

Bias 전압에 따른 ZnO:Al 투명전도막의 전기적 특성

Substrate Bias Voltage Dependence of Electrical Properties for ZnO:Al Film by DC Magnetron Sputtering

박강일¹, 김병섭^{1,a}, 임동건², 이수호¹, 곽동주¹

(Kang-Il Park¹, Byung-Sub Kim^{1,a}, Dong-Gun Lim², Su-Ho Lee¹, and Dong-Joo Kwak¹)

Abstract

Recently zinc oxide(ZnO) has emerged as one of the most promising transparent conducting films with a strong demand of low cost and high performance optoelectronic devices. ZnO film has many advantages such as high chemical and mechanical stabilities, and abundance in nature. In this paper, in order to obtain the excellent transparent conducting film with low resistivity and high optical transmittance for Plasma Display Pannel(PDP), aluminium doped zinc oxide films were deposited on Corning glass substrate by dc magnetron sputtering method. The effects of the discharge power and doping amounts of Al₂O₃ on the electrical and optical properties were investigated experimentally. Particularly in order to lower the electrical resistivity, positive and negative bias voltages were applied on the substrate, and the effect of bias voltage on the electrical properties of ZnO:Al thin film were also studied and discussed. Films with lowest resistivity of $4.3 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$ and good transmittance of 91.46 % have been achieved for the films deposited at 1 mtorr, 400 °C, 40 W, Al content of 2 wt% with a substrate bias of +30 V for about 800 nm in film thickness.

Key Words : ZnO:Al film, DC magnetron sputtering, Resistivity, Transmittance, Bias voltage

1. 서론

투명전도막은 높은 전기전도특성과 가시광 영역에 대한 광 투과율이 우수해야 하며, 태양전지, 각종 평판 디스플레이, 센서 등의 다양한 분야에서 이용되고 있다. 현재 낮은 저항률을 장점으로 가지는 ITO 박막이 가장 널리 이용되고 있으나, 원료 물질인 In의 생산단가가 높고 플라즈마에 노출되는 경우 열화로 인한 특성변화가 커다란 문제점으로 지적되고 있다. 이에 반해 ZnO는 적외선 및 가

시광선 영역에서의 광 투과성이 우수하며 전기전도성과 플라즈마에 대한 내구성이 우수하고, 낮은 온도에서 공정이 가능하며 원료의 가격이 비교적 낮아서 ITO를 대체할 투명전도막 재료로 주목받고 있다[1].

ZnO 박막은 비화학양론적 결함구조, 넓은 band gap, 광학적 투광성 그리고 큰 압전상수 등의 특성으로 인하여 가스센서, micro-actuators, 투명전도막 등으로 응용되고 있으며, ZnO 박막의 실용화를 위해 ZnO 박막의 결정성, 광학적 특성 그리고 전기적 특성에 미치는 증착 조건에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[2-8]. 특히, ZnO는 II-VI족 화합물 반도체로서 상온에서 3.3 eV의 wide band gap을 갖는 직접 천이형 반도체로, 화학양론적인 조성을 갖는 벌크상태의 ZnO는 고저항체가 되는 데, 이를 박막화 시키는 과정에서 원자의 비율이

1. 경성대학교 전기전자공학과 (부산시 대연동 110-1)
2. 충주대학교 전자공학과
a. Corresponding Author : djkwak@star.ks.ac.kr
접수일자 : 2004. 3. 15
1차 심사 : 2004. 5. 4
심사완료 : 2004. 6. 7

1:1을 벗어나 비화학양론적인 구조를 가지고 성장하므로 Zn 침입형 원자나 산소공공과 같은 결함들을 결정 내에 포함하고 있으며, 이러한 결정결함들은 이온화 반응을 거쳐 전자를 생성하여 전기전도에 기여하게 된다.

필자들은 선행 연구 등을 통하여 ITO 박막을 대체할 투명전도막 재료로서의 ZnO 박막의 효용성을 평가하기 위하여, 광범위한 가스 압력 및 기판 온도 그리고 Al 도핑 농도의 변화에 대한 ZnO 박막의 전기 전도 메커니즘을 명확히 하였으며[9], 본 연구에서는 ZnO:Al 박막을 DC magnetron sputtering으로 제작, 평가하여 가시광 영역의 높은 광 투과율 및 전기 전도특성의 개선을 추구하였다. 즉, 박막의 전기·광학적 특성에 미치는 방전전력의 효과를 고찰하여, 박막성장 시 기판온도, 동작압력, Al 불순물의 도핑농도 및 방전전력 등 공정의 최적화를 추구하였다. 또한, 전기 저항특성을 한층 더 개선하고자 도출된 공정조건에서 기판에 positive 및 negative bias를 인가하였으며, 나아가 각각의 바이어스에 따른 저항특성개선의 메커니즘을 규명하고, ITO 박막을 대체할 투명전도막 재료로서의 효용성을 평가하고자 하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

