

# 버퍼 층을 이용한 RF 마그네트론 스퍼터 방법에 의한 Al:ZnO 박막의 성장

노영수<sup>a,b</sup> · 박동희<sup>a</sup> · 김태환<sup>b</sup> · 최지원<sup>a</sup> · 최원국<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>한국과학기술연구원, 서울 136-791

<sup>b</sup>한양대학교 전자전기컴퓨터공학부, 서울 133-791

(2009년 4월 6일 받음, 2009년 5월 20일 수정, 2009년 5월 20일 확정)

Al이 도핑된 투명 전도성 Al:ZnO (AZO) 박막에 대한 RF magnetron sputtering 증착 법을 이용한 저온 최적공정조건을 연구하였다. 투명전극 재료로서의 AZO 박막의 전기적, 결정학적 물성을 최대한 향상시키기 위해서, in-situ 상태에서 유리기판상에 최적화된 증착 조건의 AZO 버퍼 층을 삽입하는 이중박막 구조를 제작하였다. RF 인가 전력 50~60 W에서 증착된 버퍼층 위에 120 W의 RF 전력에서 성장한 AZO 박막의 경우, 비저항  $3.9 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ , 전하 캐리어농도  $1.22 \times 10^{21}/\text{cm}^3$ , 홀 이동도  $9.9 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 의 전기적 특성을 보였다. 이러한 결과는 버퍼 층이 없는 기존의 단일 구조와 비슷하나, 전기적 비저항 특성을 약 30% 정도 향상시킬 수 있었으며, 전기적 특성의 향상 원인을  $\text{Ar}^+$  이온의 입사 에너지의 변화에 따른 버퍼 층의 압축응력과 결정화 정도와의 의존성으로 설명하였다.

주제어 : Al:ZnO, 비저항, 투명전극, RF 마그네트론 스퍼터링, 버퍼층, 압축 응력

## I. 서 론

투명 전극 재료는 액정 결정, 플라즈마 방전 및 유기 광전 다이오드 평판 디스플레이 및 태양전지 등의 소자에서 투명전극으로 사용되고 있는 물질을 통칭하며, 가시 광 영역 (400nm~700nm)에서 80% 정도의 광투과도를 가지며  $\sim 10^{-3} \Omega\text{cm}$  이하의 낮은 비저항을 가지는 재료여야 한다. 광학적 밴드 갭은 3.1 eV 이상으로 자외선영역은 모두 투과시키고 적외선영역의 높은 반사율, 적절한 에칭 특성을 가지고 있어야 한다. Sn이 첨가된 Sn:In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(ITO)이 가장 대표적인 재료로서 현재까지 광범위하게 사용되고 있으나, In희귀 금속의 고갈로 인한 가격의 급등, In 확산에 한 소자의 열화, 수소 플라즈마를 이용한 에칭시 In, Sn의 높은 환원성 등이 문제점으로 대두되어 오고 있다. 친환경적이며 단가가 싼 ZnO계열의 재료가 대체 물질로 많은 연구가 이루어지고 있다 [1-3]. ZnO는 3.4 eV 근처의 밴드 갭을 갖는 전형적인 n-형 반도체로서 광전 소자로 사용하기 위한 투명전도 물질로 많은 장점을 가지고 있다. ZnO 박막은 도핑이 용이하여 좁은 전도대역을 가지기 때문에 도핑물질에 따라 전기 광학적 성질의 조절이 용이하다. 이 중

Al:ZnO는 Ga, In이 첨가된 ZnO에 비하여 높은 전기 전도도를 가지는 박막 형태로 제작이 가능한 최적의 물질로 알려지고 있어서 평판디스플레이, 태양전지용 투명 전극, static discharge dissipation, RF 전자파 차폐, 터치 패널 전극 등의 새로운 재료로 각광받고 있고 특히 12  $\mu\text{m}$  파장 영역 대까지 70% 이상의 광투과도를 유지함으로써 2  $\mu\text{m}$  파장 영역에 머무르는 ITO에 비하여 적외선 영역에서의 투과 손실이 적은 특징을 가지고 있다. 한편 디바이스 제작 시 고려되어야 할 습식 에칭 특징으로 약산(0.2% HNO<sub>3</sub>, 상온) 에칭 특성이 우수하며 굴절률이  $n=1.9\sim 2.0$  정도로 ITO의 값과 거의 일치하는 우수한 특성을 가지고 있다 [4-9]. ITO박막의 경우 일반적으로 유리 기판 위에 (기판 온도: 200°C) 제작될 때  $1 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$  이하의 낮은 전기 저항을 보이는 것이 많이 발표되었다 [10,11]. 이에 비하여 Al:ZnO의 경우 현재까지 PLD로 제작된 경우 비저항 값이  $8.5 \times 10^{-5} \Omega\text{cm}$ , 그리고 RF magnetron 법으로 제작된 경우  $p=2.5 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ 이 가장 특성이 우수한 것으로 보고 있다 [12,13]. 본 연구에서는 RF 마그네트론 스퍼터링을 이용하여 낮은 비저항을 가지는 증착조건을 설정하기 위하여, 플라즈마 가스 작동 압력, 기판-타겟간 거리 및 인

\* [전자우편] wkchoi@kist.re.kr

가 전력을 변화해 가면서 버퍼 층을 이용한 2-STEP박막 제작 등을 통하여 AZO박막의 최적화 증착 조건을 알아 보았다.

