

논문 2009-46SD-7-2

산소 어닐링이 마그네 트론 스퍼터링으로 증착된 undoped ZnO 박막의 구조적, 광학적, 전기적 특성에 미치는 영향에 대한 연구

(A Study on the Effect of O₂ annealing on Structural, Optical, and Electrical Characteristics of Undoped ZnO Thin Films Deposited by Magnetron Sputtering)

윤 의 중*, 박 형 식**

(Eu-Jung Yun and Hyeong-Sik Park)

요 약

본 연구에서는 어닐링조건이 ZnO 박막의 결정구조((002) 세기, FWHM, d-간격, grain 크기, (002) 피크 위치), 광학 (UV 피크, UV 피크 위치) 및 전기적 성질 (전자농도, 비저항, mobility)에 미치는 영향을 조사하였다. ZnO 박막은 RF 마그네트론 스퍼터링으로 ZnO 타겟을 사용하여 SiO₂/Si 기판 상에 증착하였다. 증착도중 기판에 열을 가하지 않았고 ZnO 박막은 500°C~650°C의 온도범위와 5분~20분의 시간범위에서 어닐링 되었다. 샘플의 표면 거칠기 및 구조는 각각 SEM과 XRD로 분석하였다. 광학 성질은 He-Cd 325 nm 레이저를 사용하여 상온에서 측정된 photoluminescence (PL)로 평가 하였다. 어닐링 온도 및 시간 변화에 따라 다음과 같은 관계가 관찰되었다: (1) UV intensity, (002) intensity, grain size 사이에 비례관계가 성립하고, (2) UV intensity는 FWHM과 반비례하고, (3) UV intensity는 전자농도와 큰 상관관계가 없고, (4) d-spacing과 (002) peak position은 반비례 관계에 있고, (5) 3.20~3.24 eV 범위의 UV peak position은 ZnO 박막이 n-type 특성을 가진다는 것을 의미하며 이는 전기적인 특성의 결과와 일치하고, (6) 최고의 광학 및 구조적 특성을 갖기 위한 최적조건은 0.2의 산소분압 (O₂/(O₂+Ar)), 240W의 RF 파워, 상온의 기판온도, 600°C 온도를 20분 유지하는 어닐링 조건, 그리고 20 mTorr의 스퍼터링 압력 등을 들 수 있다.

Abstract

In this paper, the effects of annealing conditions on the structural ((002) intensity, FWHM, d-spacing, grain size, (002) peak position), optical (UV peak, UV peak position) and electrical properties (carrier concentrations, resistivity, mobility) of ZnO films were investigated. ZnO films were deposited onto SiO₂/Si substrates by RF magnetron sputtering from a ZnO target. The substrate was not heated during deposition. ZnO films were annealed in temperature ranges of 500~650°C in the O₂ flow for 5~20 min. The film average thicknesses were in the range of 291 nm. The surface morphologies and structures of the samples were characterized by SEM and XRD, respectively. The optical properties were evaluated by photoluminescence (PL) measurement at room temperature (RT) using a He-Cd 325 nm laser. As the annealing temperature and time vary, the following relations were also observed: (1) proportional relationships among UV intensity, (002) intensity, and grain size exist, (2) UV intensity is inversely proportional to FWHM, (3) there is no special relationship between UV intensity and electron carrier concentrations, (4) d-spacing is inversely proportional to (002) peak position, (5) UV peak position in the range of 3.20~3.24 eV means that ZnO films have a n-type conductivity which was consistent with that obtained from the electrical property, (6) the optimal conditions for the best optical and structural characteristics were found to be oxygen fraction, (O₂/(O₂+Ar)) of 0.2, RF power of 240W, substrate temperature of RT, annealing condition of 600°C for 20 min, and sputtering pressure of 20 mTorr.

Keywords : undoped ZnO films, structural, optical, and electrical properties, RF magnetron sputtering, O₂ annealing effect.

* 정희원, 호서대학교 시스템 제어공학과(Hoseo University)

** 학생회원, 성균관대학교 전기전자컴퓨터 공학과(Sungkyunkwan University)

※ 이 논문은 2008년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호: 2008-0094)

