 있다. 그러나 최근, ITO 투명전극의 핵심 금속인 인듐(In)의 가격 급증과 독성, 저온 증착의 어려움, 차세대 디스플레이 장치의 투명전극으로 사용하기에 어렵다는 단점 등이 있다. 또한 폐기에 따른 환경적, 경제적으로 문제가 되고 있다. 이러한 상황으로 인해 ITO를 대체할 물질에 대한 신뢰성 확보와 경제적 요건을 갖추도록 개발하여야 한다.

앞서 말한 디스플레이 장치의 투명전극으로 사용되기 위

하여 여러 요구를 만족시키는 새로운 투명전극이 다양하게 진행되고 있다. CNT 필름의 경우 높은 광투과율과 낮은 면저항을 만족하지만 가격이 비싸며, ITO를 대체할 만큼의 성능이 구현되지 않았다. 다른 투명전극 물질로 전도성 고분자 투명전극은 유연성이 높지만 면저항이 크고 면저항을 낮추면 투과율이 감소하여 실용화 되지 못하고 있다[3].

유전체/금속/유전체 다층막 투명전극은 금속을 통해 낮은 면저항을 가질 수 있으며, 다층구조의 광학적 원리를 통해 높은 투과율을 얻을 수 있고, 유전체 박막을 통해 우수한 유연성을 가질 수 있다. 다층구조의 광학적 원리에서 투명도를 개선시키기 위하여 금속과 유전체의 굴절률 차이는 매우 중요하기에, 여러 유전체와 금속의 연구가 진행되고 있다[4].

이러한 다층막 투명전극의 박막을 형성할 수 있는 공정 방법은 열 증착법, 용액 공정, 스퍼터링 등이 대부분 사용되고 있다. 이러한 기술 중에서 스퍼터링 방법은 열 증착법과 달리 상온에서 높은 증착율을 보여주며, 용액 공정보다 박막의 두께 조절 및 균일성이 뛰어나다는 장점을 가지고 있다. 특히 여러 스퍼터링 방법 중 RF 마그네트론 스퍼터링 방법은 높은 증착율과 낮은 기판온도의 유지, 그리고 박막의 조성을 제어할 수 있는 장점들을 가지고 있어 상업적으로 대량 생산의 높은 가능성을 가지고 있다.

본 연구는 RF 마그네트론 스퍼터링 박막 방법을 통해 투명전극이 높은 광학적 특성 및 전기적 특성을 갖기 위하여 높은 굴절률을 지닌  $WO_3$  유전체 박막을 선정하고 스퍼터링 공정 변수를 통한  $WO_3$  단층박막에 대하여 특성과 전기적 특성 향상을 위한 Ag 금속 박막을 선정하여  $WO_3/Ag/WO_3$  다층막을  $WO_3$  두께의 변화와 Ag 두께의 변화에 따른 특성을 살펴보면서 결과적으로 최적의 높은 광투과율과 낮은 면저항을 투명전극을 제시하였다.

<sup>†</sup> Corresponding Author : Dept. of Electronic Engineering, Namseoul University, Korea.  
E-mail : bjlee@nsu.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Inha University, Korea.

\*\* Dept. of industrial & Management Engineering, Namseoul University, Korea.

