

고주파 마그네트론 스퍼터법으로 제조된 Al:ZnO 박막의 미세구조 및 물리적 특성

최정호 · 조남희
인하대학교 재료공학부

Microstructural and Physical Characteristics of Al:ZnO Thin Films Prepared by rf Magnetron Sputter Techniques

Jung Ho Choi and Nam-Hee Cho
School of Materials Science and Engineering, Inha University

요 약

고주파 마그네트론 스퍼터법을 이용한 Al:ZnO(AZO) 박막 증착시, 증착 조건에 따른 미세구조 변화를 조사하였으며, 이를 전기적 광학적 성질과 상관하여 고찰하였다. 박막은 기판 온도가 증가함에 따라 c-축이 기판표면에 수직으로 놓이는 주상구조로 성장하였으며, 스퍼터 파워가 증가함에 따라 증착 속도와 입자의 크기가 증가한 반면 결정성은 저하되었다. 증착된 박막은 가시광선영역에서 85% 이상의 광 투과도를 나타내었으며 Al 첨가에 의해 광학적 밴드갭이 약 0.15 eV 증가하였다. 주상구조로 성장한 입자들은 저각 입계(low angle grain boundary)와 특수 입계(special grain boundary)를 형성하였으며, 특히 $\Sigma=7$ [001] (210)_A/(110)_B 입계의 규칙적인 원자배열 및 원자이완을 HRTEM을 이용하여 고찰하였다.

Abstract

Al:ZnO(AZO) thin films were prepared by rf magnetron sputter techniques. Effects of various deposition conditions on the microstructure as well as the electrical and optical characteristics of the films were investigated. As substrate temperature increased, the films grew in columnar-shape with c-axis perpendicular to substrate surface. As sputter power increased, the deposition rate as well as the grain size of the films increased but the crystalline quality declined. The optical transmittance of the films in visible range was above 85% and the optical band gap increased by 0.15 eV when Al element was doped. Columnar grains formed low angle boundaries as well as special grain boundaries. The atomic structure of a $\Sigma=7$ [001] (210)_A/(110)_B grain boundary was examined by HRTEM.

1. 서 론

공진기, 가스센서 그리고 바리스터 등으로 사용되는 ZnO는 공정조건에 따라서 비저항을 크게 변화시킬 수 있으며, 박막으로 제조할 경우 가시광선 영역에서 비교적 높은 광 투과도를 유지할 수 있어 투명전극으로 응용 가능성이 매우 크다. 특히 재료의 풍부함 및 우수한 가격조건과 함께 수소 플라즈마의

환원분위기에서 화학적 내구성이 뛰어나 기존 SnO₂계 및 Sn-doped In₂O₃(ITO)계 투명전극을 대체할 수 있는 물질로 각광받고 있다.¹⁾

ZnO 박막의 비저항을 낮추기 위하여, 박막 증착 후 환원분위기에서 열처리하는 방법과 특정 불순물을 첨가하는 방법이 있으나, 보다 높은 전기 전도도를 가지며 고온에서 안정적인 전기적 특성을 보이는 후자의 방법이 주로 사용되고 있다.²⁻⁴⁾ 첨가물로는 3

가나 4가 양이온을 비롯한 다양한 원소를 사용할 수 있으며, 이들은 Zn 원자를 치환함으로써 원자가 변화에 기인한 전하 운반자를 생성하게 된다.^{5,6)}

Al:ZnO(AZO) 박막을 증착하는 방법으로 스퍼터법, 화학기상증착법 및 졸겔법등 다양한 기법들이 시도되었으며, 대부분의 경우 수십에서 수백 나노미터의 입자크기를 가지며 주상 성장하는 것으로 보고되어 있다.⁷⁾ 다결정 상으로 성장한 AZO 박막은 입자의 크기 및 결정성 그리고 입체 구조 등과 같은 미세구조에 의해 그 물리적 특성이 크게 좌우되며 이는 기판온도, 스퍼터 파워 및 증착 압력 등에 의해 조절이 가능하다. 그러나 미세구조의 구체적인 변화와 이러한 미세구조 변화가 박막의 물성에 미치는 영향에 대한 연구는 매우 부족하다. 지난 십여 년간 화합물 반도체의 특수입체 구조에 대하여 고분해 투과전자현미경을 이용한 연구가 이루어졌으나^{8,9)} 대부분이 에피 성장과 관련된 것일 뿐 다결정 박막의 입체 구조에 관한 연구는 거의 이루어진 바가 없다. 특히 스퍼터 기법에 의해 제조된 박막은 작은 입자 크기와 특정 결정축의 우선배향 등에 기인하여 원자 수준에서 정확한 입체 구조 파악이 매우 어려운 실정이다. 아울러 ZnO 다결정 박막에 대한 원자 수준에서의 미세구조 분석 역시 소수의 연구그룹에 의해 제한적으로 시도되었을 뿐이다.¹⁰⁾

본 연구에서는 고주파 마그네트론 스퍼터기법을 이용한 AZO 박막 증착시 증착 조건에 따른 미세구조의 변화를 관찰하였으며 이를 박막의 물리적 특성과 상관하여 고찰하였다. 또한 고분해능 투과전자현미경을 이용하여 다결정 박막의 입체 구조 분석을 시도하였으며, 주상 성장한 입자들의 방위 분포를 미소회절(microdiffraction)법을 이용하여 알아보고 이들이 박막의 전기적 특성에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 실험 방법