접수일자: 2009년5월15일, 수정완료일: 2009년6월30일

I. 서 론

현재 국내는 물론 국외에서도 FPD (Flat Panel Display)의 발전은 매우 급속도로 성장하고 있다. 이미 국내 업체에서는 TFT-LCD나 PDP같은 경우 100인치에 달하는 대형 디스플레이 시제품이 제작되었을 정도로 기술력이 존재하는 상태이다. 하지만 PDP와는 달리 TFT-LCD의 경우 트랜지스터에 의해 각각의 pixel이 동작하게 되는데 이 구동 소자 때문에 각각의 pixel에서 100%의 빛을 발광하지 못하는 단점이 있다. 또한 EL의 경우 투명하지 않은 구동 소자 때문에 active pixel 구조대신 passive pixel 구조를 채택하고 있는 실정이다. 최근 이러한 문제점을 해결하기 위해 투명한 전도성 물질(Transparent Conductive Oxide; TCO)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. TCO 물질 중 대표적인 물질은 ITO, ZnO, CuO 등이 있는데, 그 중 II-VI족 화합물로서 ZnO라는 물질이 각광을 받고 있다. 가장 큰 이유는 다른 물질에 비해 전도성이 매우 우수하기 때문이다. 이를 이용한 응용제품들은 센서, UV-검출기, 또는 태양열판, 디스플레이등 많은 분야에서 연구 및 제작 후 사용되어지고 있다. 지금까지 알려진 ZnO 박막(thin film)의 물성 특성은 hexagonal structure에 c-axis 방향으로 성장 되고, direct band gap이 3.2 eV~3.4 eV이며 exciton binding energy는 60 meV이다. 또한 doping을 하지 않아도 n-type 특성의 박막임이 알려졌다. 그 이유는 박막 내에 존재하는 native defects에 의한 것으로 보고되고 있다.^[1] ZnO 박막 내에는 oxygen vacancy(V_o), zinc interstitial (Zn_i), zinc anti-site(Zn_o), oxygen interstitial(O_i), zinc vacancy (V_{zn})라는 native defects가 존재하게 되며 이들에 대한 연구 결과들은 많이 발표 되어져있다.^[2-4] 핵심은 박막의 구조 내에서의 defect formation energy로 이는 증착된 박막의 상태에 따라 변화한다. 여기서 박막의 상태란 두 가지로 정의 할 수 있는데, 첫 번째는 zinc-rich 상태이다. 이때는 Zn_i 이 conduction band에 매우 근접한 에너지 대역에 위치하며 electron을 제공함으로써 donor와 같은 역할을 한다. 두 번째는 oxygen-rich 상태로 이때는 O_i , V_{zn} 이 valence band에 매우 근접한 에너지 대역에 위치하며 hole을 제공함으로써 acceptor와 같은 역할을 한다. 이들 모두 low formation energy를 갖으며 에너지 밴드에 매우 근접해 있다고 하여 shallow level defects라

부른다. V_o 는 이들과는 달리 deep level defect로 mid-band gap 근처에 위치^[1,3]하며 hole killer로 불려진다. V_o 는 ZnO 박막 내에 무수히 많이 존재하는데 박막에 p-type을 위한 hole dopants를 주입하여도 V_o 와의 결합으로 self-compensation됨으로서 n-type 특성이 나타나게 되는 것이다. 결국 V_o 의 self-compensation 때문에 p-type ZnO 박막의 안정성(stability) 문제도 제기되게 되었다.

최근에는 여러 가지 원소들을 도핑(doping)하여 n-type 또는 p-type의 ZnO 박막을 제작하거나^[5-9] 미도핑(undoped) 상태로 ZnO박막을 증착한 후에 O_2 나 N_2 등의 가스를 이용해 어닐링(annealing) 하므로써 n-type 또는 p-type의 ZnO박막을 제작하는 연구^[10]가 많이 진행되고 있다. 비록 doping하지 않아도 n-type 특성을 가지나 이는 native defects에 의한 것이고 응용소자로 사용하기에는 농도가 높은 편이 아니기 때문에 좀 더 높은 농도를 위해서 Al, Ga등의 도너원자들이 doping된다. 그리고 어닐링 공정을 진행하면서 온도나 가스 분위기에 따라 n-type특성을 지닌 ZnO를 p-type으로 변화시키려고 하지만 응용소자를 만들기 위해서는 안정성(stability)이 보장되어야 한다. 그러므로 안정성이 유지되지 못하는 것은 가장 큰 문제점이라 할 수 있다. 이러한 문제점 때문에 p-type doping 혹은 undoped된 p-type ZnO 박막제작에 대한 연구는 큰 도전을 받고 있다.

그러나 무엇보다도 산소분위기에서 annealing된 undoped ZnO 박막의 결정구조나 광학적인 특성 그리고 전기적인 특성에 대해서 어떻게 상관관계가 이루어져 있는지에 대한 체계적 규명은 지금까지 문헌상으로 보고 되지 않고 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 실험을 통해서 얻은 데이터를 가지고 이러한 특성들에 대한 상관관계에 대해 체계적으로 연구하였다. 본 연구에서 ZnO의 광학적 특성을 대표하는 파라미터로 325nm를 여기소스로 사용한 UV intensity를 사용한 이유는 325 nm가 3.8 eV정도의 에너지를 나타내어 3.3 - 3.4 eV정도의 energy bandgap을 가진 ZnO 박막에 쬐어 졌을 때 박막내부에 에너지 흡수가 일어나 ZnO 내부에 존재하는 각종 level들(shallow 및 deep level)의 광학적 성질을 잘 나타낼 수 있기 때문이다. 또한 ZnO박막의 광학적 특성과 구조적 특성의 상관관계를 조사하기 위하여 ZnO의 광학적 특성을 대표하는 UV intensity의 최대 값 (다른 deep level들의 intensity에

비하여 월등하게 큼)과 ZnO의 구조적 특성을 대표하는 X-ray Diffraction (XRD) 측정값을 관계시켰다.