진공조는 SUS304로 직경 270 mm, 높이 450 mm의 직원통의 형태이며, 방전중 진공조 내의 온도 상승을 억제하기 위하여 진공조를 수냉 하였다. 진공조는 로터리 펌프(Rotary Pump)와 유확산 펌프(Oil Diffusion Pump)를 사용하여 초기진공을 약 1×10^{-6} torr까지 배기한 후, Mass Flow Controller(MFC)로 아르곤가스를 주입하여 원하는 압력을 조절하였다. 동작 가스로는 순도 99.999 %의 아르곤 가스를 사용하였으며, 동작압력은 1 mtorr~20 mtorr의 범위였다. 전극의 구조는 평판형 마그네트론 방식이며, 타겟(target) 및 접지축전극은 모두 직경 3인치의 원형 전극이었다. 글로우 방전 및 박막 제작 실험을 위해 사용된 ZnO:Al 타겟은 순도 99.9 %의 Super Conductor Materials 사 제품으로 직경 3인치, 두께 1/4인치, ZnO와 Al₂O₃는 각각 99:1 wt%, 98:2 wt%, 97:3 wt%로 제작되었다. 기판으로는 Corning glass 1737을 유기세척법(아세톤, 메탄올, 증류수의 순서로 각각 10 분씩 초음파 세척을 한 후 질소로 건조)으로 세척

하여 사용하였으며, 전력분석기(Voltech, PM3300)를 통하여 원하는 전력의 조절이 가능하도록 하였다. 또한, 제작된 ZnO:Al 박막은 α -step(DEKTAK 3030), X-ray diffractometer(Rigaku Co., D/max 2100H, Japan), 4-point probe(CMT-ST1000), UV spectrophotometer(Hitachi Co. U-3000, Japan) 등의 장비를 사용하여 원하는 특성을 측정하고 평가하였다. α -step을 사용하여 증착조건에 따른 ZnO:Al 박막의 두께 및 증착률을 조사하였으며, X-ray diffractometer로 박막의 결정성 및 결정방향을 조사하기 위하여 20°~80° 범위의 회절각(2 θ)에서 X선 회절분석을 하였다. 저항률, 홀 이동도 및 캐리어 농도는 4-point probe 및 hall measurement system을 이용하여 측정하였으며, 광 투과도 및 광 흡수도 등과 같은 광 특성을 측정하기 위하여 UV spectrophotometer로 300 nm에서 800 nm의 파장범위까지 측정하였다. 본 연구에서는 선행 연구의 결과 가스압력 1mtorr 및 기판 온도 400 °C, 그리고 2 wt%의 도핑 농도 조건 하에서 최적의 비저항 특성 및 광학적 특성을 얻은 바 있어[11], 이러한 조건하에서 ZnO:Al 박막의 전기·광학적 특성에 미치는 방전전력의 효과를 우선 알아보았다. 즉, 본 연구에서는 20~60 W의 방전전력 범위의 증착조건을 가변하여 최적의 증착조건을 도출하고자 하였으며, 도출된 최적의 조건에서 박막의 특성을 한층 더 개선시키기 위하여 bias전압을 인가하였다. 기판 bias는 독립된 dc power supply로 공급하였으며, 공급전압은 -60~40 V의 범위였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 방전 전력의 변화에 따른 X선 회절분석의 결과를 나타내었다. 그림은 20~60 W의 전력범위에서 방전 전력의 크기에 관계없이 (002)면의 우선배향성을 보여주며, (002)회절피크에서의 2 θ 값은 standard ZnO crystal(34.45°)과 거의 일치하였다. 또한, 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 방전전력이 20~40 W 범위에서는 전력의 증가와 함께 (002)배향이 성장하다가 그 이상의 전력에서는 감소하는 경향을 보였다. 40 W 이하의 전력범위에서 전력의 증가에 따라 회절피크의 강도가 증가하는 것은 공급되는 전력의 증가로 타겟에 충돌하는 이온의 에너지가 증가하여 스퍼터율이 증가하고, 가속된 이온과 에너지 교환으로 방출되는 스

퍼터 입자의 에너지가 증가한 결과 기판에 도달한 스퍼터 입자의 표면 이동도가 증가하여 결정의 성장이 촉진된 것으로 보인다. 한편, 50 W에서부터 회절피크의 강도가 감소하는 것은 에너지 전달에 의한 결정의 성장보다는 과도한 전력의 공급으로 증착률(40 W : 320 Å/min, 60 W : 495 Å/min)이 너무 커지게 되어 기판에 도달한 입자가 바람직한 격자위치를 찾기 전에 성막이 이루어지게 되어 결정성장이 억제된 것으로 사료된다.

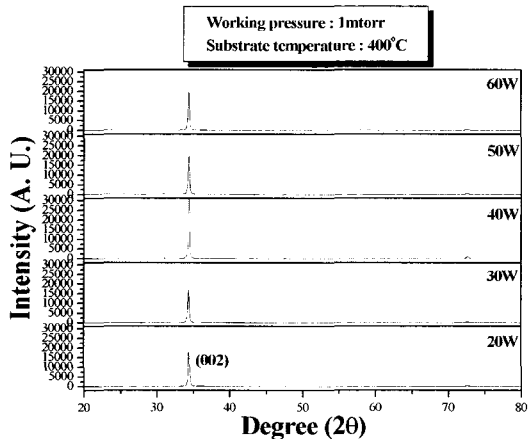


그림 1. 방전 전력에 따른 X선 회절패턴.
Fig. 1. The XRD spectra of ZnO:Al films as a function of discharge power.