Received : August 04, 2014; Accepted : October 28, 2014

## 2. 실험방법

### 2.1 박막 형성

본 실험에서는 WO<sub>3</sub> 단층박막과 WO<sub>3</sub>/Ag/WO<sub>3</sub> 다층막을 RF 마그네트론 스퍼터(Atech Co.Ltd)를 이용하여 유리 기판에 증착하였다. 유리 기판은 초음파 세척기를 이용하여 아세톤과 에탄올, 그리고 증류수를 이용하여 각각 10씩 세척하였고 질소 가스를 통해 건조 시켰다. 타겟과 기판 사이의 거리는 10cm 로 유지하였으며, 증착시 온도는 상온에서 하였다. 초기 진공도는 1.8×10<sup>-6</sup>torr를 유지하였으며 타겟은 직경과 두께가 각각 4"Dia × 1/8"Th인 WO<sub>3</sub>(99.95%)와 Ag(99.99%)를 사용하였다. 실험에 이용된 스퍼터 장비는 로드락 과 챔버의 두 부분으로 나누어져 있으며, 기판은 로드락을 통해서 집어넣거나 꺼내게 되므로 챔버 내부는 항상 높은 진공 상태로 유지된다. 챔버에는 두 개의 타겟이 설치할 수 있어 다층막을 제작할 때 타겟을 교체하는 시간 없이 빠르게 공정할 수 있다. 또한 기판과 타겟의 거리 조절 및 기판을 회전시킬 수 있는 구조를 가지고 있다. 그림 1은 사용되어진 장비의 사진이다. 반응 가스로는 Ar과 O<sub>2</sub>를 사용하였으며, 유량조절기(mass flow controller)를 거쳐 챔버 내부로 들어오게 된다. 타겟의 표면 세정을 위하여 WO<sub>3</sub>과 Ag 타겟을 각각 10분씩 pre-sputtering를 하였다.

WO<sub>3</sub> 단층 박막은 RF power 100W, 7×10<sup>-3</sup>torr에서 챔버 내의 gas 공정 조건을 Ar의 유량을 10sccm에서 100sccm으로 변경하였으며, O<sub>2</sub>의 유량은 1sccm에서 3sccm으로 변화시켰다. 또한 공정시간을 5분에서 7분 30초로 변경하면서 증착하여 진행하였다. WO<sub>3</sub>/Ag/WO<sub>3</sub> 다층막의 Ag 박막의 경우 RF power 100W, 증착압력 7×10<sup>-3</sup>torr 조건에서 진행하였다. 공정 조건을 표 1에 정리하여 나타내었다.

표 1 RF 마그네트론 스퍼터링 법의 실험 조건

Table 1 Experiment conditions of RF magnetron sputtering

Taeget	WO <sub>3</sub> (99.95%)	
	Ag(99.99%)	
Substrate	glass	
Base pressure	1.8×10 <sup>-6</sup> torr	
RF power	100W	
Gas glow rate	WO <sub>3</sub>	10 - 100sccm
	Ag	30sccm
working pressure	WO <sub>3</sub>	7×10 <sup>-3</sup> torr
	Ag	7×10 <sup>-3</sup> torr
Substrate temp	Room Temperature	
Distance (sub. & target)	10cm	

### 2.2 측정방법

분석을 위하여 사용한 장비는 Four Point Probe-HS 8(DASOL ENG)를 사용하여 증착 막의 면저항을 측정하였으며 UV spectrophotometer(LAMBDA 750)를 이용하여 가시광선 영역에서의 투과율을 측정하였다. 또한 SEM(S-4300 SE)을 통해 형성된 다층막의 두께를 측정하였다.

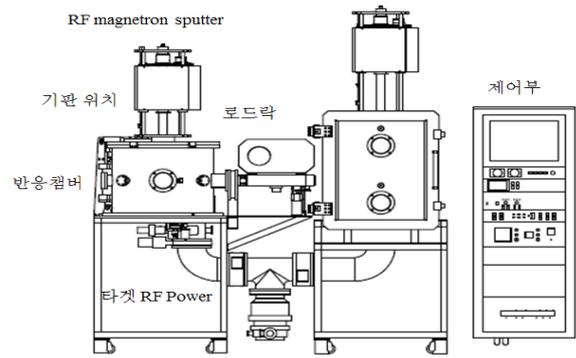
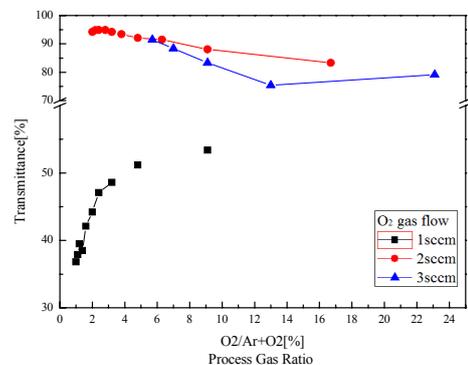