스퍼터 기법으로 AZO 막을 증착하기 위하여, 다음과 같은 방법으로 타겟을 준비하였다. 먼저 99.9%의 ZnO 분말에 99.9%의 Al₂O₃ 분말을 2 wt% 첨가하여 볼 밀링 방법으로 혼합한 후 이를 900°C에서 3시간 동안 하소하였다. 하소된 분말을 이용하여

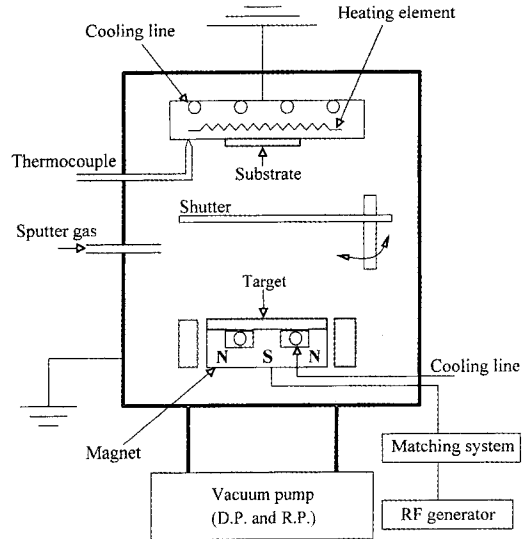


Fig. 1. Schematic diagram of the rf magnetron sputter system.

5,000 kg/cm²의 압력 하에 직경 2.4인치인 성형체를 만들었으며 이를 1300°C에서 4시간 동안 소결하여 2인치 타겟을 준비하였다. 본 연구에서 사용한 스퍼터 장치의 개략도가 Fig. 1에 나타나 있다. 박막 증착 전에 확산펌프를 이용하여 반응실내의 진공도를 1×10⁻⁵ Torr로 유지한 후, 증착시에는 Ar 스퍼터 가스를 사용하여 10 mTorr의 증착 압력을 유지하였다. 타겟과 기판과의 거리는 4.5 cm이며, 기판 표면의 세정과 안정한 플라즈마를 얻기 위해 박막 증착 전 예비 스퍼터링을 10분간 시행하였다. 기판 온도는 100~500°C 범위에서, 그리고 rf 인가전력은 50~250 W 범위에서 변화시켰다. 박막 제조시 사용된 공정변수 범위를 Table 1에 요약하였다.

증착한 박막은 surface profiler(Tencor, Alpha-Step

Table 1. Deposition Condition of the AZO Thin Films

Deposition parameter	Experimental range
target(2"×1/6")	Al:ZnO(AZO)
substrate	slide glass, Si wafer
sputter power (watt)	100~250 (rf)
sputter gas	Ar
background pressure (Torr)	1×10 ⁻⁵
working pressure (Torr)	1×10 ⁻²
substrate temperature (°C)	100~500

500)를 이용하여 두께를 측정하였으며 증착된 박막의 표면 형상 및 입자 분석을 위해 주사전자 현미경(SEM, Hitachi X-650)을 이용하였다. 박막의 결정 구조 및 우선 배향성 분석은 박막 X선 회절분석기(Philips, PW3719)와 투과 전자 현미경(TEM, Philips CM200)을 이용하였다. 고분해능 투과전자현미경(HRTEM)법을 이용하여 우선 배향된 AZO 박막의 입계 구조를 관찰하였으며 기록된 사진은 영상처리 프로그램(Media Cybernetics, Image-Pro plus)을 이용하여 분석하였다. 또한 미소 회절(microdiffraction)법을 사용하여 주상 성장한 미소 입자간의 방위 분포를 조사하였다.

증착된 박막의 전기전도도 및 전하운반자의 이동도와 농도를 구하기 위해서 4탐침법과 Hall 효과 측정을 실시하였으며 UV-visible spectrometer(Shimadzu, UV-2401PC)을 사용하여 250~800 nm의 파장영역에서 박막의 투광 스펙트럼을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 증착 변수에 따른 미세구조 변화

Fig. 2는 100°C부터 500°C까지의 증착 온도에 따른 AZO 박막의 XRD 결과이다. 증착 온도가 올라감에 따라 c 축 우선배향성이 증가하여, 500°C 기판온도에서 증착된 박막에서는 002 회절피크의 강도가 크게 증가하였다. 이는 기판온도가 올라감에 따라 기판 표면에 도달한 원자들이 높은 표면 이동도를 가지게 되며 결과적으로 기판 표면에 평행하도록

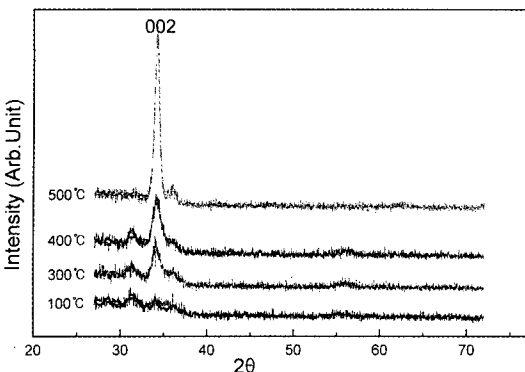


Fig. 2. XRD patterns of the AZO films. The films were prepared at substrate temperatures ranging from 100°C to 500°C.