## II. 실험 방법

### 1. AZO 박막의 증착

Al이 도핑된 ZnO 박막은 glass기판 (Corning 1737)위에 RF 마그네트론 스퍼터링을 이용하여 증착하였다. 타겟으로는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>이 2wt% 함유된 순도 99.99%의 Al:ZnO 상용 2인치 세라믹 타겟(Applied Material Co.)을 사용하였다. 기판의 크기는 10×10 mm<sup>2</sup>의 크기로 절단하여, 증착하기 전에 아세톤-에탄올 용액 순으로 초음파를 이용하여 세척하였고, 증류수로 10분 간 초음파 세척기에 담근 후 질소가스 분위기에서 증착 진공조 내의 기판 홀더에 장착하였다. 박막 증착시 기판 온도는 할로겐 히터를 사용하여 200℃로 고정하였다. 스퍼터용 플라즈마 가스로는 아르곤 (99.999%)만을 사용하였으며, 작동 압력을 0.9~6.0×10<sup>-3</sup> torr범위에서 조절하였다. 스퍼터 타겟은 기판의 아래쪽에 위치하는 상향식 증착 방식을 사용하였다. 버퍼층의 최적 조건을 구하기 위해서 기판과의 거리는 40 mm에서 70 mm범위 안에서 변화시켰으며, RF 인가 전력은 30~100 W로 변형시키면서 증착하였다. AZO 박막은 기판과의 거리 40mm로 고정 하였으며, 작동압력은 5.0×10<sup>-3</sup> torr에서 RF 인가전력 50~150 W로 변형시키면서 증착하였다.

### 2. AZO박막 물성의 측정

전기 비저항 ( $\rho$ ) 과 이동도 ( $m$ ) 는 전류 source meter (Keithely 220) 및 pico-voltmeter (Keithely 485)를 이용하여 Van der Pauw 방법으로 측정하였으며, 전기 비저항은 4-probe tester로 측정하여 비교하였다. 박막의 광학적 조사는 UV-Vis 스펙트로미터 (Lambda-18)을 이용하여 200-800 nm구간에서 광투과도를 측정하였다. 증착된 버퍼층과 AZO박막의 결정 구조는 박막의 결정구조 조사는 X-ray diffraction (M18XHF-SRA, Mac Science, Japan)를 이용하여 RF 전력 인가에 따른 결정 구조와 결정화도를 측정하였다. 또한 표면 구조와 거칠기를 분석하기 위해서

Atomic force microscope (D/Max -3000, Veeco)를 사용하였다.

## III. 실험 결과

낮은 전기저항을 보이는 AZO박막의 성형을 위하여 RF 스퍼터링법에 의한 박막 증착시 크게 영향을 주고 있는 RF 인가 전력과 아르곤 가스 분압에 따른 공정 조건을 알아 보았으며, 이 때 AZO 박막의 두께를 200 nm 정도로 고정하였다. Ar스퍼터 용 플라즈마 가스의 압력은 플라즈마가 안정적으로 형성되는 최소 증착 압력인 1mTorr, 그리고 타겟과 기판사이의 거리는 6 cm에 고정시키고, RF인가 전력을 50W에서 140 W 로 변화 시켜보았다. Fig. 1(a)에서 보듯이 증착된 AZO박막의 저항은 RF 전력 50W시 (전력밀도: 2.5 W/cm<sup>2</sup>) 약 4 k $\Omega$  정도를 보이다가 70 W에서는 12 k $\Omega$  까지 증가하여 최대값을 보이다가 120 W (전력밀도: 7 W/cm<sup>2</sup>)에서는 다시 1.5 k $\Omega$  정도의 최소값을 보였으며 그 이상의 전력에서는 다시 증가하는 추세를 보여주고 있다.

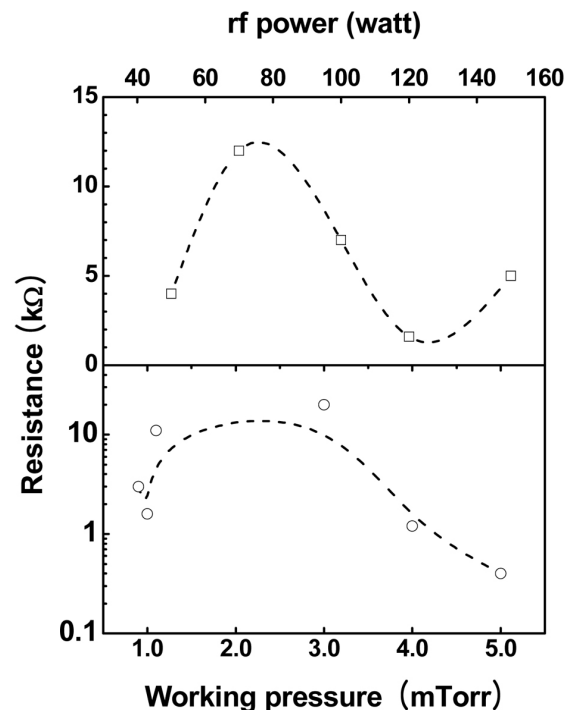


Figure 1. Variations of resistance of Al:ZnO thin films deposited by RF magnetron sputtering method as a function of working pressure and RF power.

