

논문 2010-47SD-1-2

기판온도 및 박막두께가 Ga-doped ZnO 박막의 특성에 미치는 영향

(Effects of The Substrate Temperature and The Thin film Thickness
on The Properties of The Ga-doped ZnO Thin Film)

조원준*, 강성준**, 윤영섭***

(Won Jun Cho, Seong Jun Kang, and Yung Sup Yoon)

요약

본 연구에서는 RF 마그네트론 스퍼터링 법으로 Eagle 2000 유리 기판 위에 Ga-doped ZnO (GZO) 박막을 제작하여, 기판온도 100~400 °C 및 박막두께에 따른 박막의 결정화 특성과 전기적 및 광학적 특성을 조사하였다. 공정조건에 상관없이 모든 GZO 박막은 c-축 배향성을 나타내는 (002) 회절 피크만이 관찰되었고, 300 °C에서 400 nm 증착한 GZO 박막이 가장 우수한 결정성을 나타내었으며, 그 때의 반가폭 값은 0.4°이었다. 또한, AFM 으로 박막의 표면형상을 분석한 결과 300 °C에서 400 nm 증착한 박막에서 비교적 입자가 고르고 치밀한 박막이 형성되었다. 전기적 특성은 홀 측정 결과 300 °C에서 400 nm 증착한 박막에서 가장 낮은 비저항 ($8.01 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$)과 가장 높은 전자 캐리어농도 ($3.59 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$)를 나타내었다. 모든 GZO 박막은 공정조건에 무관하게 가시광 영역에서 80 %의 투과율을 나타내었으며, 기판온도 및 박막두께 증가에 따른 Ga 도핑효과의 증가로 밴드 갭이 넓어지는 Burstein-Moss 효과가 관찰되었다.

Abstract

In this study, Ga-doped ZnO (GZO) thin films have been fabricated on Eagle 2000 glass substrates at various substrate temperatures 100~400 °C and thin film thickness by RF magnetron sputtering in order to investigate the structural, electrical, and optical properties of the GZO thin films. It is observed that all the thin films exhibit c-axis orientation and a (002) diffraction peak only. The GZO thin films, which were deposited at T=300 °C and 400 nm, shows the highest (002) orientation, and the full width at half maximum (FWHM) of the (002) diffraction peak is 0.4°. AFM analysis shows that the formation of relatively smooth thin films are obtained. The lowest resistivity ($8.01 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$) and the highest carrier concentration ($3.59 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$) are obtained in the GZO thin films deposited at T=300 °C and 400 nm. The optical transmittance in the visible region is approximately 80 %, regardless of process conditions. The optical band-gap shows the slight blue-shift with increase in doping which can be explained by the Burstein-Moss effect.

Keywords : Ga-doped ZnO, RF Sputtering, Resistivity, Carrier Concentration, Transmittance

I. 서론

최근 신재생 에너지로 주목 받고 있는 태양광 산업과

평판 디스플레이 산업의 확대에 의하여 전기 전도성 및 광 투과율이 우수한 투명 전도막에 대한 연구가 각광을 받고 있다. 현재 주로 사용되고 있는 투명 전도막 재료는 ITO (Indium tin oxide)로서 우수한 전기적·광학적 특성으로 인하여 대부분의 응용분야에 광범위하게 적용되어 왔으나, 인듐의 희소성으로 인한 가격상승 및 수소 플라즈마에 노출 시 열화 되는 단점을 가지고 있기 때문에 대체물질로서 불순물을 도핑한 ZnO 계 TCO 박

* 학생회원, *** 정회원, 인하대학교 전자공학과
(Dept. of Electronics Engineering, Inha University)

** 정회원, 전남대학교 전기 및 반도체공학과
(Dept. of Electrical and Semiconductor Engineering,
Chonnam National University)

접수일자: 2009년6월26일, 수정완료일: 2009년12월1일

막이 많이 연구되고 있다.