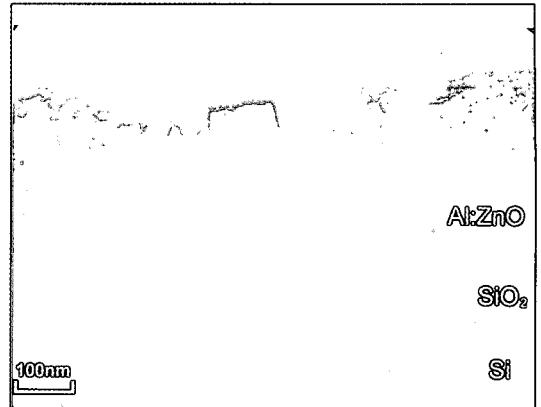


Fig. 3. Cross-section TEM view of the AZO films. The films were deposited with a sputter power of 250 W at a substrate temperature of 500°C.

(002) 최밀충진면이 성장하기 때문이다. 우선 배향된 박막의 성장양태를 관찰하기 위해 투과전자현미경을 이용하여 박막의 단면 분석을 하였다(Fig. 3). 기판 격자가 박막의 응력에 미치는 영향을 극소화시키기 고자 Si 웨이퍼를 1000°C에서 3시간 동안 열 산화를 시켜 SiO₂ 비정질 막을 형성한 후, 그 위에 AZO 박막을 증착하였다. 500°C의 기판온도에서 증착된 박막은 기판 표면에서부터 50~100 nm의 입자 크기를 유지한 채 기판에 수직방향으로 성장하였다. Fig. 4는 100°C와 500°C 기판온도에서 증착한 박막으로부터 얻은 TEM 회절패턴이다. 100°C에서 증착한 박막(b)의 경우 미소 결정립 및 결정성의 저하로 인해

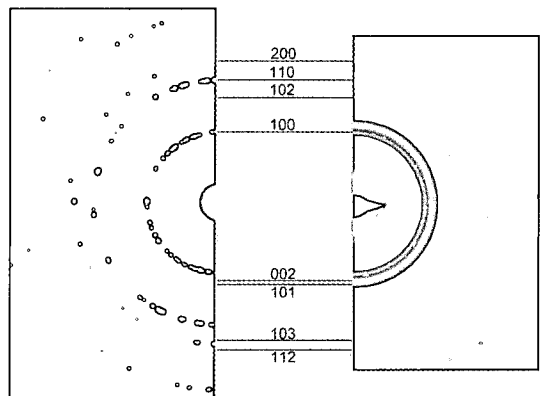


Fig. 4. TEM diffraction patterns of the AZO films. The films were deposited at (a) 500°C and (b) 100°C. A selected area aperture with a diameter of 10 μm was used for both diffraction patterns.

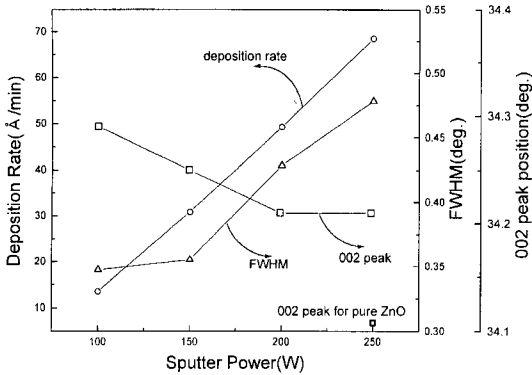


Fig. 5. Variation of the deposition rate, FWHM and 002 peak position with sputter power. The films were prepared at a substrate temperature of 500°C.

일정 두께를 가진 선의 형태로 모든 회절환이 관찰되고 있으나, 500°C의 기판온도에서 증착하였을 경우(a)에는 입자 성장에 의해 점으로 이루어진 회절환의 모습이 보였으며 c-축 우선배향에 따라 002, 101, 102와 같이 c-축에 평행하지 않은 결정면에 상관된 회절환이 나타나지 않았다.

스퍼터 파워의 증가에 따른 박막의 증착률, 002 회절피크의 위치 및 반가폭의 변화를 Fig. 5에 표시하였다. 먼저 스퍼터 파워가 증가함에 따라 증착률은 직선적으로 증가하여 250 W에서 68 Å/min의 증착 속도를 나타내었다. 반면에 막의 결정성을 나타내는 반가폭은 100 W에서 가장 작은 값을 나타내었으며 150 W에서 소폭 증가한 후 200 W와 250 W에서는 큰 폭으로 증가하였다. 이는 증착률이 증가함에 따라 기판에 도달하는 원자유량이 많아지고 개개 원자들의 표면이동도가 감소되어 막의 결정성이 저하되기 때문으로 여겨진다. 한편 이온반경이 72 pm인 Zn²⁺ 자리에 이온반경이 53 pm인 Al³⁺가 치환될 경우 예상되는 격자수축에 의한 002 회절 피크의 고각 이동은 스퍼터 파워가 증가할수록 감소하였는데, 이는 증착률이 증가할수록 Al³⁺ 이온의 Zn²⁺ 자리 치환이 덜 이루어지기 때문으로 생각된다.