II. 실험

본 연구에서 ZnO 박막 증착에는 RF magnetron sputtering 방법을 이용하였다. Target은 ZnO(직경은 3 inch, 99.99% 순도인 4N)를 이용하고, reaction gas로는 Ar(99.999% 순도 5N)과 O₂(99.999% 순도 5N)를 이용하였다. 기판은 대면적 디스플레이의 응용을 생각해서 glass 또는 약 500nm SiO₂기판을 이용하였다. SiO₂ 기판은 n-type(100) Si 기판 위에 thermal oxidation 방법으로 1050°C에서 54분간 성장시켜 준비하였다. RF power는 200-240W, 증착 시 압력은 20mtorr 정도의 값을 갖게 하며, 증착은 상온에서 수행하였다. Ar의 주입량은 64sccm으로 고정시키고, O₂ 주입량도 16sccm으로 고정시키도록 하여 O₂/Ar 비율을 0.2 [O₂ fraction(= $\frac{O_2}{O_2 + Ar}$)]을 0.2]로 설정하였다. 본 연구에서 사용된 공정조건을 표 1에서 제시하였다.

ZnO 박막을 증착 하고 난 후에는 3-zone furnace를 이용하여 어닐링(annealing)을 하였다. 어닐링은 O₂ gas 분위기(7.5 l/min 정도의 일정한 O₂ gas 흐름)에서 진행되었고, O₂ 분위기 하에서 온도(500°C~650°C)와 시간(5분~20분)의 변화를 주면서 어닐링을 실시하였다.

ZnO 박막의 두께와 표면의 morphology는 FE-SEM

표 1. ZnO 박막의 구조적, 광학적, 전기적 성질들의 상호관계를 연구할 undoped ZnO 박막 증착을 위한 공정조건

Table 1. The process condition for the fabrication of undoped ZnO thin film to explore relationships among their structural, optical and electrical properties.

substrate	SiO ₂ /Si	
P _{working}	20 mTorr	
deposition time	20 min	
gas	Ar	64 sccm
	O ₂	16 sccm
O ₂ fraction	0.2	
RF power	240 W	
temp (°C)	RT	
sample rotation	5 rpm	

으로 관찰하고, ZnO 박막의 구조는 XRD를 사용하여 2θ의 peak 값과 FWHM 값을 측정함으로써 조사하였다. 또한 ZnO 박막의 저항 값을 알아보기 위해 HP4145B를 이용하여 I-V 측정을 수행하였다. ZnO 박막의 광학 성질은 He-Cd 325 nm laser를 여기소스로 사용하여 photoluminescence (PL) measurements 방법으로 상온에서 측정하였고 박막의 전기적 특성인 carrier 농도, mobility, 전도도는 der Pauw configuration을 사용하는 Hall 효과 측정시스템을 이용하여 역시 상온에서 측정하였다. 본 연구에서 각 파라미터의 특성 값 추출 시 사용한 Sample 수는 10개로 특성 값들은 평균값을 나타낸다.

III. 결과 및 고찰

표 1에 제시한 공정조건을 통해 제작한 as-grown 샘플에 대해 XRD로 측정된 것을 그림 1에서 보여주고 있다. 그림 1로부터 2θ의 값이 34.25°로 증착된 ZnO 박막이 hexagonal wurzite 결정구조를 갖고 있으며, 수직으로 증착이 잘 되어진 c축 배향의 특성을 가짐을 알 수 있다.

그림 2는 증착된 ZnO 박막의 어닐링 온도(시간은 5분으로 고정)에 따른 광학적인 특성(UV intensity)과 구조적인 특성변화((002) intensity, FWHM, d-spacing)에 대해 나타내고 있다. 그림 2 (a)에 따르면 UV intensity와 (002) intensity 변화는 어닐링 온도에 따라 유사했으며, 600°C에서 두 intensity 값은 최대값을 나

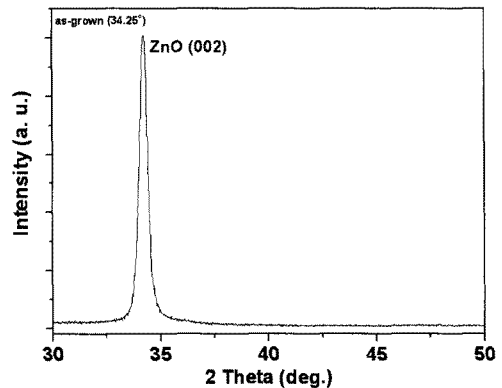


그림 1. 적층된(as-grown) undoped ZnO 박막의 XRD 특성

Fig. 1. XRD result of as-grown undoped ZnO thin films.