ZnO는 II-VI 화합물 반도체로 hexagonal wurtzite 구조이며 3.3 eV의 넓은 밴드갭 에너지를 가지는 직접형 반도체이다. 또한 산소공공과 침입형 아연으로 인한 구조적인 결함을 가지고 있어 전형적인 n형 반도체 특성을 나타낸다. 불순물이 도핑되지 않은 ZnO는 낮은 캐리어 농도로 인하여 큰 비저항 특성을 보이지만 Al, Ga, B과 같은 3족 원소를 도핑해 전기적 및 광학적 특성을 효과적으로 개선할 수 있다. 이 중에서도 Ga (0.62Å)은 이온 반경이 Zn (0.74Å)와 비슷하기 때문에 높은 농도의 Ga를 불순물로 주입하는 경우에도 격자 결함을 최소화 시키며 높은 캐리어 밀도를 얻는 데 용이하기 때문에 전도성을 향상시킬 수 있어, 투명 전도막의 대체 물질로서 주목받고 있다.^[1-3]

현재 GZO 박막을 제작하기 위한 방법으로는 sputtering 법^[4-5], chemical vapor deposition 법^[6], sol-gel 법^[7], pulse laser deposition 법^[8], spray pyrolysis 법^[9] 등이 사용되고 있다. 이 중 sputtering 법은 대면적 증착이 가능하고, 공정변수 조절이 용이하여 박막의 미세구조를 쉽게 변화시킬 수 있는 장점을 가지고 있어 많은 연구에서 활용되고 있다.

ZnO 계 박막을 투명 전도막으로 이용하기 위해서는 TCO의 기본조건인 $10^{-4} \Omega\text{cm}$ 대의 전기적 특성과 가시광 영역에서 80% 이상의 투과율을 달성해야 한다. 이에 따라 대체물질에 대한 다양한 증착 기술과 공정 변수에 대한 세부적인 연구가 좀 더 체계적으로 수행되어야 할 필요성이 증대하고 있다.

본 연구에서는 RF magnetron sputtering 법을 사용하여 기판온도 및 박막두께에 따른 GZO 박막의 구조적, 전기적 및 광학적 특성을 조사하여 투명 전자소자의 응용 가능성을 조사해 보고자 하였다.

II. 실험 방법

GZO 박막은 RF magnetron sputtering 방법을 이용하여 20×20 mm 크기의 Eagle 2000 유리 기판에 증착하였다. Sputter 챔버의 초기 진공은 2×10^{-6} Torr 까지 형성하였고, Ga이 도핑된 2 인치 1/4 세라믹 타겟 (Ga₂O₃ : 5 wt %, ZnO : 95 wt %)을 사용하였다.

RF power는 60 W, 공정 압력은 1 mTorr, 공정 중에 아르곤과 산소 가스비는 97.5 % : 2.5 %로 유지하였다. 기판온도에 대한 실험은 100 ~ 400 °C로 기판온도를

변화 시키며 진행하였다. 또한 박막 두께에 따른 전기적·광학적 특성의 최적조건 ($\sim 10^{-4} \Omega\text{cm}$, 80 % 범위에 드는 조건)을 찾기 위해 300 °C에서 증착시간을 5 ~ 15 분으로 변화시켜 실험을 진행하였다.

본 실험에서 GZO 박막의 구조적 특성을 분석하기 위해 X-Ray Diffractometer (XRD, Philips, PW3020)를 사용하였고, Atomic Force Microscope (VG, MicroLab 310F, AFM)로 박막의 표면 상태를 조사하였다. 전기적 특성에는 van der Pauw 법을 이용한 Hall effect measurement (Accent, HL5500PC)을 이용하여 비저항, 캐리어 농도 및 이동도를 측정하였다. 광학적 특성은 UV/VIS spectro-photometer (Cary-500)로 투과도 스펙트럼 측정을 실시하였다.

III. 결과 및 논의

그림 1 (a)와 (b)는 기판온도의 변화 및 박막두께에 따른 GZO 박막의 XRD 패턴을 나타낸 것이다.