Fig. 6은 500°C 기판온도에서 증착된 박막의 스퍼터 파워에 따른 입자 크기 변화를 보여주는 주사전자현미경 사진이다. 스퍼터 파워가 증가함에 따라 증착 속도가 빨라져 입자 크기가 증가함을 볼 수 있다. 특히 200 W와 250 W 스퍼터 파워로 증착된 박막에서 100 nm 이상의 크기를 가진 입자를 관찰할 수 있

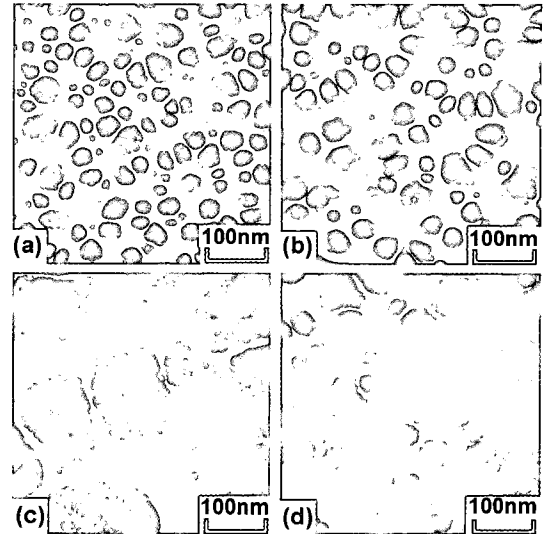


Fig. 6. SEM views of the AZO films. The films were deposited at a substrate temperature of 500°C with various sputter power of (a) 100 W (b) 150 W (c) 200 W (d) 250 W, respectively.

었다.

3-2. 전기적 광학적 특성

AZO 박막의 비저항은 기판온도가 증가함에 따라 크게 감소하여 500°C에서 증착된 박막은 1×10⁻² Ωcm의 비저항값을 나타내었으며 이것은 순수한

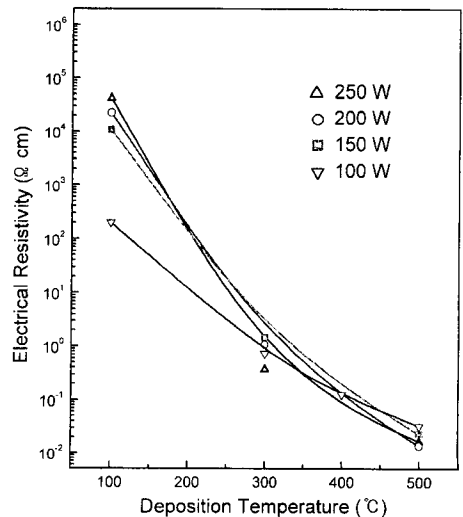


Fig. 7. Variation of the electrical resistivity of the AZO films with deposition temperature.

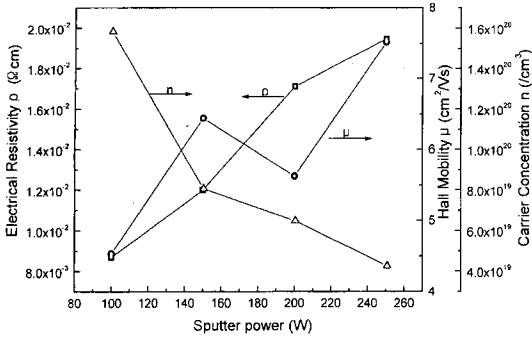


Fig. 8. Variation of the Hall mobility, carrier concentration, and electrical resistivity of the AZO films with sputter power. The films were prepared at a substrate temperature of 500°C.

ZnO 박막의 비저항값 보다 10^6 배 이상 낮은 값이다 (Fig. 7). 이는 기판 온도가 증가함에 따라 기판에 도달한 원자들의 표면이동도가 증가하며 이에 따라 박막의 결정성이 향상되기 때문으로 여겨진다. 이때 Al 원자는 격자내 Zn 자리를 쉽게 치환하게 되며 다음과 같은 반응식에 의하여 전하 운반자를 생성하게 된다.



500°C에서 증착된 박막의 스퍼터 파워에 따른 전기적 특성을 분석하기 위하여 Hall 효과 측정을 하였으며 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 스퍼터 파워가 100 W에서 250 W로 증가함에 따라 전하 운반자의 농도는 1.6×10^{20} 에서 $4 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 로 감소하였다. 이는 증착률 증가에 따른 002 회절 피크의 저각 이동 결과에서 볼 수 있듯이 증착 속도가 증가함에 따라 Al 원자들의 Zn 치환이 감소하는 결과로 여겨진다. 반면 전하 운반자의 이동도는 스퍼터 파워가 증가함에 따라 증가하였는데, 이는 Fig. 6에서 관찰된 입자 크기의 변화에 기인한다. 즉 입자가 커짐에 따라 전하 운반자의 주요 산란 역할을 하는 입계의 면적이 줄어들기 때문이다. 박막의 비저항은 스퍼터 파워가 작아질수록 감소하여 100 W에서 증착된 박막의 경우 $9 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$ 를 나타냈다.