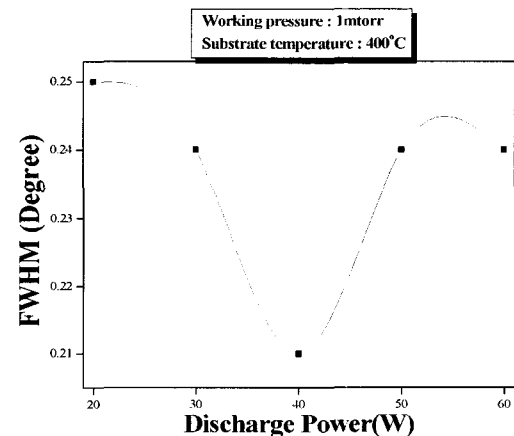


그림 2. 방전 전력에 따른 FWHM.
Fig. 2. Half-width of X-ray diffraction peak FWHM as a function of discharge power.

한편, Scherrer의 식[10]에 의해 방전전력의 변화에 대한 ZnO:Al 박막의 FWHM 특성을 구하여 그림 2에 나타내었다. 그림에서 FWHM값은 방전전력이 20 W에서 40 W로 변함에 따라 0.25에서 0.21로 감소하며, 50 W와 60 W에서는 0.24로 증가하여 40 W이상의 전력조건하에서는 결정의 크기가 감소하고 있음을 알수있다.

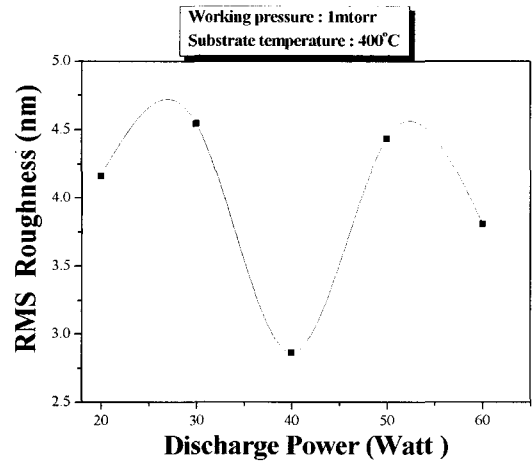


그림 3. 방전 전력에 따른 표면거칠기.
Fig. 3. RMS roughness as a function of discharge power

또한 그림 3의 AFM연구결과 방전전력의 변화에 대한 표면거칠기는 40 W의 경우 2.8 nm이었으며 50 W 및 60 W의 전력조건하에서는 각각 4.4 nm 및 3.8 nm을 나타내어, 과도한 전력조건하에서도 결정성이 나빠지고 있음을 알 수 있다. 이는 40 W이상의 방전전력의 경우 재스퍼터링등의 현상에 의해 결정성이 저하한 것으로 사료된다.

그림 4는 방전전력에 따른 저항률과 증착률을 나타내었다. 그림에서 보듯이 증착률은 방전전력이 20 W에서 60 W로 증가함에 따라 160 Å/min에서 495 Å/min로 거의 선형적으로 증가하며, 저항률은 20 W에서 40 W까지의 범위에서는 전력의 증가와 함께 $19.2 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$ 에서 $8.5 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$ 로 감소하고, 50 W와 60 W에서는 각각 $17.6 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$ 와 $18 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$ 로 증가함을 알 수 있다. 방전전력이 증가함에 따라 증착률이 증가하는 것은 방전전력이 증가하면 타겟에 충돌하는 Ar이온의 에너지를 증가시켜 스퍼터율이 증가하여 증착률이 증가한다.

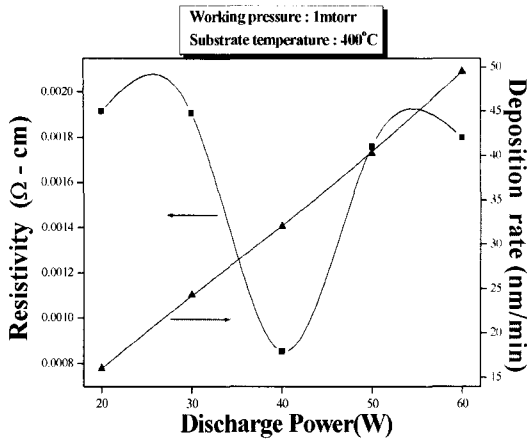


그림 4. 방전전력의 변화에 따른 ZnO:Al 박막의 저항률 및 증착률.
 Fig. 4. Resistivity and deposition rate of ZnO:Al film with variations of discharge power.

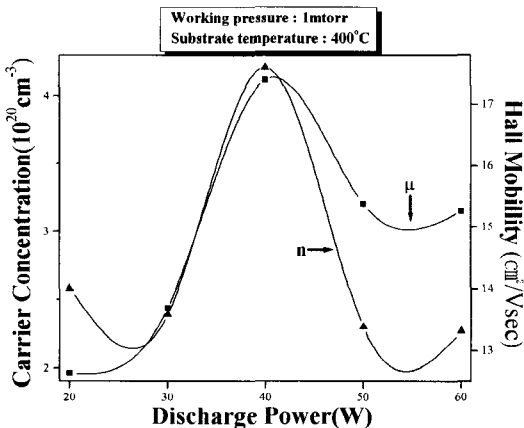


그림 5. 방전 전력의 변화에 따른 캐리어 농도와 홀 이동도.
 Fig. 5. Carrier concentration and Hall mobility with variations of discharge power.