모든 GZO 박막은 기판에 수직으로 c-축 성장 하였으며 (002) peak 만이 관찰되었다. 그림 1 (a)에서 보듯이, 기판온도가 100 °C에서 300 °C로 증가함에 따라 결정성이 향상되어 (002) peak 의 크기가 증가하고, 반가폭의 값은 1.94°에서 0.4°로 줄어드는 경향을 나타내고 있다. 이는 기판온도가 증가할수록 기판위에 도달한 흡착 원자들이 충분한 에너지를 얻고 확산을 하여 결정성이 개선되었기 때문이다. 그러나 기판온도 400 °C가 되면 (002)피크의 세기는 감소하고 반가폭 값도 0.42°로 다시 증가하는데, 이는 기판온도가 너무 높은 경우 박막과 기판의 열팽창계수 차이로 인한 결정성의 저하 때문이라고 생각된다. 그림 1 (b)에서 보듯이, 박막두께가 증가함에 따라, (002) 회절 피크의 세기는 더 커지고, 반가폭 값이 0.52°에서 0.4°로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 박막두께가 증가함에 따라 결정크기의 증가와 박막내의 응력 감소로 인한 결정성의 개선으로 설명할 수 있다.^[10]

그림 2는 GZO 박막의 XRD 패턴으로부터 (002) 피크의 회절각 변화와 c 축 격자상수를 나타낸 것이다. 그림 2 (a)에서 보듯이, 기판온도가 100 °C에서 300 °C로 증가함에 따라 (002) 피크의 회절각은 34.03°에서 34.43°로 증가하고 400 °C 까지 거의 같은 값을 유지하였다. GZO 박막은 Bragg law을 이용하여 (002) 회절 피크의 위치로부터 c 축 격자상수를 계산할 수 있다.^[11]

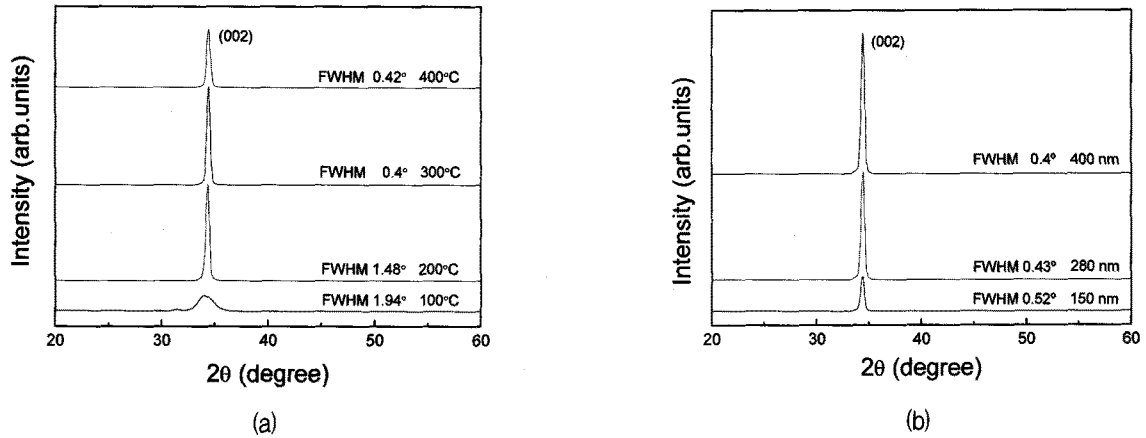


그림 1. GZO 박막의 XRD 패턴
 (a) 기판온도 (b) 박막두께
 Fig. 1. The XRD patterns of the GZO thin films.
 (a) Substrate temperature (b) Thin film thickness.