Fig. 9(a)는 500°C 기판온도와 100 W부터 250 W까지의 스퍼터 파워 조건에서 증착된 파장에 따른 박막의 광 투과도이다. 박막은 기판 온도나 스퍼터 파워에 관계없이 가시광선 영역에서 85% 이상의 광

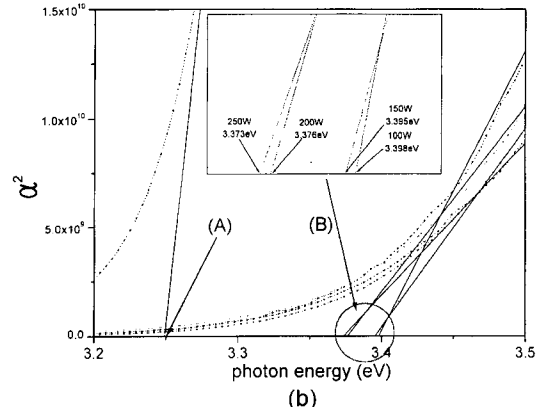
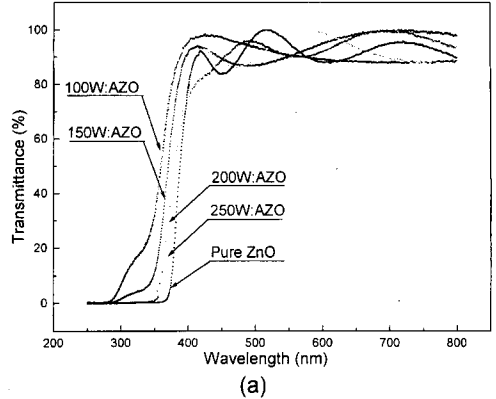


Fig. 9. (a) UV-visible spectra of the ZnO and AZO films deposited with various sputter power (100~250 W) at a substrate temperature of 500°C. (b) Square of the absorption coefficient (α^2) vs. photon energy (a) for the films.

투과도를 나타내었으며 자외선 영역에서 투과율이 급격히 감소하였다. 순수한 ZnO 박막의 투광 스펙트럼도 함께 나타내었는데, Al 첨가에 의해 광 흡수단이 단파장 쪽으로 이동함을 볼 수 있다. Al이 첨가된 박막에서는 스퍼터 파워가 감소함에 따라 흡수단이 단파장 쪽으로 이동하였다.

박막의 투광 스펙트럼 및 박막의 두께를 이용하여 다음 식으로부터 흡수 계수를 구하였다.

$$\frac{I}{I_0} (\text{transmittance}) = e^{-\alpha t} \quad (2)$$

여기서 I_0 는 입사 빛의 세기, I 는 투과된 빛의 세기, t 는 박막의 두께를 나타낸다. 직접 전이 반도체의 경우에 광학적 밴드갭(E_g)과 흡수 계수 α 는 다음과 같

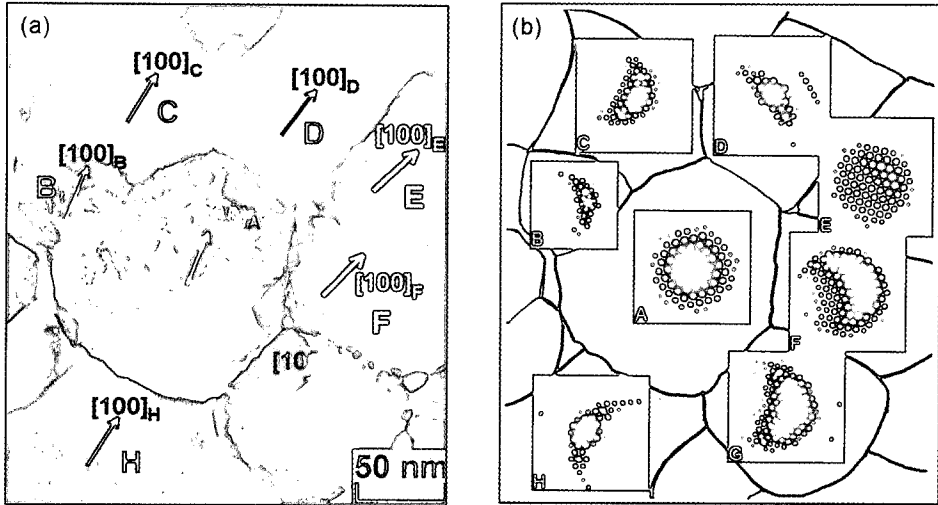


Fig. 10. (a) Bright-field TEM image of the AZO film. (b) microdiffraction patterns are represented in each corresponding grain around grain A. The films were deposited at a substrate temperature of 500°C with a sputter power of 250 W.

은 관계를 가진다.¹¹⁾

$$\alpha = A(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (3)$$

여기서 h 는 Plank 상수, ν 는 입사 빛의 주파수, A 는 재료의 굴절률과 전자 및 정공의 유효질량과 상관된 상수를 나타낸다. 박막의 흡수계수 α^2 vs. $h\nu$ 를 도시한 후 α^2 의 직선영역을 확장하여 광학적 밴드갭을 구하였다. 먼저 Fig. 9(b)는 500°C에서 증착된 AZO 박막(B)과 ZnO 박막(A)을 나타내고 있다. Al 첨가에 의해 광학적 밴드갭이 약 0.15 eV 증가하였다. 도우핑에 의한 밴드갭의 변화는 Burstein-Moss 이동¹²⁻¹⁴⁾으로써 설명될 수 있다. 즉 첨가물에 기인하여 생성된 과잉의 전하 운반자가 전도띠 내에서 페르미 에너지를 증가시키기 때문으로 여겨진다.