또한, 20 W~40 W의 전력범위에서 전력이 증가함에 따라 전기 저항률이 감소하는 것은 증착률의 증가로 격자결함이 많이 발생하고 이에 따른 캐리어의 증가와 Ar이온의 에너지증가에 따라 가속이온과 에너지를 교환하는 스퍼터 입자의 에너지가 증가하여 결정의 성장이 촉진되어 결정립 성장에 따른 입자간의 저항감소로 전기적 특성이 개

선된 것으로 보인다. 그러나 그 이상의 전력에서 저항률이 증가하는 것은 과도한 증착률로 인한 결정성장의 억제와 방전전력이 상승함에 따라 Al 혹은 Zn의 결정 입계에 전도 전자가 트랩될 확률이 증가하기 때문으로 사료된다. 이러한 현상을 뒷받침하기 위해 캐리어 농도와 홀 이동도를 측정하여 그림 5에 나타내었는데 적절한 전력의 증가는 캐리어 농도 및 이동도를 증가시켜 전기적 특성을 개선시키지만 과도한 전력의 공급은 캐리어 농도의 저하와 이동도의 감소로 오히려 저항률이 증가함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 XRD분석결과와 일치하며 저항특성을 고려한 최적의 방전전력은 40 W인 것으로 보인다.

표 1. 증착조건에 따른 ZnO:Al 박막의 저항률과 광 투과율.

Table 1. Variation of ZnO:Al thin film resistivity and optical transmittance for different condition.

압력 (mtorr)	저항률 (10 ⁻⁴ Ω-cm)	투과도 (%)	방전전력 (W)	저항률 (10 ⁻⁴ Ω-cm)	투과도 (%)
1	8.54	90.7	20	19.2	90.76
5	27.5	91	30	19.1	90.56
10	270	89.75	40	8.54	90.7
15	274	86.79	50	17.6	90.77
20	455	85	60	18	90.6
온도 (°C)	저항률 (10 ⁻⁴ Ω-cm)	투과도 (%)	Al농도 (wt%)	저항률 (10 ⁻⁴ Ω-cm)	투과도 (%)
RT	52.5	88.26	1	19	90.2
100	51.2	89.58	2	8.54	90.7
200	32.4	90.45	3	25	90.5
300	14.7	90.38			
400	8.54	90.7			
500	13.1	89.04			

환편, 가스압력, 기판온도 및 Al 도핑 농도의 영향을 고려하면 투명전도막의 중요한 특성이 되는 저항률과 가시광 영역의 광 투과율은 1 mtorr의 동작압력, 400 °C의 기판온도와 방전전력 40 W에서 Al₂O₃가 2 wt% 도핑된 타겟으로 증착하였을 때 가장 우수한 것으로 평가되었으며[11-12], 표 1에 증착조건에 따른 가시광 영역의 광 투과율 및 저항률의 결과를 정리 하였다. 표 1에서 보듯이 가시광 영역의 광 투과율은 90 %정도로 우수한 특성을

보였다. 하지만 저항률의 경우 일반적으로 보고 되고 있는 투명전극용 ITO 박막에 비해 다소 높은 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다[13]. 이에 본 실험에서는 ZnO:Al 박막의 전기적 특성향상을 통하여 ITO 박막을 대체할 투명전도막 재료로서의 효용성을 평가하기 위해 기판 바이어스 전압을 -60~40 V까지 10 V단위로 인가하였다. 일반적으로 바이어스 전압이 없는 경우, 직류 스퍼트법에 의한 박막증착 시 기판에서의 하진입자 충격의 주된 source는 전자이다. 이들 전자는 글로우 중에서 발생한 열전자중에서 양극시쓰(anode sheath)의 전위장벽을 극복하고 도달한 저속 전자와 타겟에 충돌한 이온에 의해 방출된 이차전자가 음극시쓰에서 가속되어 충돌 없이 플라즈마 중을 비행하여 도달하는 고속 전자로 구성되며, 이들 전자의 충격은 기판을 가열하거나 기판 표면에 에너지를 전달하여 성장하는 박막의 구조나 성질에 영향을 미치게 된다. 그러나 바이어스 전압이 없는 직류 글로우 플라즈마에서 양극에 설치된 글래스 기판은 전자에 의해 대전되어 부동전위(floating potential)를 형성하게 되고, 기판으로의 전자유입은 시쓰의 형성에 따라 이온 유속(ion flux)에 상당하도록 제한된다. 이러한 전자의 제한은 양극시쓰의 두께가 매우 얇다는 것을 고려할 때 충돌에 의한 감속보다는 전자의 유입이 제한되는 것으로 알려져 있다[14].

이에 본 실험에서는 기판에 정(+)의 바이어스 전압(positive bias voltage)을 인가하여 기판으로의 전자유입을 보다 원활히 함으로써 박막의 결정성장을 촉진시켜 저항특성을 개선하고자 하였다. 정 바이어스 전압에 따른 박막의 결정성을 확인하기 위하여 그림 6에 X선 회절분석의 결과를 나타내었다. 그림에서 보듯이 바이어스 전압에 관계없이 (002)면의 우선배향성을 보여주며, (002)회절피크에서의 2θ값은 standard ZnO crystal(34.45°)과 거의 일치하였다. 또한, 30 V의 바이어스 전압에서 (002)회절피크의 강도가 가장 강한 것을 볼 수 있으며 40 V에서는 다시 감소했음을 알 수 있다. 정 바이어스 전압은 기판으로의 전자유입을 증가시키며, 특히 본 실험의 경우 30 V의 바이어스 전압에서 전자가 가장 활발히 유입되어 기판을 가열하거나 기판에 부가적인 에너지를 공급함으로써 결정성장을 촉진시키는 것으로 사료되고, 결정성장이 촉진된 결과 c축배향성이 양호해짐을 알 수 있다. 또한, XRD분석을 토대로 Scherrer의 식[10]을 이용하여 결정립의 크기를 구한 결과 30 V의 바이어스 전압에서 약 50 nm정도로, 바이어스 인가 전의 41 nm에 비하여 결정성장이 양호한 것으로 나타