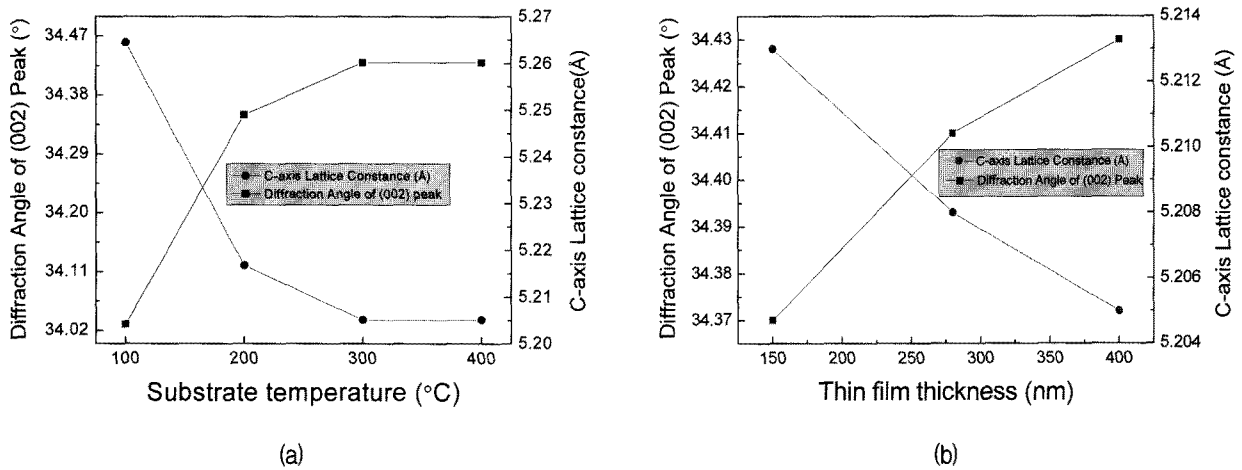


그림 2. GZO 박막의 (002) peak 회절각 및 c축 격자상수
 (a) 기판온도 (b) 박막두께
 Fig. 2. Diffraction angle of (002) peak and the value of the c-axis lattice constant the GZO thin films.
 (a) Substrate temperature (b) Thin film thickness

GZO 박막의 c 축 격자상수는 기판온도가 100 °C에서 300 °C로 증가함에 따라 5.264 Å에서 5.205 Å 으로 감소하며 400 °C에서는 거의 같은 값을 유지하였다. 이는 Ga³⁺ (0.62Å)는 Zn²⁺ (0.74Å)와 비슷한 이온 반경을 가지고 있어 기판온도가 증가함에 따라 Zn 원자들 자리에 Ga 원자들이 효과적으로 치환되어 c 축 격자상수가 감소되었기 때문이다.^[12] 그림 2 (b)에서 보듯이, 박막두께가 증가함에 따라, 회절각이 34.37°에서 34.43° 으로 증가한다. Bragg law 에 의하면 결정면간 거리 감소에 비례하여 회절각이 증가하는데, 이는 박막두께가 증가함에 따라 더 많은 Ga³⁺ 원자들이 Zn²⁺ 원

자들 자리에 치환되고 이로 인해 격자 상수가 줄어들기 때문이다.^[13]

그림 3은 기판온도를 100 °C에서 400 °C로 변화시켜 가며 제작한 GZO 박막의 AFM 사진을 나타낸 것이다. 그림 3에서 보듯이, 기판온도가 증가할수록 GZO 박막의 표면 거칠기가 감소하는 경향을 보였고, 300 °C에서 4.877 nm로 가장 작은 값을 나타냈다. 이는 기판온도가 증가함에 따라 원자들의 이동도가 향상되어서 기판의 표면에너지가 낮은 쪽으로 많은 확산이 일어나 균일한 박막이 형성되었기 때문이다.^[14] 그러나 400°C에서는 표면 거칠기가 6.011 nm로 다시 증가하는데, 이는 과도한