AZO 박막 부분이 Fig. 9(b)에 확대되었다. Al이 첨가된 박막의 경우 스퍼터 파워가 증가할수록 광학적 밴드갭이 감소하였다. 이것은 앞에서 관찰된 스퍼터 파워에 따른 미세구조의 변화 및 Hall 측정 결과와 일치하는 것으로 증착률 증가에 따라 Al 원자의 Zn 원자 치환이 적게 이루어지고 결과적으로 단위 부피 당 전하 운반자의 수가 감소하기 때문이다.

3-3. 입계 구조 및 방위 분석

주상 성장한 입자들의 상호간 방위관계를 알아보

기 위해 미소 회절법을 사용하였다(Fig. 10). 명시야상(Fig. 10(a))의 각 입자들로부터 기록된 회절패턴으로부터 A 입자 주위에 있는 입자들의 [001] 축이 중심에 위치한 A 입자의 [001] 축과 거의 유사한 방향을 가짐을 알 수 있다. A 입자의 [001] 축으로부터 가장 큰 기울임 각을 가지는 D 입자는 A 입자에 대

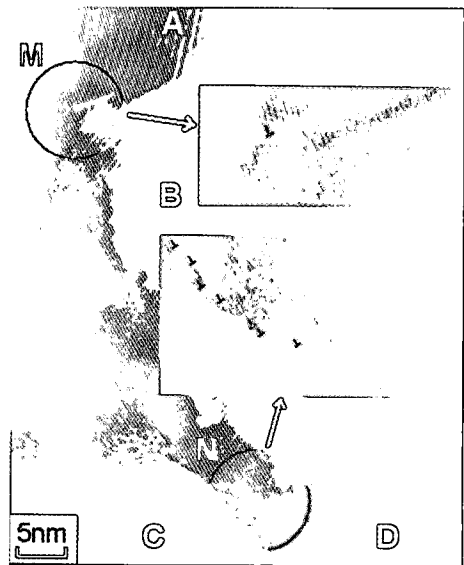


Fig. 11. HRTEM image of the AZO films deposited at 500°C with a sputter power of 250 W.

Table 2. Misorientation Angles for Special Tilt Grain Boundaries with a [001] Rotation Axis

Σ -value	57	43	31	21	13	39	7	19	3
misorientation angle (degree)	13.2	15.2	17.9	21.8	27.8	32.2	38.2	46.8	60

하여 X, Y 축 방향에서 각각 1.86°, 5.77° 기울어져 있다. 각 입자들의 [001] 축이 A 입자의 [001] 축과 1° 정도의 이탈각을 가지고 있으므로 모든 입자의 [001] 결정축이 입사빔과 평행하다고 간주한 후, 각 결정입자의 [100] 방향을 그림 (a)에 표시하였다. 각 입자들의 [100] 방향이 A 입자의 [100] 방향과 비슷하게 놓여 있음을 알 수 있다. 이때 입자 A는 입자 B, C, H 와 각각 0.5°, 10°, 10.5°의 교차각을 형성하였으며, A 입자를 둘러싼 주변 B, C, D, E, F, G 입자는 연속적으로 9.5°, 5°, 11°, 2.5°, 3.5°의 저각 입계를 형성하였다.

Fig. 11의 고분해능 투과전자현미경 사진은 주상 구조로 성장한 입자들이 10° 안팎의 작은 교차각을 이루었을 때의 입계 모습을 보여준다. 모두 4개 입계를 관찰할 수 있으며 입자 A와 B는 8°의 교차각을 입자 B와 C, B와 D는 각각 9.5°, 10.5°의 교차각을 형성하였다. 특히 A와 B 입자 그리고 B와 D 입자 사이에서 입계는 coherent한 특성을, B와 C 입자 사이의 입계는 전위를 포함한 semicoherent한 특성을 보였다.

다결정 AZO 박막에서 주상 구조로 성장한 입자들은 이웃한 입자들과 작은 교차각을 이루며 입계를 형성하는 것으로 보여진다. 이때 저각 입계들은 입계에서 격자면의 연속성을 유지하며, 이웃한 입자들에서 반복적으로 나타남으로써 입계 산란에 기인한 전하 운반자의 이동도 감소에 큰 역할을 하지 않을 것으로 생각된다.

주상 구조로 성장한 입자들에서 저각 입계외에 특정한 교차각을 갖는 특수 입계(special boundary)도 관찰되었다. 이러한 입계들은 대부분 CSL(coincident site lattice) 모델^{15,16}에 의하여 선택된 결정면을 입계면으로 가지고 있었다. ZnO구조(Wurtzite)에서 [001] 정대축을 중심으로 두 결정을 회전시켰을 때 생성 가능한 특수 입계를 조사하였으며 Σ 값이 60 이하인 경우의 교차각 θ 와 Σ 값을 Table 2에 나타내었다.