났다. 그러나 40 V에서 회절피크가 감소한 것은 아직 명확하지는 않으며 보다 많은 분석이 요구되지만, 지나치게 큰 바이어스 전압의 공급으로 기판 온도가 과도하게 증가하여 증착된 입자의 증발현상에서 기인한 것으로 사료된다. 한편 Ch. Sujatha 등의 연구[15]에서는 과도한 정 바이어스 전압의 공급은 기판주위에 새로운 글로우 방전의 형성으로 안정적인 플라즈마의 유지가 어렵다는 연구결과가 논의된바 있다.

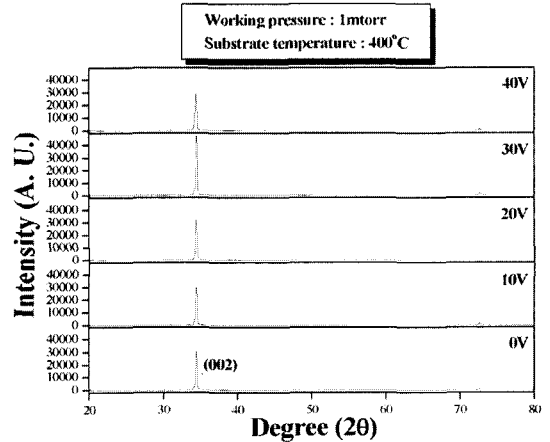


그림 6. 정 바이어스 전압에 따른 X선 회절패턴.
Fig. 6. The XRD spectra of ZnO:Al films at different positive bias voltage.

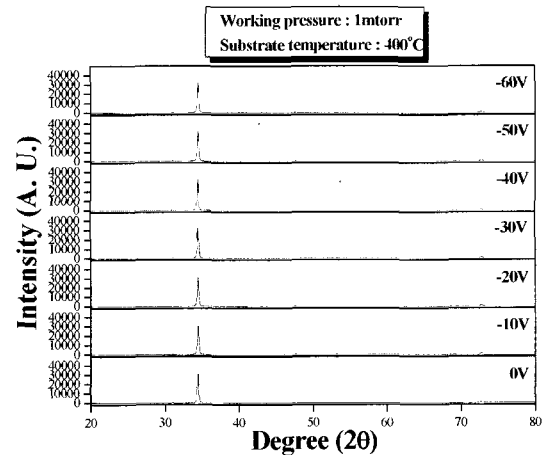


그림 7. 부 바이어스 전압에 따른 X선 회절패턴.
Fig. 7. The XRD spectra of ZnO:Al films at different positive bias voltage.

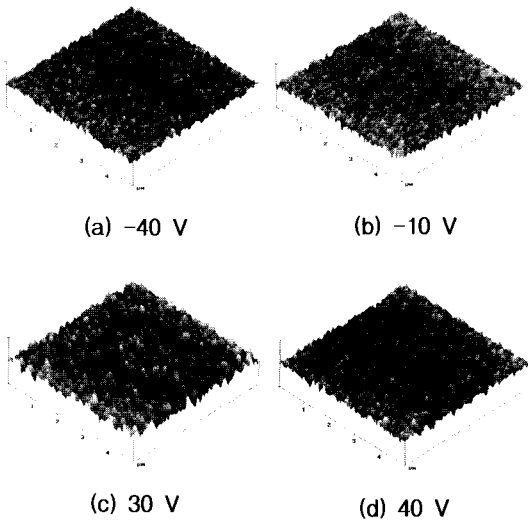


그림 8. 바이어스 전압에 따른 AFM.
 Fig. 8. The AFM of ZnO:Al films at different bias voltage.

그림 7은 부(-) 바이어스 전압에 대한 X선 회절 패턴을 나타낸다. 그림에서 -60~0 V까지의 바이어스 전압에 대해 회절피크의 강도가 큰 변화 없이 거의 일정한 것을 볼 수 있어 기판에 부 바이어스 전압을 공급하여도 결정성장에 큰 영향을 미치지 못한다는 것을 알 수 있다. 기판에 부 바이어스 전압을 공급하면 전자의 유입은 제한되며 기판에 충돌하는 주된 입자는 정 이온이 된다. 전자제한에 의한 기판에 부가적인 에너지 공급원의 차단이 상술한 결과의 한 요인으로 생각되며 또한, 충돌하는 이온의 대부분이 재스퍼터 현상등을 야기시켜 기판에 크게 에너지전달이 이루어지지 못한 결과로 생각된다. 이상의 결과로 정(+)바이어스 전압에 의한 고속전자의 기판충돌이 박막의 결정성장에 중요한 영향을 미치는 인자로 생각되며, 이에 대한 AFM 결과를 그림 8에 나타내었다.

그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 +30 V의 바이어스 전압조건하에서 박막의 결정성장이 크게 개선되었으며, 플로팅 포텐셜(V_f)로 생각되는 -10 V 및 -40 V의 바이어스 전압하에서는 결정성장에 큰 변화가 없어 부(-)바이어스 전압 인가에 의한 이온의 충돌효과는 전자의 그것에 비해 무시할 수 있음을 알 수 있다.