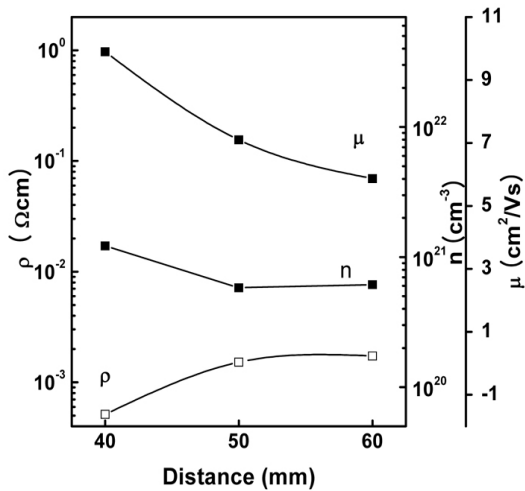
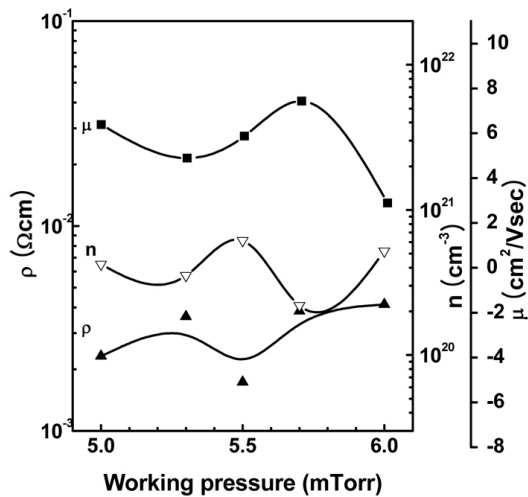


Figure 2. Electrical properties of Al:ZnO thin films deposited on glass substrate with the variations of working pressure and sputter target-substrate distance.

한편 120 W 전력 인가시 작동 압력에 따른 전기 저항의 변화를 알아보기 위하여 Ar가스의 압력을 0.9m Torr에서 5 mTorr까지 변화 시켰다. 0.9-1.1 mTorr영역에서 저항 값이 3 k $\Omega$ , 1.6 k $\Omega$ , 그리고 3 k $\Omega$  까지 많은 변화를 보여주고 있어서 Ar가스의 양에 매우 민감한 것으로 관측되었다. 한편 3 mTorr에서 20 k $\Omega$  정도로 높은 최대값을 보이다가 5 mTorr에서 0.4 k $\Omega$  ( $8 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ )까지 급격히 감소함을 알 수 있었다.

좀 더 최적의 성형 조건을 알기 위하여 작동 압력과 타겟-기판간의 거리를 변화시켜보았고, Fig. 2(a)와 같이 가스 분압을 5-6 mTorr 영역에서 세분하여 성장된 AZO의 전기 비저항을 측정하였다. Ar작동 압력 5.5 mTorr에서  $\rho =$

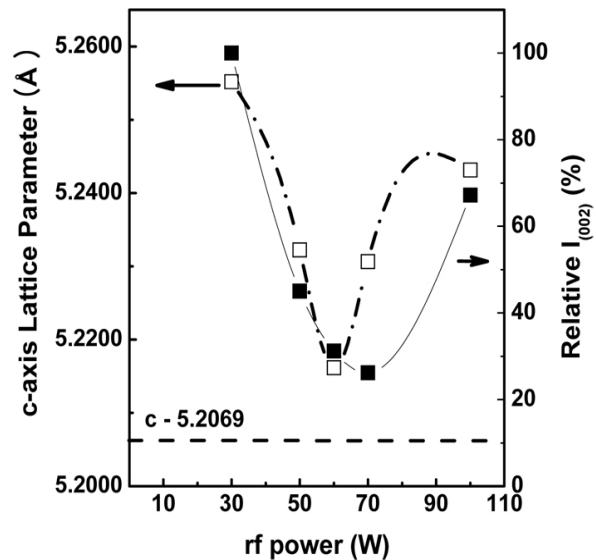
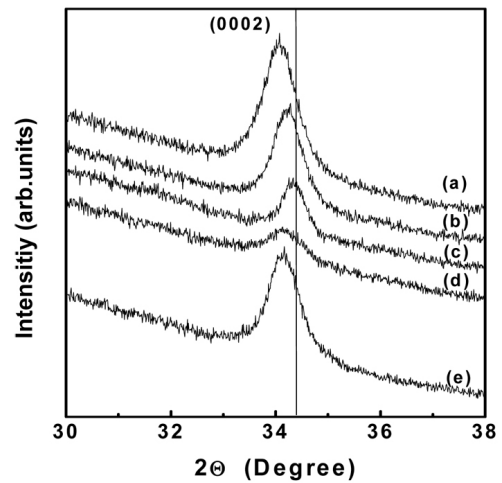


Figure 3. X-ray diffraction patterns of Al:ZnO buffer layer deposited at RF discharge powers (a) 30, (b) 50 (c) 60 (d) 70, and (e) 100 W.