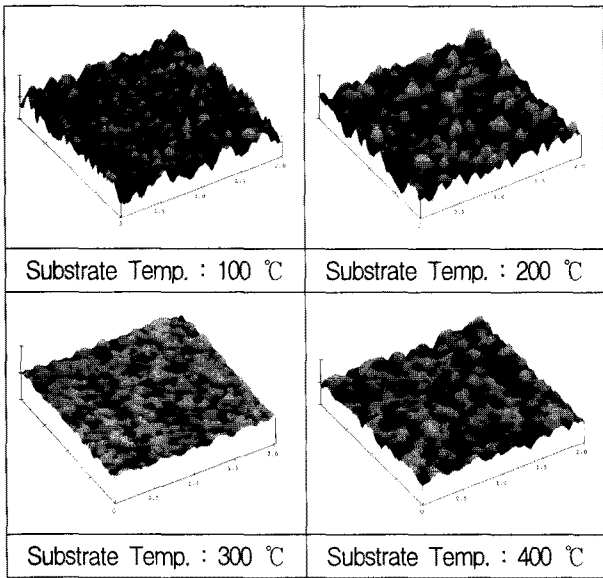


그림 3. 기판온도에 따른 GZO 박막의 AFM 이미지
Fig. 3. AFM images for the GZO thin films fabricated with various substrate temperatures.

열에너지의 공급으로 인한 Zn의 휘발로 표면 상태가 열악해지기 때문이다.

그림 4 (a)와 (b)는 기판온도 및 박막두께의 변화에 따른 GZO 박막의 비저항, 이동도 및 캐리어 농도를 van der Pauw 법으로 측정된 결과를 나타낸 것이다. 그림 4 (a)에서 보듯이, 기판온도가 증가할수록 비저항 값은 감소하고 캐리어 농도 값은 증가하는 추세를 나타낸다. 기판온도 300 °C에서 $8.01 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ 로 가장 낮은 비저항 값과 $3.59 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 의 가장 큰 캐리어 농도 값을 나타내었다. 이는 기판온도 증가에 따라 활성화된 Ga 원자들의 증가로 인해 결정립에서 캐리어의 산란이 크게 감소하고, 산소 분리의 촉진으로 인해 Ga^{3+} 가 Zn^{2+} 를 효과적으로 치환해 더 많은 도너를 제공하기 때문인 것으로 생각된다. 하지만 300 °C 이상의 기판온도에서 캐리어 농도가 감소하는데, 이는 흡착된 산소들의 증가로 발생한 전자트랩 때문으로 생각된다.^[15] 캐리어 이동도는 기판온도가 증가함에 따라 300 °C까지 증가하는데, 이는 결정립의 크기가 증가하여 박막 표면의 결정립에서 산란이 줄고, 캐리어의 수명이 늘어났기 때문이다. 그림 4 (b)는 기판온도 300 °C에서 박막 두께에 따른 GZO 박막의 전기적 특성 변화에 따른 영향을 나타낸 것이다. 캐리어 농도는 박막의 두께가 150 nm 일 때 $1.54 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 에서 400 nm 일 때 $3.59 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 로 증가하였다. 박막두께가 대략 400 nm 일 때 캐리어 농도가 안정화 되는 경향을 보이는데, 이는

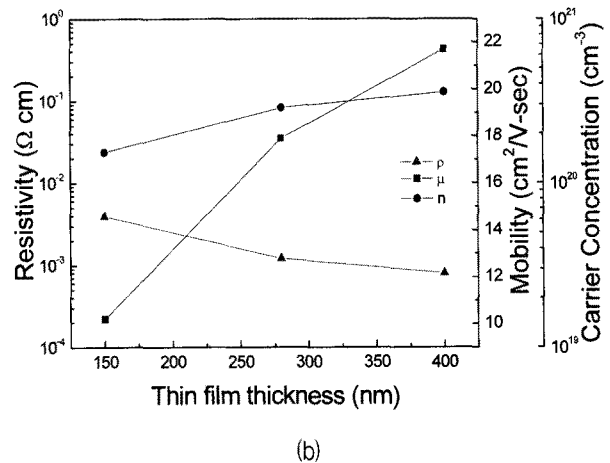
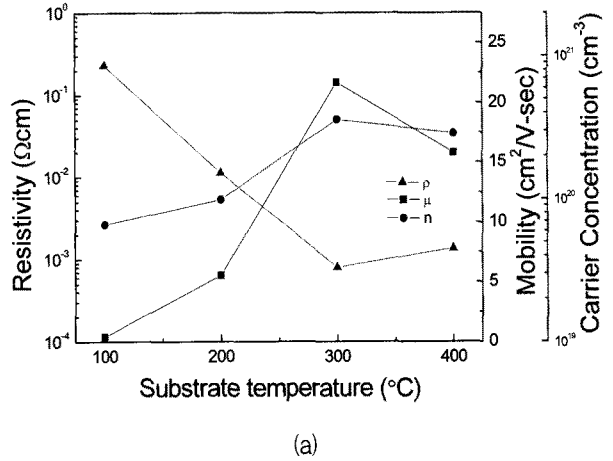