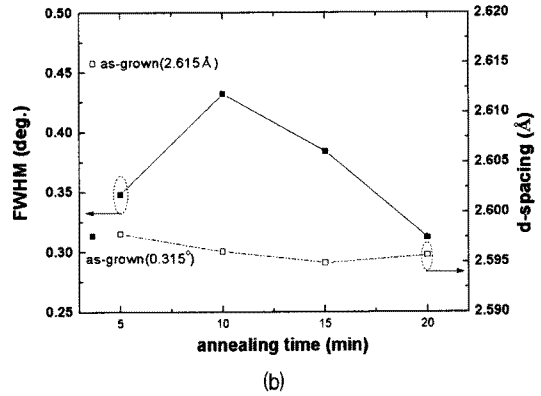
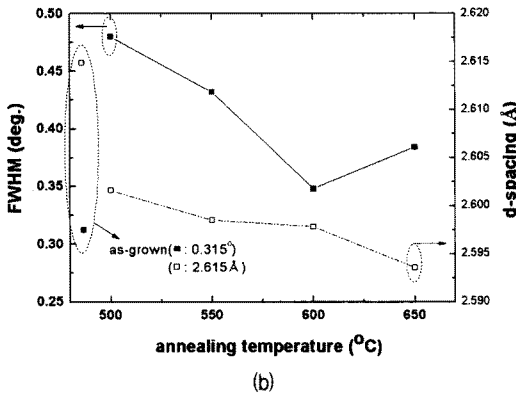
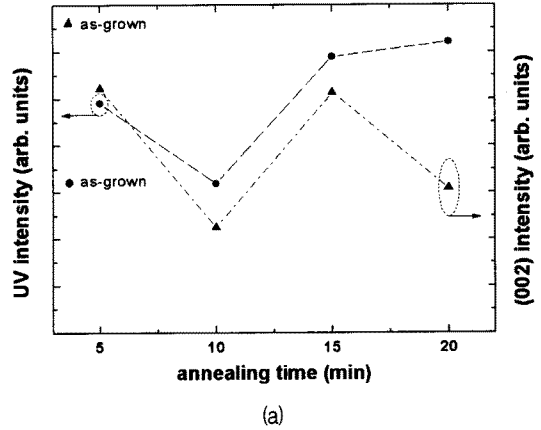
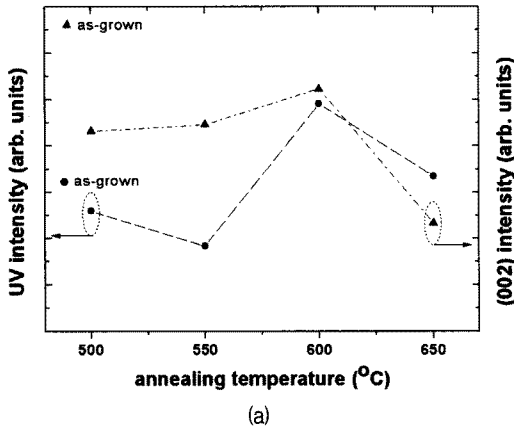


그림 2. 어닐링 온도에 따른 결정구조 및 광학적인 특성 변화; (a) UV intensity, (002) intensity, (b) FWHM, d-spacing

Fig. 2. The crystal structure and optical properties as a function of annealing temperature; (a) UV intensity, (002) intensity, (b) FWHM, d-spacing.

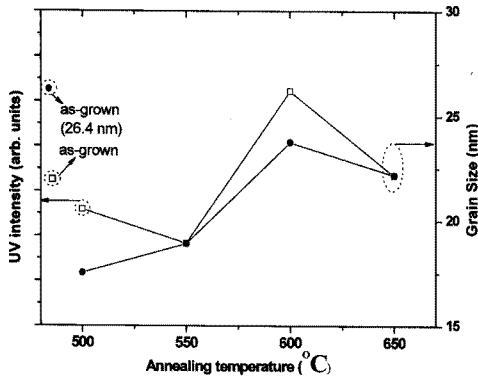
타내고 있다. 또한 그림 2의 결과로부터 알 수 있듯이 어닐링 온도가 증가할수록 UV intensity와 (002) intensity는 FWHM과 서로 반비례 관계에 있음을 알 수 있었다. 그림 2 (b)로부터 어닐링 온도가 600°C까지 증가함에 따라 FWHM과 d-spacing은 서로 감소하였으나, 600°C 이후에서 FWHM이 증가하고 d-spacing은 계속해서 감소하고 있다. 그리고 as-grown에서 500°C의 어닐링이 수행 되었을 때 광학적인 특성(UV intensity 약간 감소)보다 결정구조의 특성의 큰 변화((002) intensity가 크게 감소, FWHM 크게 증가, d-spacing 크게 감소)가 있었다. 500°C의 어닐링은 결정질에 나쁜 영향을 미쳤다고 볼 수 있다. 이러한 유사한 결정구조 특성의 변화는 600°C 이상의 어닐링조건에

그림 3. 어닐링 시간에 따른 결정구조 및 광학적인 특성 변화; (a) UV intensity, (002) intensity, (b) FWHM, d-spacing

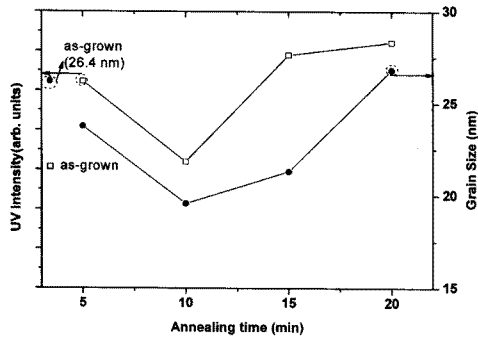
Fig. 3. The crystal structure and optical properties as a function of annealing time; (a) UV intensity, (002) intensity, (b) FWHM, d-spacing.