$1.7 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$  정도로 5 mTorr와 6 mTorr에서 제작된 AZO박막의  $2.3 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$ ,  $4 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$ 의 값에 비하여 낮은 값을 보여주고 있다. 5.5 mTorr의 작동 압력하에서 기판-타겟 간의 거리는 Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 거리가 줄어들수록 전기 비저항이 감소하였고, 플라즈마가 안정적으로 유지되는 최소 거리인 4 cm에서는  $5 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ 까지 급격히 감소함을 알 수 있었다.

Fig. 3은 RF 파워별에 따른 버퍼층(20 nm)의 XRD 피크 변화와 결정화도를 나타낸 그림이다. 모든 버퍼층의 X-선 회절 실험에서 ZnO (002) 피크만이 관측되었으며 이로부터 모두 c-축 배향성을 가지고 성장하였음을 알 수 있다.

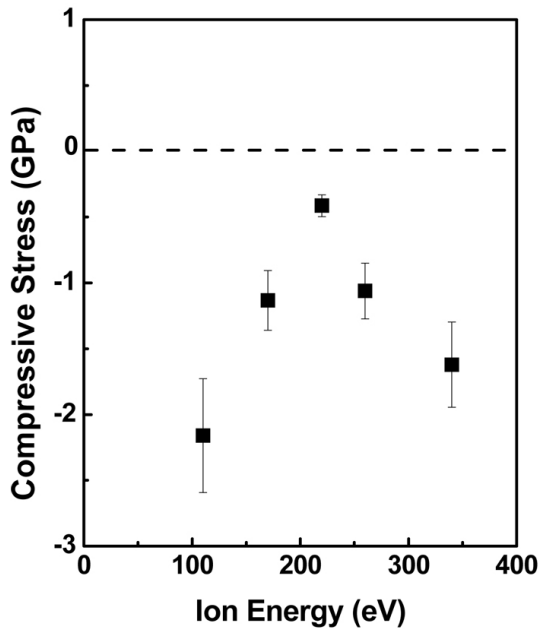


Figure 4. Change of residual stress of buffer layer at various Ar<sup>+</sup>ion energy estimated by thermalization model [16].

ZnO(002)의 피크 위치와 강도의 변화에서 c-축 격자 상수 값을 알 수 있으며, 결정화도를 예측할 수 있다. ZnO(002) 피크의 위치는 모두 벌크 ZnO 에서 관측되는 2θ=34.47° (JCPDS 36-1451) 에 비하여 낮은 각도에서 관측되어서 벌크의 c-축 격자상수 (5.2069 Å)에 비하여 큰 값들을 가지게 되고, 30 W에서는 c=5.2551 Å이고 60 W에서는 5.2161 Å까지 감소하여 벌크 값에 접근하고 있음을 알 수 있고 다시 인가 전력이 증가함에 따라 그 값이 증가됨을 알 수 있다. Fig. 3(b)에서 측정된 XRD 패턴으로부터 ZnO (002) 피크의 면적 비를 통해 결정화도를 상대적으로 비교하여 보았고, 30W에서 보여주는 XRD (002)피크의 면적이 가장 커서 이를 기준 (100%)으로 하였다. RF 인가 전력이 커짐에 따라 결정화도는 점점 감소하며 50 W에서는 약 45%, 70 W에서는 가장 작은 결정화도(26%)를 보이다가 100 W에서 성장한 버퍼층의 경우 다시 결정화도가 67%까지 증가하는 것을 보여 주고 있다. 이상 에서 보면 인가 전력에 따라, 70 W를 제외하고는 c축 격자 상수의 감소와 결정화도가 거의 비슷한 양상으로 변화해 가고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 30 W-100W에서 성장된 AZO 버퍼층들은 모두 압축응력 (compressive stress)를 받고 있음을 알 수 있다. Fig. 4는 기판에 도달하는 Ar 이온 에너지 변화에 따른 버퍼층의 잔류 응력 (residual

Table 1. Thermalization 효과를 고려한 Ar<sup>+</sup>이온의 기판 근처 입사시 예상되는 입사에너지

RF power (W)	DC bias (V)	Ar <sup>+</sup> Ion energy	Ar pressure (Pa)	Distance (cm)
30	-171	110	0.773	4
50	-190	170	0.773	4
60	-250	220	0.773	4
70	-288	260	0.773	4
100	-358	340	0.773	4

stress)의 변화를 나타낸 그림이다. 기판에 도달하는 Ar 이온의 에너지는 타겟에 인가되는 음 전압에 타겟 표면으로 가속되었다가, 되 튀기는 Ar<sup>+</sup>이온 입자들을 식(1)과 같이 스퍼터링시 Ar 가스의 작동압력 (P<sub>Ar</sub>:Pa), 기판과 타겟간의 거리 (ℓ)와 Meyer등 [16]의 비탄성 충돌에 의한 열화 과정 (thermalization process)을 고려하여 예측하였다.