그림 9은 바이어스 전압에 따른 ZnO:Al 박막의 증착률을 나타낸다. 그림에서 정 바이어스 전압에 따른 박막의 증착률을 살펴보면 증착률이 약 31

nm/min정도로 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 이것은 앞서 논의한 바와 같이정 바이어스 전압 조건하에서 기판에 충돌하는 주된 입자는 저속 및 고속 전자로, 이러한 전자의 충돌은 성장하는 박막에 부가적인 에너지의 공급원으로 작용할 뿐 증착률에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다.

한편, 부 바이어스를 인가한 경우에 대해서는 -10 V를 제외하고 -40 V까지 증착률이 34 nm/min로 증가하다가 그 이상의 바이어스 전압 조건 하에서는 다소 감소하는 경향을 알 수 있다. -40 V까지 증착률이 증가하는 것은 플라즈마 내에 스퍼터되어진 재료의 활성 종(대전된 박막 분자 및 주변의 전자군) 들이 바이어스 전압에 의해 기판으로 유입될 확률이 증가하기 때문으로 보이며, 더 높은 부 바이어스 전압에 대하여 증착률이 감소하는 것은 이온충격에 의해 박막에서 떨어져 나가는 입자가 증가하기 때문으로 사료된다[16].

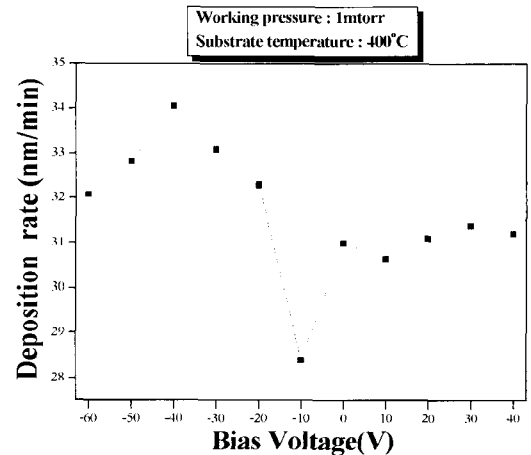


그림 9. 바이어스 전압에 따른 ZnO:Al 박막의 증착률.
 Fig. 9. Effect of substrate bias voltage on the deposition rate of ZnO:Al film.

그림 10은 바이어스 전압에 따른 ZnO:Al 박막의 저항률을 나타낸다. 우선 정 바이어스 전압의 인가에 따른 박막의 저항률을 살펴보면 20 V까지의 바이어스 전압에서는 저항률이 크게 변하지 않았으며 30 V에서 $4.3 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$ 의 최소저항률을 보이고, 보다 높은 전압에서는 저항률이 증가함을 알 수 있다. 이것은 그림 6의 XRD 결과와 그림 9의 증착률에서 알 수 있었듯이 정 바이어스 조건

하에서 저항특성 개선의 주요 원인은 전자충돌에 의한 결정성장에 있는 것으로 보인다. 즉, 그림 6과 10에서 보듯이 20 V까지의 바이어스 전압에서는 회절피크의 강도가 유사하며 결정성장이 촉진되지 않아 저항률이 일정하게 유지되는 것을 알 수 있고, 30 V에서는 기판에 전자의 충격이 활발해져 기판 상에 부가적인 에너지를 전달함으로써 결정성장이 크게 촉진되어 (002)면이 강하게 성장하며 결정의 성장에 따라 저항특성이 개선된 것으로 보인다. 또한, 그이상의 전압에서는 결정이 성장하지 못하여 저항특성이 나빠지는 것으로 사료된다[15]. 한편, 부 바이어스 전압을 인가한 경우, -10 V에서 저항률이 높아지고 -40 V까지는 $5.6 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$ 로 저항률이 개선되며 그 이상에서는 다시 저항률이 증가하는 것을 볼 수 있다. -40 V까지 저항률이 감소하는 것은 증착물의 증가에 따른 격자결합의 증가로 발생한 캐리어의 증가와 이온충격에 의한 선정효과로 저항특성이 개선된 것으로 보이며, 그 이상의 바이어스 전압에서 저항률이 증가하는 것은 높은 바이어스 전압의 인가로 인하여 박막 내에 정이온이 매몰될 가능성이 증가하여 박막의 특성이 나빠지는 것으로 사료된다[13]. 또한, 본 실험의 경우, -10 V가 0 V에 비해 저항률이 높아지고 증착률이 감소하여 박막의 특성이 나빠지는 것은 -10 V정도에서 net current가 zero가 되는 부동전위로 이온이나 전자가 박막성장에 큰 영향을 미치지 못한 결과로 보인다[12].

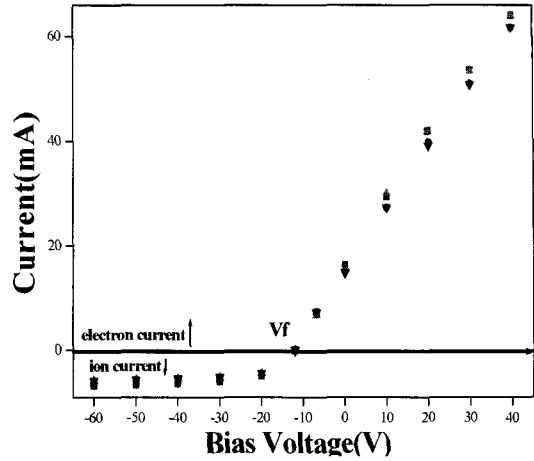


그림 11. 바이어스 전압-전류 특성.