그림 1 RF 마그네트론 스퍼터(Atech Co.Ltd)  
Fig. 1 RF magnetron sputter

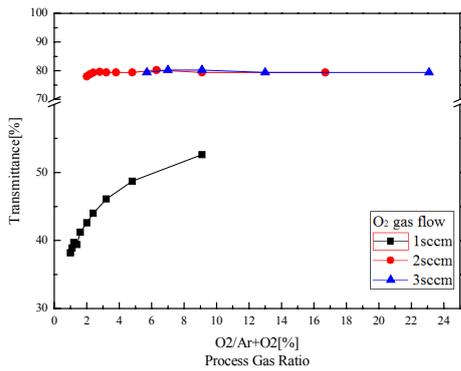
## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 WO<sub>3</sub> 단층 박막의 광학적 특성

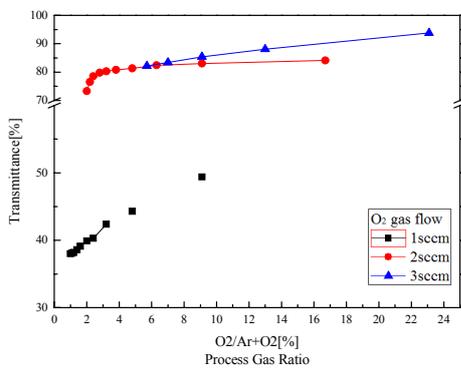
그림 2는 sputtering으로 박막 공정시 챔버내의 반응가스 Ar과 O<sub>2</sub>의 유량과 비율에 따른 WO<sub>3</sub> 단층 박막의 투과율을 측정된 결과를 나타내었다. 가시광선 영역에서 400nm, 550nm, 750nm 파장 때 각각의 투과율을 보여주며, 먼저 산소 유량이 1sccm일 경우에 가시광선 전 영역에서 O<sub>2</sub>의 비율이 커질수록 투과율이 증가하는 것을 보여주었다. 하지만 투명전극으로 사용하기에는 낮은 투과율이며, 가장 높았던 부분은 Ar 10sccm/O<sub>2</sub> 1sccm일 때 429nm파장에서 약 53.52%로 측정되었다. O<sub>2</sub> 유량이 2sccm일 경우에는 전 영역에서 유량이 1sccm일 때보다 높은 투과율을 보여 주고 있다. 낮은 파장 영역에서는 O<sub>2</sub>의 비율이 증가할수록 감소하지만 이 부분을 제외한 다른 부분에서 거의 균일한 투과율을 알 수 있다. O<sub>2</sub> 유량이 3sccm일 때 또한 2sccm과 같이 전 영역에서 높은 투과율을 보여주고 있다. 낮은 파장 때에는 2sccm과 동일하게 비율이 증가할수록 투과율이 감소하지만 높은 파장 때에는 1sccm과 동일하게 증가하는 것을 보여주었다. 2sccm일 때보다 높은 투과율이지만 일정하지 않았다. 실험을 통해 WO<sub>3</sub> 단층 박막의 경우, O<sub>2</sub> 유량을 2sccm으로 할 때 가장 일정하면서 80% 이상의 투과율이 높은 것을 알 수 있다.



(a) Wave length 400nm



(b) Wave length 550nm



(c) Wave length 750nm

그림 2 반응가스 유량과 비율에 따른 WO<sub>3</sub> 단층 박막의 투과율  
Fig. 2 Transmittance of WO<sub>3</sub> thin film with the process gas flow ratio