서도 발견할 수 있었다. 그림 2의 결과로부터 600°C의 어닐링 온도에서 광학적인 특성이 가장 우수(UV intensity가 최대)하고 결정구조가 가장 좋다((002) intensity가 최대, FWHM이 최소)는 것을 알 수 있었다. 따라서 어닐링 온도를 600°C로 선택하였다.

그림 3은 어닐링 온도를 600°C로 고정하고 어닐링 시간변화에 따른 광학적인 특성(UV intensity)과 구조적인 특성변화((002) intensity, FWHM, d-spacing)에 대해 나타내고 있다. 그림 3 (a)에서 알 수 있듯이 UV intensity와 (002) intensity의 변화는 15분까지 유사했으나, 15분 이후부터 UV intensity는 약간 더 증가하고, (002) intensity는 감소하고 있다. 또한 어닐링 시간에 따라 FWHM과 UV intensity는 서로 반비례 관계에 있



(a)



(b)

그림 4. 어닐링 온도(a)와 시간(b)에 따른 UV intensity와 Grain size 변화특성
Fig. 4. UV intensity and Grain size as a function of (a) annealing temperature and (b) annealing time.

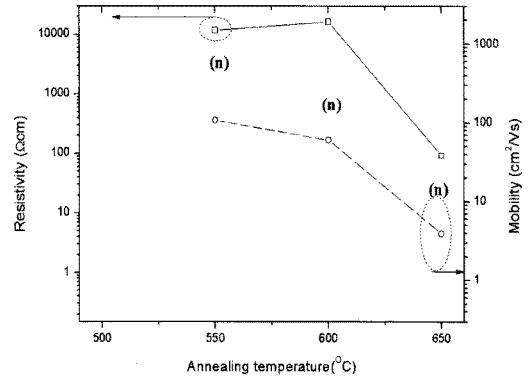
다는 것을 알 수 있다. d-spacing은 어닐링 시간에 따라 약간 감소하였으나 거의 유사함을 알 수 있는데 이것은 bulk ZnO의 d-value(2.602Å)과 비교하면 시간에 관계없이 ZnO 박막내에서의 스트레스가 작다는 사실을 알 수 있다. 그림 3의 결과로부터 20분에서 광학적 특성(UV intensity가 우수)이 좋았고, FWHM이 최소였으나 (002) intensity가 감소하여 최상의 결정구조는 얻을 수 없었다.

그림 4는 어닐링 온도(시간은 5분 고정)와 어닐링 시간(온도는 600°C 고정)에 따른 UV intensity와 Grain size변화에 대해 나타내고 있다. Grain size는 아래에 제시한 Scherrer's 식^[11]을 이용하여 구할 수 있다.

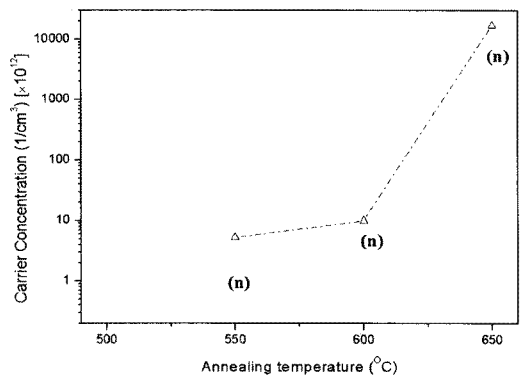
$$Grain\ size(a) = \frac{0.9\lambda}{B\cos\theta} \quad (1)$$

여기서 λ 는 x-ray source의 파장을 나타내는데 측정에서 사용한 Cu- $k\alpha$ 의 x-ray 소스에 대한 파장은 약 0.154nm이다. B는 반폭 (full width at half-maximum: FWHM)의 값을 의미하고, θ 는 Bragg angle을 의미한다. 그림 4에서 ZnO박막의 grain size은 17~27 nm 정도이고 이와 유사한 grain size는 다른 논문에서도 확인할 수 있다^[12].

어닐링 온도와 시간의 변화에 따라서 UV intensity와 Grain size의 변화는 서로 유사하였다. 그림 2 (b)와 그림 4 (a), 그리고 그림 3 (b)와 그림 4 (b)를 비교하면 Grain size와 FWHM은 서로 반비례관계에 있음을 알 수 있다. 이러한 반비례관계는 앞의 (1)식에서도 확인할 수 있다. 위의 결과로부터 어닐링 온도 및 시간에 따른



(a)



(b)

그림 5. 어닐링 온도에 따른 전기적인 특성(어닐링 시간 = 5분); (a) Resistivity, Mobility, (b) Carrier Concentration

Fig. 5. Electrical property as a function of annealing temperature(annealing time = 5 min); (a) Resistivity, Mobility, (b) Carrier Concentration.

UV intensity 특성을 통해 Grain size가 어떤 특성을 갖는지 유추할 수 있다.