$$\ell n \frac{E_i}{E_f} = 1 - \frac{(M-1)^2}{2M} \ell n \frac{M+1}{M-1}, \left( n = \frac{\ell P_{Ar} S}{K_b T_G} \right) \quad (1)$$

E<sub>i</sub>/E<sub>f</sub>는 충돌전과 충돌의 후의 에너지, n 은 Ar 이온과 타겟 원자와의 충돌 수, M은 Ar과 타겟 원자와 질량비이며, K<sub>b</sub>는 Boltzman 상수, T<sub>G</sub>는 스퍼터링 가스 온도를 말하며 Table 1은 (1)식으로부터 구한 인가 전력, 작동 압력에 따른 이온들의 기판 도달 시 예상 에너지이다.

박막내의 잔류응력은 이축 변형 모델 (biaxial strain model)을 기반으로 계산하였다 [14]. XRD측정에서 보여지는 기판 표면에 대하여 수직으로 성장한 면, 다시 말해서 c축 방향으로의 변형, ε=(C<sub>film</sub>-C<sub>bulk</sub>)/C<sub>bulk</sub>이다. 우선 박막의 표면에서 평행한 박막의 응력 (stress) 구하기 위해서는 육방 정형계에 유효한 아래의 식(2)을 사용하였다.

$$\sigma_{film}^{xRD} = \frac{2c_{13}^2 - c_{33}(c_{11} + c_{12})}{2c_{12}} \cdot \frac{c_{film} - c_{bulk}}{c_{bulk}} \quad (2)$$

특정 변수의 값은 단결정 ZnO의 탄성 계수 데이터(C<sub>11</sub>=208.8, C<sub>33</sub>=213.8, C<sub>12</sub>=119.7, C<sub>13</sub>=104.2GPa)를 사용하였다 [15]. 일반적으로 박막의 잔류 응력은 대표적으로 박막과 기판과의 사이에서 생기는 격자의 부정합과 기판과 증착물질의 열팽창 계수의 차이에 의한 변화, 두 가지 영향에 의해 일어난다. 우선 유리기판 (a<sub>glass</sub>=9×10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>)과 ZnO

( $a_{ZnO}=4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )의 열팽창 계수에 의해 생성되는 잔류 응력값( $< 5 \times 10^{-4}$ )은 측정된 값에 비해 현저히 작으며, 또한 본 실험에서는 고정된 실험 온도에 의해서 증착된 박막이므로, 측정된 박막의 잔류응력 값은 대체적으로 박막성장 시 형성되는 것으로 생각된다. Fig. 4의 결과를 보면 기판에 도달하는 Ar이온의 입사 에너지가 110 eV에서는 약 2.3 GPa 정도의 압축응력을 받다가, 입사 에너지가 증가함에 따라 감소하여 220 eV에서는 0.4 GPa까지 감소하여 최소값을 보이고 다시 증가함을 보여 주고 있다. Davis 등 [16–18]에 의하면, 스퍼터링 과정시 이온 충돌(bombardment)에 의해 증착되는 박막에 작용하는 압축응력은 스퍼터링 이온 에너지가 커짐에 따라 증가하여 최대응력을 보이다가, 이온 입사 에너지가 더 증가하게 되면 압축응력이 감소하면서 일정한 값으로 유지되는 실험 결과를 보고하고 있다. 최대 응력을 나타내는 이온의 에너지 값은 상대적인  $R/j$  ( $R$ : 증착 원자선속,  $j$ : 이온 조사 선속)하며 의존하는 일반적으로 이 값이 작을수록 박막내의 압축 응력의 최대 값이 작은 입사 이온 에너지 부근에서 관측되며 그 최대값의 크기도 커지는 것이 보고되고 있다 [19].

압축응력의 증가는 이온 주입현상으로 인해 박막내에서 이온에 의해 주입된 에너지를 가지는 원자들의 변형(strain) 에너지가 주원인이며, 입사 이온의 에너지가 증가되면 박막 내로 입사되는 원자들의 에너지도 증가하고 이러한 원자들은 박막을 구성하는 원자들과 collision cascade을 유도하여 결과적으로 박막내의 압축 응력이 급격히 감소하게 된다. 본 연구의 경우 AZO 버퍼층의 잔류 응력은 입사에너지가 110 eV 일 때 최대값을 보이고, 220 eV 부근에서 최소값까지 감소하나 그 이상의 이온 에너지에서 다시 잔류 응력 값이 증가하는 것을 보여주고 있다. 이러한 현상은 버퍼층의 두께를 20 nm 로 한정하였기 때문에, 입사 이온의 에너지가 증가함에 따른 collision cascade 영역이 한정되어 압축 응력이 감소되지 않고 있음을 예상할 수 있어, 이온 입사 에너지에 따른 압축 응력의 변화가 두께에도 민감하게 영향 받고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 RF 파워별에 따른 버퍼층의 결정자(crystallite) 변화와 표면 거칠기를 보여주고 있다. RF 파워에 따른 버퍼층의 표면 거칠기는 모두 1 nm대 영역에서 나타나고 있으며, 50 W에서 성장한 버퍼층이 0.37 nm의 가장 낮은 거칠기를 보여 주고 있다. 결정자의 크기는 Fig. 2(a)에서 Scherrer 식(3)에 의하여 예측하여 보면,