Fig. 12(a)는 AZO 박막의 입계로부터 기록된 고분해능 투과전자현미경 사진이다. 이 입계는 $\Sigma=7$ [001]

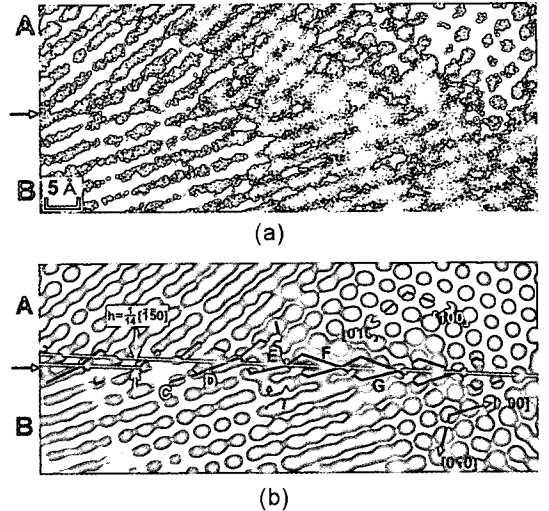


Fig. 12. (a) HRTEM image of a $\Sigma=7$ [001] $(210)_A/(110)_B$ tilt grain boundary. (b) Modified image of (a); image filtering was carried out for the modification.

$(210)_A/(110)_B$ 기울임 입계이며 정확한 $\Sigma=7$ 교차각으로부터 1.5° 이탈한 36.7°의 교차각을 나타냈다. 기록된 사진을 이미지 처리하여 분석한 결과, 입계의

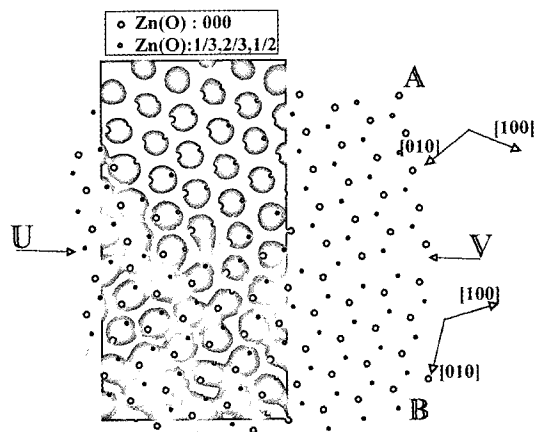


Fig. 13. Atomic columns are superimposed on the bright spots of the HRTEM image of a $\Sigma=7$ $(210)_A/(110)_B$ tilt grain boundary. Arrows U & V indicate the tilt grain boundary.

양쪽 끝에서는 비대칭 머름모폴 형태의 원자 구조가 규칙적으로 나타나는 반면 그림의 중간인 D와 E 부근에서는 그 구조가 변형되어 있었다(Fig. 12(b)). 이는 E 부근의 작은 화살표에 나타난 전위와 입계의 상호작용에 기인한 것으로 국부적인 입계 구조의 변화(D-E)와 함께 입계면에서 1/4[150] 높이의 step을 형성하였다.

$\Sigma=7$ [001] (210)_A/(110)_B 기울임 입계의 HRTEM 사진에서 밝은 점에 두 원자컬럼을 부여하였다(Fig. 13). 여기에서 사진의 흰색 컬럼이 이웃하는 000과 1/3 2/3 1/2 위치의 Zn 또는 O의 원자 쌍으로 여겨지며 따라서 입계면을 따라 존재하는 원자들의 규칙적인 배열을 파악할 수 있다. 이러한 입계의 원자 배열

은 한 입자 내의 격자점에 놓이는 두 원소(Zn와 O)의 위치가 바뀔 때 따라 두 가지 유형이 가능하다. Fig. 14(b), (c)에 두 종류의 입계 원자 구조 모델을 나타냈다. 입계는 두 bar 사이의 화살표 P로 표시된 단위 구조로 구성되며, 이들 단위는 4개의 cross-boundary 결합을 가진다.

Wurtzite 구조에서 1/3 2/3 1/2 위치의 Zn(O) 원자는 1/3 2/3 1/8 위치의 O(Zn) 원자 및 5/8 높이에 위치한 삼각형 배열의 3개의 O(Zn) 원자와 4 배위의 정상 결합(normal bonding; Zn-O 또는 O-Zn 결합)을 하게 된다(Fig. 14(a)). 따라서 (a) 모델에서는 4개의 cross-boundary 결합 중 2로 표시된 결합만이 잘못된 결합(wrong-bonding; Zn-Zn 또는 O-O 결합)을 이룰 것으로 생각되며 (b) 모델에서는 1, 3, 4로 표시된 cross-boundary 결합이 잘못된 결합을 이루는 것으로 생각된다. 또한 3과 4로 표시된 입계의 원자 결합은 정상적인 원자 결합 길이 및 각도로부터 일정량 이탈되어 있을 것으로 생각된다. 입계를 경계로 놓인 두 입자의 극성(polarity)은 (a) 모델의 경우와 (b) 모델의 경우보다 우선적으로 나타날리라 여겨지며, 이에 관한 실험적인 고찰은 현재 진행중이다.