그림 5는 Hall 측정 결과로부터 얻은 어닐링 온도에 따른 전기적 특성변화(Resistivity, Mobility 그리고 Carrier Concentration)에 대해 나타내고 있다.(어닐링 시간은 5분으로 고정) 어닐링 온도가 500°C인 샘플의 경우, 저항값이 매우 커서 전기적인 특성을 측정할 수 없었다. 어닐링 온도가 증가함에 따라 Resistivity와 Mobility는 감소하고 Carrier Concentration (전자농도; n-type)은 증가하고 있다. 또한 그림 2 (a)와 5 (a)로부터 전자 carrier 농도변화와 UV intensity 변화사이엔 큰 상관관계가 없음을 보여주고 있다. H.S. Kang의 연구그룹^[13]에서는 PLD 방법으로 증착된 ZnO 박막의 경우 어닐링 온도가 증가함에 따라 Resistivity는 증가하고 Carrier Concentration은 감소하며 전자 carrier 농도

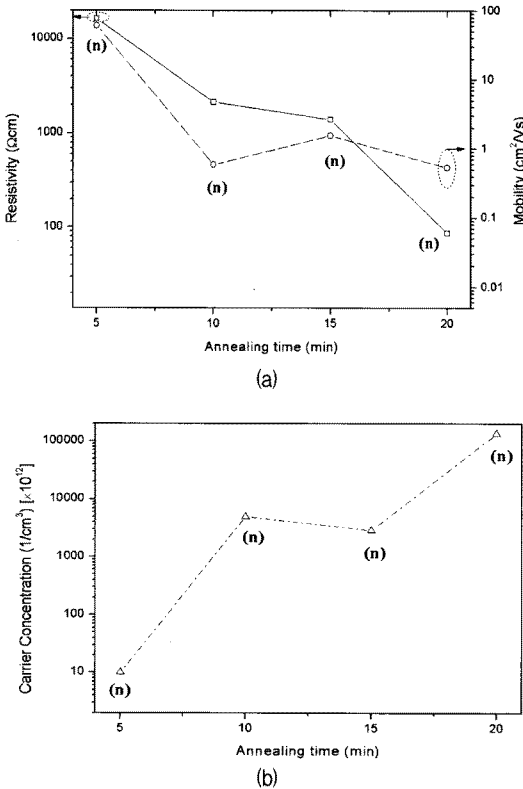


그림 6. 어닐링 시간에 따른 전기적인 특성(어닐링 온도 = 600°C); (a) Resistivity, Mobility, (b) Carrier Concentration
 Fig. 6. Electrical property as a function of annealing time (annealing temp. = 600°C); (a) Resistivity, Mobility, (b) Carrier Concentration.

변화는 UV intensity 변화와 비례한다고 보고하고 있다. H.S. Kang의 실험결과와 우리 실험결과를 비교하였을 때 상반되는 결과를 보였는데, 이것은 우리의 경우 rf 마그네트론 스퍼터링의 다른 방법으로 증착한 ZnO 박막을 어닐링하면 증가하는 열에너지로 O 원자는 격자구조로부터 계속적으로 손실되어 defect 농도를 증가시켜 비저항 및 이동도를 감소시키고 Carrier Concentration이 증가한 것으로 볼 수 있다. 그림 2(b)와 그림 5(b)로부터 어닐링 온도가 증가함에 따라 전자 Concentration이 증가하고 d-spacing은 계속해서 감소하는 것을 볼 수 있다. d-spacing의 지속적인 감소는 어닐링 온도의 증가에 따라서 ZnO 격자구조로부터 O 원자의 지속적인 유출을 뒷받침하고 있다 할 수 있다.

그림 6은 Hall 측정 결과로부터 얻은 어닐링 시간에

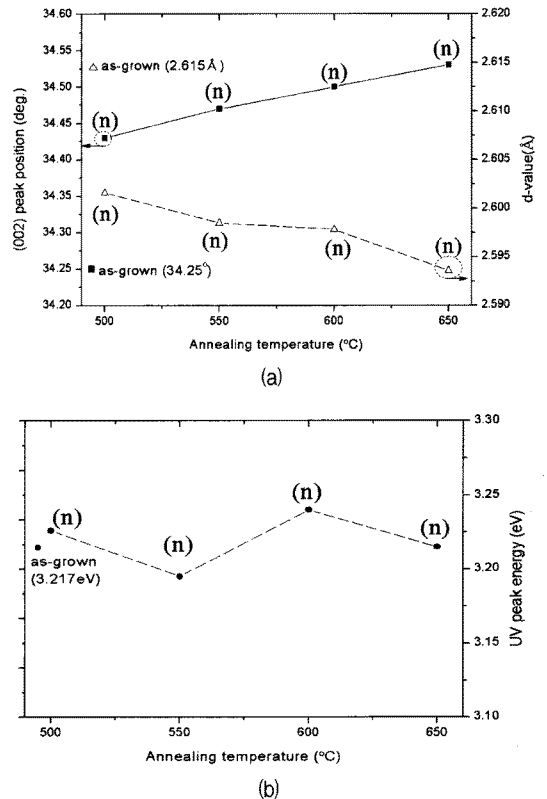


그림 7. 어닐링 온도에 따른 (a) 결정 구조((002) peak position, d-value) 및 (b) 광학특성(UV peak position)
 Fig. 7. (a) The crystal structure ((002) peak position, d-value) and optical property (UV peak position) as a function of annealing temperature.