### 3.2 반응가스 유량과 비율에 따른 WO<sub>3</sub>/Ag/WO<sub>3</sub> 다층막의 전기적 광학적 특성

그림 3은 WO<sub>3</sub> 단층 박막의 광학적 특성과 동일하게 반응가스 Ar과 O<sub>2</sub>의 유량과 비율에 따른 WO<sub>3</sub>/Ag/WO<sub>3</sub> 다층막의 투과율과 면저항을 측정된 결과를 나타내었다. 가시광선 영역 중 중간 부분인 550nm 파장일 때 투과율을 측정하였으며, 먼저 투과율은 WO<sub>3</sub> 단층 박막과 같은 양상으로 O<sub>2</sub> 유량이 1sccm일 경우에는 낮은 투과율을 보여 투명전극으로 대체하기에는 매우 부족한 결과를 보였지만, O<sub>2</sub> 유량이 2sccm의 경우에는 대체하기에 가능한 높은 투과율이 측정되었다. Ar과 O<sub>2</sub> 비율에 대해서 2~3% 투과율에 차이가 있지만 평균적으로 85% 이상을 보였다. 가장 높았던 부분은 반응 가스의 비율이 Ar 70sccm/O<sub>2</sub> 2sccm일 때 550nm 파장에서 약 93% 이상의 높은 투과율이었으며, 가시광선 영역인 380nm에서 780nm까지 평균하여 약 90% 내외의 투과율을 보였다. 면저항은 O<sub>2</sub> 유량이 2sccm에 비해 1sccm이 균일하게 낮은 값이 측정되었지만, 두 가지 경우 모두 투명전극으로 대체할 수 있는 낮은 면저항을 보여주었다. 또한 투과율은 2sccm이 높은 결과를 보여줌으로써 이번 실험을 통해 스퍼터링으로 박막 공정시 챔버내의 반응가스는 전기적 광

학적 특성 모두 우수한 O<sub>2</sub> 유량과 비율이 Ar 70sccm/O<sub>2</sub> 2sccm일 경우로 최적 공정조건을 정하였다. 면저항이 가장 낮게 측정된 부분은 반응가스의 비율이 Ar 70sccm/O<sub>2</sub> 2sccm로 6.52Ω/□ 값이 측정되었다. 실험을 통해 단층 박막과 동일하게 WO<sub>3</sub>/Ag/WO<sub>3</sub> 다층막도 O<sub>2</sub> 유량을 2sccm으로 할 때 투과율이 높으며 면저항 또한 낮은 것을 알 수 있다.

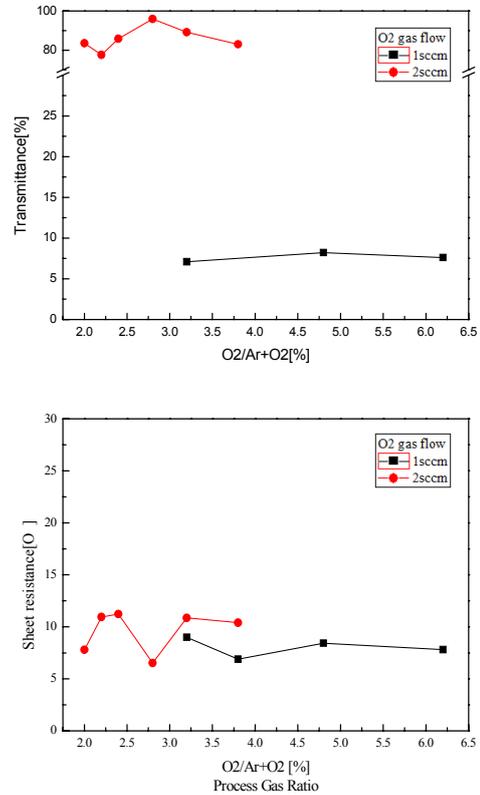


그림 3 반응가스 유량과 비율에 따른 WO<sub>3</sub>/Ag/WO<sub>3</sub> 다층막의 투과율 및 면저항  
Fig. 3 Transmittance and sheet resistance of WO<sub>3</sub>/Ag/WO<sub>3</sub> multilayer film with the process gas flow ratio