Fig. 11. Bias voltage vs. current characteristic.

그림 11는 바이어스전압에 따른 전류곡선을 나타낸 것으로 그림으로부터 -10 V부근이 부동전위임을 확인할 수 있었다. 바이어스 전압에 따른 저항률의 변화를 보다 명확히 하기 위하여 그림 12에 바이어스 전압 인가에 따른 캐리어 농도 및 홀 이동도를 나타내었다.

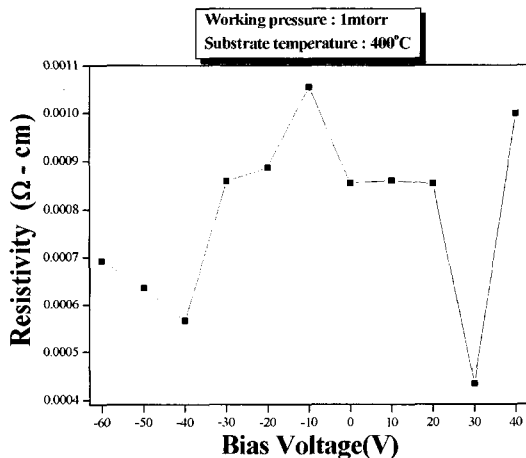


그림 10. 바이어스 전압에 따른 ZnO:Al 박막의 저항률.

Fig. 10. Effect of substrate bias voltage on the resistivity of ZnO:Al film.

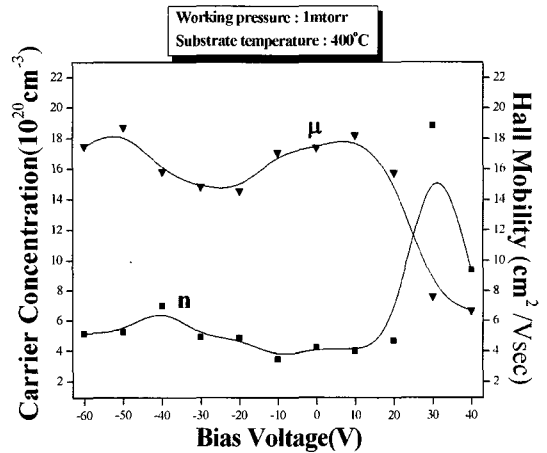


그림 12. 바이어스 전압에 따른 캐리어 농도 및 홀 이동도.

Fig. 12. Effect of substrate bias voltage on the carrier concentration and Hall mobility.

그림 12에서 보듯이 전반적으로 바이어스 전압에 대한 저항특성은 특히 캐리어 농도에 의해서 결정되는 것으로 보이며, -40 V에서 캐리어 농도가 다소 높고, 30 V에서 캐리어 농도가 가장 증가했음을 알 수 있다. 30 V에서 캐리어 농도가 크게 증가하는 것은 앞서 논의한 바와 같이 전자의 작용에 의한 결정성장의 축진이 원인으로 보이며, 결정의 성장으로 인한 캐리어 농도의 증가로 저항특성이 개선되었음을 보여준다. 또한 -40 V에서는 캐리어 농도가 조금 증가하였는데 이것은 결정의 성장에 의한 캐리어의 증가보다는 증착률이 다소 증가함에 따라 발생한 결함의 증가로 캐리어 농도가 조금 증가한 것으로 보이며, -40 V의 부 바이어스 전압 조건 하에서는 이온충격에 의한 선정효과뿐만 아니라 증착률의 증가 또한 저항특성을 개선시키는 작용을 한 것으로 판단된다.

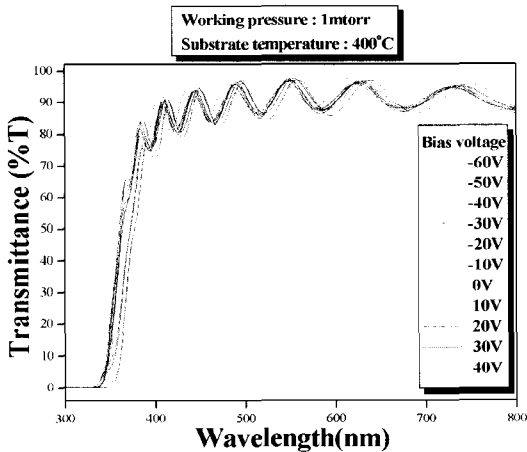


그림 13. 바이어스 전압에 따른 광 투과도 스펙트럼.

Fig. 13. Optical transmittance spectra of ZnO:Al films with substrate bias voltage.

그림 13은 바이어스 전압에 따른 광 투과도 스펙트럼을 나타내었다. 그림으로부터 파장에 따른 광 투과율이 유사함을 알 수 있다. 본 실험의 경우 바이어스 전압과는 무관하게 400~800 nm의 가시광 영역에서 90 % 정도의 우수한 투과율을 보였다. 저항률이 가장 낮은 30 V의 바이어스 전압에서 평균 투과율은 91.46 %였다.