따른 전기적 특성변화(Resistivity, Mobility 그리고 Carrier Concentration)에 대해 나타내고 있다(어닐링 온도는 600°C로 고정). 어닐링 시간이 증가함에 따라 Resistivity와 Mobility는 전반적으로 감소하고 전자 Concentration(n-type)은 증가하고 있다. 그림 5, 그림 6은 어닐링 온도나 시간에 따라 전기적인 특성변화(Resistivity와 Mobility 감소, Carrier Concentration 증가)가 유사하게 진행되는 것을 볼 수 있다. 이 결과에 대한 이유는 앞의 어닐링 온도에 따른 전기적인 특성 변화에서 언급하였으나 좀 더 연구가 필요할 거라 생각된다.

그림 7은 어닐링 온도에 따른(어닐링시간 = 5분) 결정구조의 특성((002) peak position, d-value)과 광학적

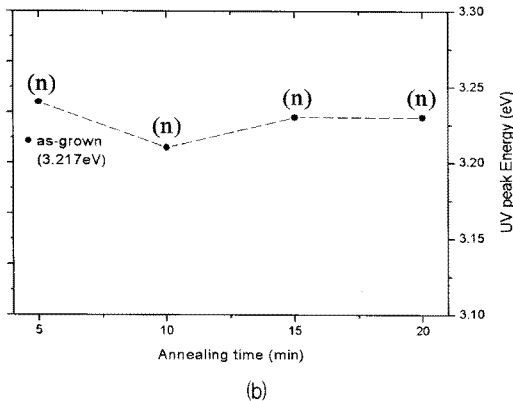
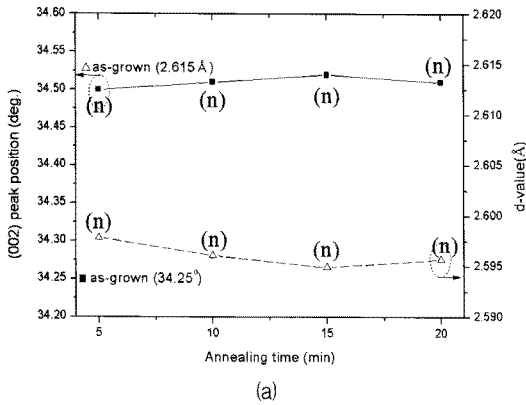


그림 8. 어닐링 시간에 따른 (a) 결정 구조((002) peak position, d-value) 및 (b) 광학특성(UV peak position)

Fig. 8. (a) The crystal structure and optical property as a function of annealing time (a) (002) peak position, d-value, (b) UV peak position.

인 특성(UV peak position)변화에 대해 나타내고 있다. as-grown에서 어닐링을 수행하였을 때 (002) peak position은 증가하였고 d-value는 감소하였으며, UV peak position은 약간 증가하였다. 또한 어닐링 온도가 증가하면서 (002) peak position은 증가하고 있고 d-value는 감소하고 UV peak position은 3.20~3.24 eV 범위의 값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 위의 결과로부터 어닐링 온도가 증가함에 따라 (002) peak position과 d-value는 서로 반비례 관계에 있음을 알 수 있는데 이는 어닐링온도의 증가에 따라서 ZnO 격자구조로부터 O원자의 계속적인 유출이 진행되고 defect 농도를 증가시켜 전자농도를 증가시키는 결과를 뒷받침하고 있다. 또한 3.20~3.24 eV 범위의 UV peak 위치는 ZnO 박막이 n-type을 갖는다는 것을 의미하며 이는 Hall 결과와 잘 일치하고 있다. 여기서 n-type을 대표로 하는 donor defects(Vo 및 Zni)와 관계되는 donor neutral bound exciton (D⁰X)의 에너지의 범위는 3.21-3.24 eV^[14] 이므로 3.20 - 3.24eV 범위의 UV peak 위치는 ZnO 박막이 n-type을 갖는다는 것을 의미한다.

그림 8은 어닐링 시간에 따른(어닐링온도 = 600°C) 결정구조의 특성((002) peak position, d-value)과 광학적인 특성(UV peak position)에 대해 나타내고 있다. 어닐링 시간이 증가함에 따라 (002) peak position은 약간 증가하고, d-value는 약간 감소하며 UV peak position은 3.21~3.24 eV 범위의 유사한 값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 변화의 폭이 작은 것을 제외하고는 그림 7의 결과와 유사하다고 할 수 있다.