### 3.3 Ag 두께에 따른 WO<sub>3</sub>/Ag/WO<sub>3</sub> 다층막의 전기적 광학적 특성

그림 4는 이전 실험을 통하여 결정된 O<sub>2</sub> 유량과 비율로 Ag 박막시 공정 시간을 통해 두께를 변경하여 면저항을 측정된 결과를 나타내었다. Ag의 증착시간을 25~40sec로 변경하였다. Ag를 25sec 증착하였을 때 20Ω/□ 이상의 면저항을 보여주었고, 그 이상의 증착시간을 통해 Ag의 두께를 증가하였을 경우 면저항이 7Ω/□ 이하로 측정되었다. 이는 Ag가 증착 초기에는 단절된 클러스터가 형성이 되는 시기로 면저항이 그래프에서 예상된 값보다 크게 나타났고 증착 시간이 늘면서 단절되었던 클러스터가 연결되어 금속 본래의 면저항을 가진 것으로 나타낸다. 그리고 Ag는 금속 박막이기에 두께가 두꺼워질수록 면저항은 낮아지지만, 투명도가 떨어지고 반사율이 증가하기에 두께는 얇을수록 광학적 특성이 높다. 따라서 Ag의 박막 공정시간을 30sec로 사용하였다[9].

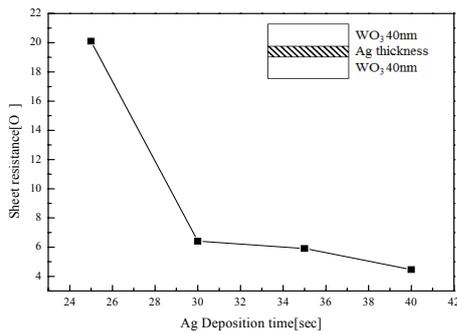


그림 4 Ag 두께에 따른 WO<sub>3</sub>/Ag/WO<sub>3</sub> 다층막의 면저항  
Fig. 4 Sheet resistance of WO<sub>3</sub>/Ag/WO<sub>3</sub> multilayer with Ag thickness

### 3.4 WO<sub>3</sub> 두께에 따른 WO<sub>3</sub>/Ag/WO<sub>3</sub> 다층막의 전기적 광학적 특성

그림 5는 WO<sub>3</sub> 박막시 공정 시간을 통해 두께를 변경하여 WO<sub>3</sub>/Ag/WO<sub>3</sub> 다층막의 투과율과 면저항을 측정된 결과를 나타내었다. WO<sub>3</sub>의 증착시간은 5.5~7.5min으로 변경하였다. 전기적 특성의 경우, 이론적으로는 두께가 두꺼울수록 면저항이 낮아지지만 WO<sub>3</sub>/Ag/WO<sub>3</sub> 다층막의 경우, WO<sub>3</sub> 박막의 두께와는 무관하게 비슷한 면저항 값이 측정된 것을 알 수 있다. 광학적 특성의 경우, 전체적으로 85% 이상의 투과율을 보여주었다. 다층구조에서의 광학적 원리는 굴절률이 서로 다른 매체 사이에서 반사광의 위상변화로 반사율은 감소하고 투과율은 증침효과로 인해 증가하게 되면서 각각의 박막 두께와 굴절률이 반사율과 투과도를 결정한다. 그러므로 투과율 그래프를 통해 전체적으로 높은 투과율을 보여주지만 그 중 WO<sub>3</sub> 박막 공정시간을 6.5min으로 하였을 경우 가장 투과율이 좋은 약 93% 이상을 보여주어 이 때의 각 박막의 두께가 높은 투과율로 평가하였다. 실험을 통해 Ag 30sec로 증착하였을 때 가장 높은 투과율을 보여주기 위한 WO<sub>3</sub>의 증착시간은 6.5min인 것을 알 수 있으며 면저항의 경우에는 WO<sub>3</sub>의 두께 보다 Ag 두께에 의해 결정되는 것을 알 수 있다. 그림 6은 앞에서 실험을 통해 얻은 최적 조건으로 증착된 WO<sub>3</sub>/Ag/WO<sub>3</sub> 다층막의 두께는 SEM을 이용해 측정하여 전체 두께는 약 90nm이며 WO<sub>3</sub>의 두께는 약 40nm이고 Ag의 두께는 약 10nm인 것을 나타내었다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 기존 디스플레이에서 사용되는 투명전극을 대체하기 위한 실험으로 RF 마그네트론 스퍼터링 박막 방법으로 WO<sub>3</sub>/Ag/WO<sub>3</sub> 다층막을 제작하기 위하여 WO<sub>3</sub> 단층 박막으로부터 광학적 특성에 대한 최적의 공정 조건을 도출하고 WO<sub>3</sub>/Ag/WO<sub>3</sub> 다층막도 동일한 조건에서 제작한 후 각각의 박막을 변화시켜 전기·광학적 특성을 비교하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) WO<sub>3</sub> 단층 박막은 반응가스인 Ar과 O<sub>2</sub> 비율이