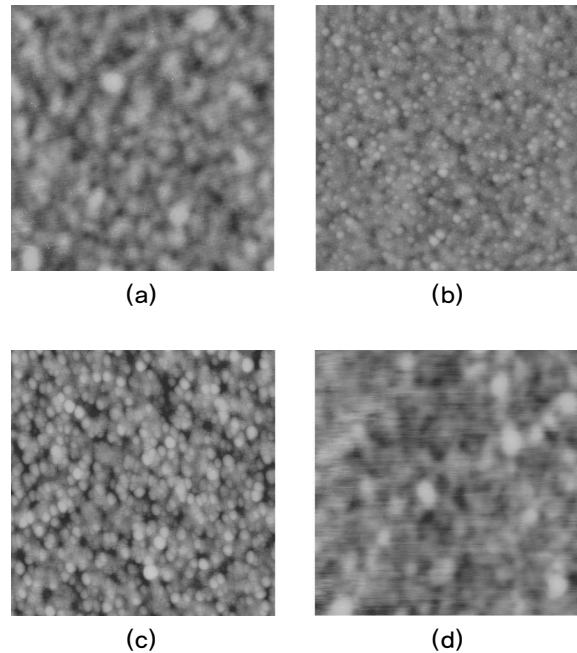


Figure 5. Atomic force microscope (AFM) images and root-mean-square values of surface roughness ( $\sigma$ ) of AZO buffer layers deposited at the variations of RF power (a) 30 W ( $\sigma = 0.52$  nm), (b) 50 W ( $\sigma = 0.37$  nm), (c) 70 W ( $\sigma = 0.68$  nm), and (d) 100 W ( $\sigma = 0.57$  nm).

$$d = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (3)$$

여기서  $D$ 는 결정자의 크기(nm)이고,  $\beta$ 는 결정자 크기에 의한 회절선 폭(rad)을 말하며,  $K$ 는 상수로서, 회절폭을 반가폭으로 사용시에는 0.9이다. 각각 결정자의 크기는 9.4, 13.4, 10.2, 13.6 nm이고, Fig. 5에서 보는 바와 같이 전력 인가에 따른 결정자의 크기가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6는 RF 파워 별에 따라 증착된 버퍼 층위에 RF 인가 전력 120 W에서 성장한 박막의 XRD 을 보여주고 있다. 본 그림에서는 일반적으로 ZnO(002)의 XRD 피크가 대부분 강하게 나타내고 있으며, 그 중 특이하게 50 W버퍼층 위와 버퍼층이 없이 증착한 AZO박막에서는 (100), (101), (102) 같은 부 피크(sub peaks) 들이 작은 세기로 나타나고 있다.

유리 기판 위에 성장하는 ZnO 박막의 대한 연구에 의하면 박막의 두께가 증가함에 따라 ZnO(002)와 관련한 주 피크 이외에 (100), (101), (102) 결정면과 관련한 부 피크들이 관찰되는 것으로 알려지고 있다. 이에 비하여 Al이 도핑된 ZnO

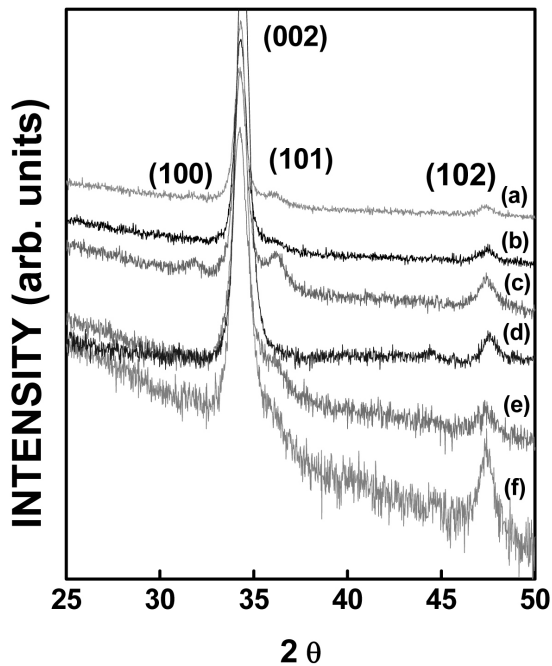


Figure 6. XRD diffraction patterns of AZO thin film deposited on buffer layer with variation of RF discharge power (a) No buffer, (b) 30, (c) 50, (d) 60, (e) 70 and (e) 100 W.