4. 결 론

본 연구에서는 투명전극의 응용을 위하여 ZnO:Al 박막을 제작, 평가하였다. 투명전극의 주요한 특성이 되는 저항률과 가시광 영역의 광 투과율을 고려할 때 1 mtorr의 동작압력, 400 °C의 기판온도, 40 W의 방전전력, 2 wt%의 Al함량에서 (002)배향면의 우수한 성장, $8.54 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$ 의 저항률, 90.7 %의 우수한 광 투과율을 얻을 수 있었으나, ITO 박막에 비하여 다소 높은 저항특성을 나타내었다. 저항특성의 개선을 위하여 인가된 기판 바이어스 전압의 효과는 가시광 영역의 광 투과율에는 큰 영향을 미치지 않았으나, 저항률 특성의 경우, -40 V에서 $5.6 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$ 와 30 V에서 $4.3 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$ 의 한층 개선된 저항특성을 얻을 수 있어 바이어스 전압의 인가로 저항특성이 개선되었음을 알 수 있었다. 한편, 증착률 및 X선 회절분석의 결과 등을 종합적으로 고려해 볼 때 부 바이어스 및 정 바이어스 전압을 인가할 경우, 각각 이온충격과 전자충격에 의해 각각 다른 메커니즘으로 저항특성이 개선되었음을 알 수 있었다. 가장 우수한 특성은 30 V의 positive bias에서 나타났으며 $4.3 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$ 의 낮은 저항률과 91.46 %의 우수한 광 투과율을 보여 ITO 박막에 비교될만한 특성을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01 2002-00000342-0)지원으로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] 황득규, 방규현, 명재민, "ZnO계 소자 연구 동향", 전기전자재료학회지, 15권, 6호, p. 35, 2002.
- [2] Ch. Sujatha, G. Mohan Rao, and S. Uthama, "Characteristic of indium tin oxide films deposited by bias magnetron sputtering", Materials Science and Engineering, B. 94, p. 106, 2002.
- [3] Woon-Jo Jeong and Gye-Choon Park, "Electrical and optical properties of ZnO thin film as a function of deposition

- parameters", *Solar Energy Material & Solar Cells*, 65, p. 38, 2001.
- [4] 이종덕, 송준태, "Rf magnetron sputtering 법으로 ZnO박막 제조시 기판온도에 따른 c축 배향성에 관한 연구", *전기전자재료학회논문지*, 9권, 2호, p. 199, 1996.
- [5] 이승환, 성영권, 김종관, "Magnetron sputtering 으로 증착한 ZnO 박막의 특성과 열처리에 따른 비저항과 미세구조", *전기전자재료학회논문지*, 10권, 2호 p. 128, 1997.
- [6] 최우성, 소병문, 홍진웅, " Al_2O_3 가 첨가된 ZnO의 전기적 특성", *전기전자재료학회논문지*, 9권, 6호, p. 573, 1996.
- [7] Yasuhiro Igasaki and Hirokazu Kunma, "Argon gas pressure dependence of the properties of transparent conducting ZnO:Al films deposited on glass substrates", *Applied Surface Science*, 169-170, p. 509, 2001.
- [8] 한세원, 강형부, 김형식, " Al_2O_3 가 미량 첨가된 비 선형성 ZnO 바리스티의 미세구조와 전도기구", *전기전자재료학회논문지*, 9권, 7호, p. 711, 1996.
- [9] D. J. Kwak, K. I. Park, B. S. Kim, S. J. Lee, D. G. Lim, and S. H. Lee, "Argon gas pressure and substrate temperature dependencies of ZnO:Al film by dc magnetron sputtering", *The 3rd international Conference on Advanced Materials and Devices*, p. 21, 2003.
- [10] R. Tueta and M. Braguier, "Fabrication and characterizations of Indium Tin Oxide thin films for Electroluminescent applications", *Thin Solide Films Vol. 80, No.1* p. 143, 1981.
- [11] K. I. Park, B. S. Kim, D. G. Lim, and D. J. Kwak, "Some properties of ZnO:Al transparent conducting films by dc magnetron sputtering method", *Proceeding of the KIEEME(in Korean) Annual Summer Conference*, Vol. 4, No. 1, p. 143, 2003.
- [12] K. I. Park, B. S. Kim, D. G. Lim, S. H. Lee, and D. J. Kwak, "Effect of substrate bias on electrical properties of ZnO:Al transparent conducting film", *Proceeding of the KIEEME Annual Autumn Conference 2003*, Vol. 16, p. 409, 2003.
- [13] K. I. Park, B. S. Kim, D. G. Lim, G. Y. Park, and D. J. Kwak, "Properties of ITO transparent conducting film by DC magnetron sputtering method", *Proceeding of 2003 Spring Conference of KIEEME*, p. 95, 2003.
- [14] Brian Chapman, "Glow Discharge Process-sputtering and Plasma Etching", *A WILEY-INTERSCIENCE PUBLICATION*, p. 177, 1980.
- [15] Ch. Sujatha, G. Mohan Rao, and S. Uthanna, "Characteristics of Indium Tin Oxide Films Deposited by bias Magnetron Sputtering", *Materials Science and Engineering*, B94, p. 107, 2002.
- [16] Z. W. Yang, S. H. Han, T. L. Yang, Lina Ye, D. H. Zhang, H. L. Ma, and C. F. Cheng, "Bias voltage dependence of properties for depositing transparent conducting ITO films on flexible substrate", *Thin Solid Films*, 366, p. 4, 2000.