70sccm/2sccm에서 최적의 균일한 투과율을 나타내었고, 이때 투과율은 가시광선영역인 380nm에서 780nm까지 평균하여 약 80% 이상의 투과율을 보였다.

(2) WO<sub>3</sub>/Ag/WO<sub>3</sub> 다층막은 실험 1과 동일한 결과로 비율이 Ar 70sccm/O<sub>2</sub> 2sccm에서 최적의 전기·광학적 특성을 나타내었고, 이때 가시광선 영역 중 550nm 파장에서 약 93%이상의 투과율과 380nm~780nm까지 평균하여 약 90% 내외의 투과율을 보였으며 6.52Ω/□의 면저항을 보였다.

(3) 제작하는 WO<sub>3</sub>/Ag/WO<sub>3</sub> 다층막에서 Ag의 증착시간을 변경하여 공정시간이 길수록 두께가 두꺼워지면서 면저항은 감소하지만 반사율과 투과율 또한 감소하여 광학적 특성을 향상하기 위해 두께가 얇으면서 낮은 면저항을 갖도록 Ag의 증착시간을 30sec로 정하였으며, 이때 6.41Ω/□의 면저항을 보였다.

(4) 실험 3을 통해 Ag의 두께가 고정된 상태로 WO<sub>3</sub>/Ag/WO<sub>3</sub> 다층막에서 WO<sub>3</sub>의 증착시간이 6.5min에서 최적의 투과율을 나타내었고, 이때 면저항은 약 6.41Ω/□의 면저항을 이며, WO<sub>3</sub>/Ag/WO<sub>3</sub> 다층막의 면저항은 Ag의 두께에 의해 결정되는 것을 보였다. 이로써 최적의 공정 조건 및 박막 특성을 이용하여 결정된 각각의 박막 두께는 WO<sub>3</sub>의 두께는 약 40nm, Ag의 두께는 약 10nm인 것을 보였다.

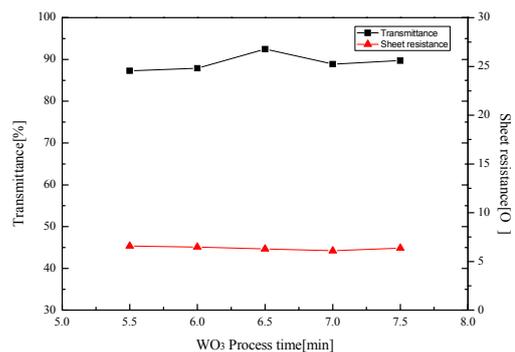


그림 5 WO<sub>3</sub> 두께에 따른 WO<sub>3</sub>/Ag/WO<sub>3</sub> 다층막의 투과율과 면저항  
Fig. 5 Transmittance and sheet resistance of WO<sub>3</sub>/Ag/WO<sub>3</sub> multilayer with WO<sub>3</sub> thickness

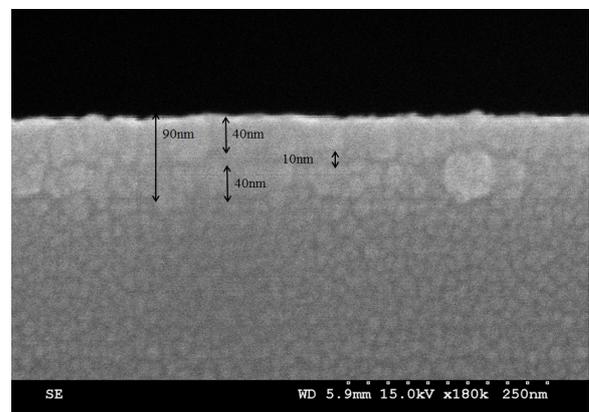


그림 6 WO<sub>3</sub>/Ag/WO<sub>3</sub> 다층막의 두께  
Fig. 6 The thickness of WO<sub>3</sub>/Ag/WO<sub>3</sub> multilayer film