박막의 경우 Al이 Zn를 치환하게 되고 Al(0.5358Å)과 Zn(0.73Å)의 이온반경 크기 차이로 인하여 박막의 두께가 증가하여도 AZO(002) 주 피크 이외의 다른 부 피크들의 형성이 어려운 것으로 알려지고 있다 [20]. 본 연구의 경우 50 W로 성장된 버퍼층위에 120 W에서 증착된 AZO박막의 경우 다른 조건에서 성장된 버퍼층위에서 성장한 AZO박막에 비하여 Al 도핑되지 않은 경우에서 관측되거나 보고되었던 성장 형태를 보여주고 있는 것이 매우 흥미로운 결과이다.

Fig. 7은 Fig. 6의 조건에서 성장된 AZO박막의 전기적 특성을 보여주는 그림이다. 버퍼층 없이 성장한 AZO박막의 비저항은  $6.6 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$  정도의 비교적 낮은 비저항값을 보여주고 있다. 이에 비하여 버퍼층위에 성장한 AZO박막의 경우 버퍼층에 따라 비저항의 변화를 보여주고 있는데 30W 버퍼층을 사용한 경우  $5.4 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ 와 50W버퍼층의 경우  $3.9 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ 로 최소값을 보이며 비저항이 감소하다가, 70W와 100W버퍼층 위에 성장된 AZO의 경우 비저항이 약  $4 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$ 로 10배 정도 다시 급격히 증대함을 알 수 있다. 이로부터 20 nm의 얇은 버퍼층위에 두께 180 nm로 증착되어 총 200 nm두께로 성장된 AZO 박막의 경우 전기적인 성질이 대부분 180 nm로 버퍼층위에 증착

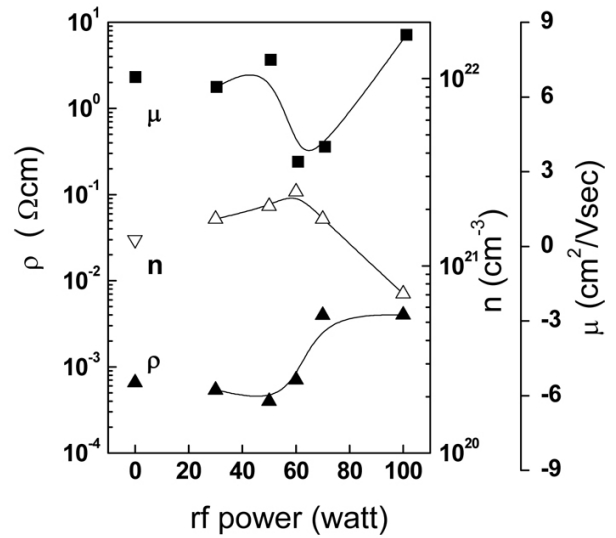


Figure 7. Electrical properties of AZO thin films deposited on buffer layer at various RF powers.

된 층에 의해 더욱 많은 영향을 받을 것은 당연하다. 따라서 같은 120 W, 같은 Ar압력하의 조건에서 증착된 AZO 박막의 비저항이 버퍼층에 대한 의존성이 높음을 알 수 있다.

스퍼터링 이온 에너지를 변화해가면서 버퍼층위에 증착된 박막의 비저항은 정성적으로 Fig. 3(b)와 Fig. 4로부터 압축응력 정도와 XRD 피크의 면적으로부터 계산된 상대적인 결정화 정도 값의 곱에 어느 정도 비례하는 것으로 보인다. 가장 낮은 비저항을 보이는 50, 60 W 버퍼층의 경우를 살펴보면, 60 W 버퍼층의 경우 상대적으로 낮은 결정화도(31%)를 보이지만 가장 낮은 압축응력(0.4 GPa)을 가지고 있으며, 50 W 버퍼층의 경우 압축응력이 1.13 GPa로 60W에 비하여 2.8배정도 크지만 상대적인 결정화도는 45%로 1.5배정도 우수한 것을 알 수 있다. 한편 70 W 버퍼층의 경우 50 W와 비슷한 1.06 GPa의 압축응력을 가지고 있으나 상대적인 결정화도가 26% 정도로 50 W의 50%정도 밖에 미치지 않고 있어서 비저항이 10배 정도 증가하는 결과로부터, 버퍼층의 압축응력과 결정화도가 모두 AZO 박막의 비저항에 영향을 미치는 주요한 영향인자이나 그 중 결정도가 더욱 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 ZnO:Al (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2wt%) 조성의 스퍼터링