4. 결 론

Al이 첨가된 ZnO 박막을 스퍼터 기법을 이용하여 증착하였다. 기판온도 500°C에서 증착된 박막은 c 축이 기판표면에 수직방향으로 놓이는 강한 우선배향성을 나타냈다. 스퍼터 파워가 증가할수록 박막의 결정성이 저하된 반면 입자크기는 증가하였으며 100 W의 스퍼터 파워와 500°C의 기판온도에서 증착된 박막은 $9 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$ 의 비저항값을 가졌다. 박막은 증착 조건에 상관없이 가시광선 영역에서 85% 이상의 광 투과도를 나타내었으며 Al 첨가에 의해 광학적 밴드갭이 약 0.15 eV 증가하였다. 주상 성장한 다결정 박막의 입자들은 입계에서 연속적인 결정면을 가지며 $\sim 10^\circ$ 안팎의 작은 교차각을 이루었으며 이웃한 입자들 사이에서 반복적으로 나타남으로써 입계 산란에 기인한 전하 운반자의 이동도 감소에 큰 역할을 하지 않을 것으로 생각된다. $\Sigma=7$ [001] (210)_A/(110)_B 기울임 입계는, 한쪽 입자에 존재하는 전위와의 상호작용으로 국부적인 입계 구조 변화와

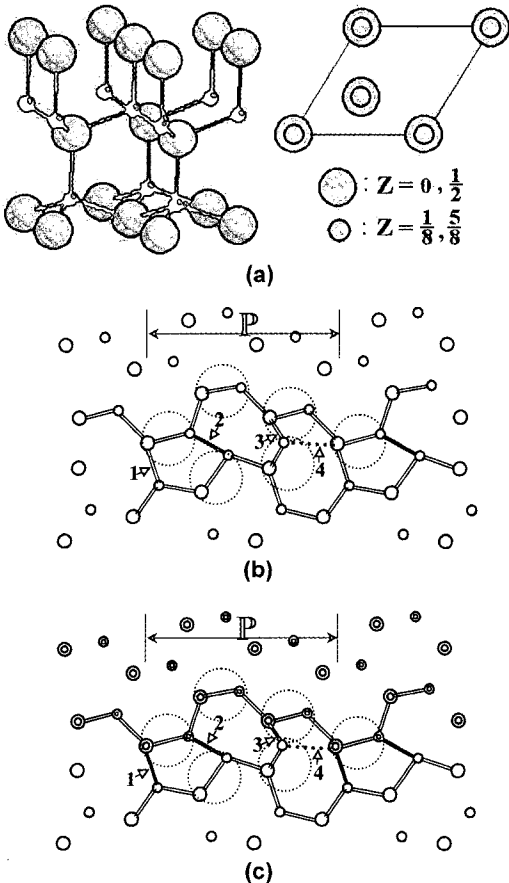


Fig. 14. (a) Clinographic projection and plan of the unit cell of wurtzite structure. Two different atomic structure models for the $\Sigma=7$ (210)_A/(110)_B tilt grain boundaries. The polarity of the upper grain in (b) is reversed in (c).

1/14[150] 높이의 스텝을 형성하였다. 입계는 3~4개의 링으로 이루어진 단위구조로 구성되었으며, 입계 양쪽의 입자 극성(polarity)이 입계 원자구조에 미치는 영향을 고찰하였다.

감사의 글

이 연구는 1999년도 인하대학교 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Major, S., Kumar, S., Bhatnagar, M. and Chopra, K. L., *Appl. Phys. Lett.*, **49**, 394 (1984).
- 2) Jin, Z.-C., Hamberg, I. and Granqvist, C. G., *J. Appl. Phys.*, **64**, 5117 (1988).
- 3) Sato, H., Minami, T. and Takata, S., *J. Vac. Sci. Technol.*, **A11**, 2975 (1993).
- 4) Minami, T., Nanto, H. and Takata, S., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **23**, L280 (1984).
- 5) Tang, W. and Cameron, D. C., *Thin Solid Films*, **238**, 83 (1994).
- 6) Kim, K. H., Park, K. C. and Ma, D. Y., *J. Appl. Phys.*, **81**, 7764 (1997).
- 7) Kozuka, H. and Yoko, T., *J. Am. Ceram. Soc.*, **81**, 1622 (1998).
- 8) D'Anterrosches, C. and Bourret, A., *Phil. Mag. A*, **49**, 783 (1984).
- 9) Kim, M. J. and Carpenter, R. W., *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **238**, 157 (1992).
- 10) Sieber, I., Wanderka, N., Urban, I., Dörfel, I., Schierhorn, E., Fenske, F. and Fuhs, W., *Thin Solid Films*, **330**, 108 (1998).
- 11) Pankove, J. I., *Optical process in Semiconductor*, Dover, New York (1975).
- 12) Sarkar, A., Ghosh, S., Chaudhuri, S. and Pal, A. K., *Thin Solid Films*, **204**, 225 (1991).
- 13) Jin, Z. C., Hamberg, I. and Garnqvist, C. G., *J. Appl. Phys.*, **64**, 5117 (1988).
- 14) Minami, T., Nanto, H. and Takata, S., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **24**, L605 (1985).
- 15) Ranganathan, S. A., *Acta crystallogr.*, **21**, 197 (1996).
- 16) Sutton, A. P. and Balluffi, R. W., *Interfaces in Crystalline Materials*, Clarendon press, Oxford (1995).