IV. 결 론

여기에 본 연구에서는 0.2 O₂ fraction 조건에서 증착된 undoped ZnO 박막을 가지고 어닐링 온도(500°C ~ 650°C)와 어닐링 시간(5분~20분)에 대해 변화를 주어가며 실험을 진행하였고 결정구조((002) intensity, FWHM, d-spacing, grain size, (002) peak position)와 광학적(UV peak, UV peak position), 전기적인 특성(전자농도, 비저항, mobility)에 대해 어떻게 상관관계가 이루어지는지 분석하였다. 어닐링 온도변화에 따라 다음과 같은 관계가 있음을 확인하였다. (1) UV intensity, (002) intensity, grain size 사이에는 서로 비례관계가 성립한다. (2)UV intensity는 FWHM와 반비례한다. (3) UV intensity는 전자농도와 큰 상관관계가 없다. (4)

d-spacing과 (002) peak position은 반비례 관계에 있다. (5) 3.20~3.24 eV 범위의 UV peak position은 ZnO 박막이 n-type 특성을 가진다는 것을 의미하며 이는 전기적인 특성에서의 결과와 일치한다. (6) 600°C의 어닐링 온도에서 광학적인 특성이 가장 우수하고 결정구조가 가장 좋은 결과를 얻었다.

그리고 어닐링 시간변화에 대해서도 다음과 같은 결론을 얻었다. (1) UV intensity와 grain size는 서로 비례 관계에 있다. (2) UV intensity는 FWHM과 반비례 관계에 있다. (3) 20분에서 광학적 특성이 우수하였고 FWHM이 최소였으나 (002) intensity가 감소하였다. (4) d-spacing과 (002) peak position은 반비례 관계에 있다. (5) UV intensity는 전자농도와 큰 상관관계가 없다. (6) 3.21~3.24 eV 범위의 UV peak position은 ZnO 박막이 n-type 특성을 가진다는 것을 의미하며 이는 전기적인 특성에서의 결과와 일치한다는 것을 얻었는데 좀 더 많은 연구가 필요한 것으로 판단된다.

참고 문헌

[1] S. J. Pearton, D. P. Norton, K. Ip, Y. W. Heo, and T. Steiner, Prog in Materials Science. 50, 293(2005).
 [2] S. B. Zhang, S. H. Wei, and Alex Zunger, Phys Rev B. 63, 075205 (2001).
 [3] F. Oba, S. R. Nishitani, S. Isotani, and H. Adachi, J. Appl. Phys. 90, 824 (2001).
 [4] Anderson Janotti and Chris G. Van de Walle, Appl. Phys. Lett. 87, 122102 (2005).
 [5] D. J. Chadi, Phys. Rev. B. 59, 15181 (1999).
 [6] T. M. Barnes, K. Olson, and C. A. Wolden, Appl. Phys. Lett. 86, 112112 (2005).
 [7] S. Limpijumnong, S. B. Zhang, S. H. Wei, and C. H. Park, Phys. Rev. Lett. 92, 155504 (2004).
 [8] Y. R. Ryu and T. S. Lee, J. H. Leem, Appl. Phys, Lett. 83, 4032 (2003) .
 [9] G. Xiong, J. Wilkinson, B. Mischuck, S. Tuzemen, K. B. Ucer and, R. T. Williams, Appl. Phys. Lett. 80, 1195 (2002).
 [10] Y. Chen, F. Jiang, L. Wang, C. Mo, Y. Pu, W. Fang, J. Crys. Grow. 268, 71 (2004).
 [11] B. D. Cullity, Elements of X-ray diffraction (Addison-Wesley, Massachusetts, 1978), p. 102.
 [12] E.-J. Yun, H.-S. Park, K. H. Lee and H. G. Nam, "Characterization of Undoped ZnO Films

Post-Annealed by Using Helium Gas" J. Korean Phys. Soc. 54, 825 (2009).
 [13] H. S. Kang, G. H. Kim, S. H. Lim, and H. W. Chang, J. H. Kim, S. Y. Lee, Thin Solid Films (2007), doi:10.1016/j.tsf.2007.08.084.
 [14] E.-J. Yun, H.-S. Park, K.-H. Cha, K. H. Lee, N.-I. Cho and H. G. Nam, "Effect of Hydrogen Peroxide on the Stability of Undoped p-type ZnO Prepared by Magnetron Sputtering" J. Korean Phys. Soc. 52, 606 (2008).

저자 소개



윤 의 중(정회원)
 1985년 고려대학교 전자공학과 학사 졸업.
 1988년 U. of Texas, Austin, Electrical Engineering 석사 졸업.
 1994년 U. of Texas, Austin, Electrical Engineering 박사 졸업.

2009년 현재 호서대학교 시스템 제어공학과 교수
 1994년~1996년 미국 U. of Texas, Austin, 부설 Center for Magnetics Post-Doctor 연구원.
 2004년 9월~2005년 8월 미국 U. of Texas, Austin, 나노입자연구소 연구교수.
 <주관심분야 : RF 주파수에서 동작하는 미소자성소자의 개발, 자성체 나노입자 합성 및 개발, 고 에너지 전자빔 조사 및 plasma 처리에 의한 ZnO 특성 최적화와 ZnO 박막을 이용한 optoelectronic device 개발>



박 형 식(학생회원)
 2006년 호서대학교 정보 제어 공학과 학사 졸업.
 2008년 호서대학교 정보 제어 공학과 석사 졸업.
 2008년 한국원자력연구원 원자력 산업기술개발본부

2009년 현재 성균관대학교 전기전자컴퓨터 공학과 박사과정
 <주관심분야 : TFT, 태양전지, ZnO, NVM>