타겟을 이용하여 Al이 도핑된 박막을 RF 마그네트론 스퍼터링 방법으로 증착하였다. AZO 박막의 증착 조건중 기판 온도를 고정시키고 각각의 Ar 분압비 및 RF 스퍼터링 출력 그리고 타겟과 기판과의 거리를 변화 시켜 전기적, 광학적 특성을 조사하여 최적의 AZO 박막 증착 조건을 구하였다. RF 파워 120W 그리고  $5.5 \times 10^{-3}$  torr에서 전기 비저항이 가장 작은 AZO 박막을 얻었으며, 이 중에서 타겟과 기판간의 거리가 40 mm인 AZO 박막의 경우 우수한 전기적 특성을 나타내었다. 또한 AZO 박막의 형성 공정 중에 약 20 nm정도의 버퍼층을 우선 증착하는 방식을 통해 제작된 AZO박막의 경우, 비저항이  $3.9 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ 로 향상되었다. 이로부터 AZO박막의 결정성과 초기 박막 형성 과정의 차이가 박막의 물성에 영향을 미치는 것을 알게 되었다. 보다 낮은 비저항값을 가지는 AZO박막의 성장을 위해서는 낮은 압축 응력과 높은 결정화도로 이루어진 버퍼층 위에 50-60 W, 즉 평균 Ar입사 에너지가 170 eV인 박막 성장 조건에 얻을 수 있음을 알 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 KIST Future Resource Program (2E21093) 과 지식경제부, 전략기술개발사업 (2M22030) 의 지원 하에 이루어졌음에 감사합니다.

## 참고문헌

- [1] D. G. Hwang, G. H. Band, and J. M. Myung, Bulletin of Korea Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, 15, 6, 35 (2002).
- [2] T. Minami, H. Sato, H. Nanto, and S. Takata, Jpn. J. Appl. Phys. **24**, L781 (1985).
- [3] Ch. Sujatha, G. Mohan Rao, and S. Uthanna, Matter Sci. Engin. **94**, 106 (2002).
- [4] W. J. Jeong and G. C. Park, Solar Energy Mater. Solar Cells 6538 (2001).
- [5] J. D. Lee and J. T. Song, 전기전자재료학회논문지 **9**, 2, 199 (1996).
- [6] 이승환, 성영권, 김종관, 전기전자재료학회논문지 **10**, 2, 128 (1997).
- [7] 최우성, 소병문, 홍진웅, 전기전자재료학회논문지 **9**, 6, 573 (1996).
- [8] 유동근, 김명화, 정성훈, 부진효 한국진공학회지, **17**, 1, 73 (2008).
- [9] 김희수, 한국진공학회지, **16**, 3, 205 (2007).
- [10] T. Minami, Thin Solid Films **516**, 5822 (2008).
- [11] U. S. Choi, B. M. So, and J. W. Hong, J. Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, **9**, 572 (1996).
- [12] Y. Igasaki and H. Kanma, Appl. Surf. Sci. **169**, 508 (2001).
- [13] H. Kim, A. Pique, and J. S. Horwitz, Appl. Phys. Lett. **74**, 3444 (1999).
- [14] A. Segm Üller and M. Murakami, in "Analytical Techniques for Thin Films", edited by K. N. Tu and R. Rosenberg (Academic Press, Inc., Boston, 1988) p. 143.
- [15] I. Broser, H. Nelkowsky, and G. Nimitz, in Semiconductors, Group III, Vol. 17 of Landolt-Börnstein, edited by O. Madelung, M. Schultz, and H. Weiss (Springer-Verlag, Berlin, 1982).
- [16] K. Meyer, I. K. Schuller, and C. M. Falco, J. Appl. Phys. **52**, 5803 (1981).
- [17] D. Dir, J. Vac. Sci. Technol. **A4**, 2954 (1986).
- [18] D. R. McKenzie, D. A. Muller, and B. A. Pailthorpe, Phys. Rev. Lett. **67**, 773 (1991).
- [19] C. A. Davis, Thin Solid Films **226**, 33 (1993).
- [20] R. Cebulla, R. Wendt, and K. Ellmer, J. Appl. Phys. **83**, 15 (1998).

## Characterization of Al-Doped ZnO Thin Film Grown on Buffer Layer with RF Magnetron Sputtering Method

Young-Soo No<sup>a,b</sup>, Dong-Hee Park<sup>a</sup>, Tae-Whan Kim<sup>b</sup>, Ji-Won Choi<sup>a</sup>, and Won-Kook Choi<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>*Thin Film Material Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791*

<sup>b</sup>*Department of Electronics and Computer Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791*

(Received April 6, 2009, Revised May 20, 2009, Accepted May 20, 2009)

The optimal condition of low temperature deposition of transparent conductive Al-doped zinc oxide (AZO) films is studied by RF magnetron sputtering method. To achieve enhanced electrical property and good crystallites quality, we tried to deposit on glass using a two-step growth process. This process was to deposit AZO buffer layer with optimal growth condition on glass in-situ state. The AZO film grown at rf 120 W on buffer layer prepared at RF 50-60 W shows the electrical resistivity  $3.9 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ , Carrier concentration  $1.22 \times 10^{21}/\text{cm}^3$ , and mobility  $9.9 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ . In these results, The crystallinity of AZO film on buffer layer was similar to that of AZO film on glass with no buffer layer but the electrical properties of the AZO film were 30% improved than that of the AZO film with no buffer layer. Therefore, the cause of enhanced electrical properties was explained to be dependent on degree of crystallization and on buffer layer's compressive stress by variation of  $\text{Ar}^+$  ion impinging energy.

Keywords : Al-ZnO, Resistivity, TCO, RF magnetron sputtering, Buffer layer, Residual stress

\* [E-mail] wkchoi@kist.re.kr