References

- [1] Jong-Woo Lee, et. al., "Flexivle Diplay 용 유기 투명 전극 필름", 물리학과 첨단기술, July/August, 2005
- [2] "투명전극 기술동향 및 시장전망 2013", Displaybank, 2013
- [3] Kang-Min Jeon, "A Study on Solution-Processed WO<sub>3</sub>/Ag/WO<sub>3</sub> Multilayer Transparent Electrode for Organic Light-Emitting Diodes", Korea Advanced Institute of Science and Technology, 2012
- [4] H A Macleod, "Thin film optical filters", Institute of Physics Publishing Bristol an Philadelphia, 1986
- [5] Jin-Hyung An, et. al., "Influence of Ag Thickness on Electrical and Optical Properties of AZO/Ag/AZO Multi-layer Thin Films by RF Magnetron Sputtering", Journal of The Korean Institute of Surface Engineering, Vol. 39, No. 1, 2006.
- [6] Moon Hyun Chung, et. al., "Materials and Characteristics of Emerging Transparent Electrodes", Appl. Chem. Eng., Vol. 25, No. 3, 2014.
- [7] Kihyon Hong, et. al., "Optical Properties of WO<sub>3</sub>/Ag/WO<sub>3</sub> Multilayer As Transparent Cathode in Top-Emitting Organic Light Emitting Diodes", J. Phys. Chem. 2011
- [9] Jin-A. Jeong, et. al., "Effect of Ag interlayer on the optical and passivation properties of flexibleand transparent Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> multilayer", APPLIED PHYSICS LETTERS 93, 2008



**권 홍 규(Hong-Kyu Kwon)**

1967년 03월20일생. 1995년 08월 동국대학교 산업공학과 졸업. 1998년 08월 University of Southern California 산업시스템공학과 대학원 졸업(석사). 2002년 08월 University of Southern California 산업시스템공학과 대학원 졸업(박사). 2002년 08월~2005년 05월 LG전자 생산기술원 책임연구원. 2006년 03월~2007년 08월 한국교통대학교 산업경영공학과 겸임교수. 2007년 09월~현재 남서울대학교 산업경영공학과 교수로 재직 중임.  
E-mail : hongkyuk@nsu.ac.kr



**신 백 균(Paik-Kyun Shin)**

1990년 인하대 전기공학과 졸업(학사), 1992년 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2000년 독일 Friedrich-Alexander-UniversitaetErlangen-Nuernberg 대학원 전기공학부 졸업(박사), 1992년~2000년 독일 Fraunhofer Inst. of Integrated Systems & Device Tech. (FhG- IISB) 객원연구원, 2002년~2004년 일본 Kuma moto Univ. 외 국인방문연구원, 2004년~현재 인하대 전기공학과 교수, 2008년~2010년 인하대IT공과대학 부학장.  
Tel : (032) 860-7402  
Fax : (041) 863-5822  
E-mail : shinsensor@inha.ac.kr

저 자 소 개



**강 동 수(Dong-Soo Kang)**

2014년 남서울대 전자공학과 졸업, 인하대 대학원 전기공학과 석사과정.  
Tel : (032) 860-7393  
Fax : (032) 863-5822  
E-mail : call0105@naver.com



**이 봉 주(Boong-Joo Lee)**

1996년 인하대 전기공학과 졸업(학사), 1998년 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2003년 인하대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2004년~2007년 LG전자 디지털디스플레이 연구소 선임연구원, 2007년~현재 남서울대 전자공학과 교수.  
Tel : (041) 580-2702  
Fax : (041) 580-2902  
E-mail : bjlee@nsu.ac.kr