그림 4. GZO 박막의 비저항, 이동도 및 캐리어 농도
(a) 기판온도 (b) 박막두께
Fig. 4. Resistivity, mobility and carrier concentration of the GZO thin films.
(a) Substrate temperature (b) Thin film thickness

Xuhu^[5]의 연구 결과와 유사하다. 캐리어 이동도 역시 박막두께가 증가함에 따라 박막의 두께가 150 nm 일 때 $10.2 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 에서 400 nm 일 때 $21.7 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 로 증가하게 되는데, 박막의 두께가 증가함에 따라 결정립 산란이 줄어들 뿐만 아니라 캐리어 수명이 연장되기 때문이라고 생각된다.^[5] Shuang^[13] 등의 연구에서도 박막의 두께에 따른 결정성에 향상이 캐리어 농도 보다는 캐리어 이동도에 훨씬 큰 영향을 미친다고 보고되어 있다. 비저항은 캐리어 농도와 이동도에 반비례 하여 박막두께가 늘어남에 따라 감소하는데, 이는 앞의 XRD의 결과에서 확인한 것처럼 기판온도와 박막두께의 증가에 따른 결정성의 향상으로 생각된다. 또한 박막 두께에 따른 비저항과의 관계를 다음 수식으로 표현할 수 있

다.^[17]

$$\frac{\rho_f}{\rho_o} = 1 + \frac{3}{8K} \quad (K \gg 1) \tag{1}$$

$$\frac{\rho_f}{\rho_o} = \frac{4}{3K \ln \frac{1}{K}} \quad (K \ll 1) \tag{2}$$

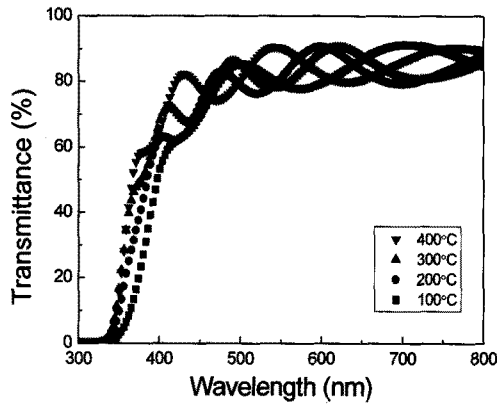
여기서, ρ_f 는 박막의 비저항, ρ_o 은 벌크 비저항, K 는 줄어든 박막의 두께 (K =박막의 두께 / 벌크 재료에서의 전하 캐리어 평균 자유 행정)를 나타낸다. 수식 (1)과 (2)로부터 박막의 두께가 얇을 때 더 큰 비저항의 감소를 확인할 수 있는데, 이는 그림 4 (b)의 그림에서 보듯이 박막두께의 증가에 따른 비저항의 감소 경향과 일치한다.

그림 5 (a)와 (b)는 기판온도 및 박막두께에 따른 GZO 박막의 투과도를 나타낸 것이다. GZO 박막은 기판온도에 상관없이 가시광 영역 (400~700nm)에서 평균 80%의 투과율을 가지며 박막 두께 효과에 의한 간섭현상에 의해 투과도 스펙트럼이 진동하는 것으로 보인다. 기판온도 100~300 °C 및 박막두께가 증가함에 따라 흡수단이 단파장대로 이동하는 Blue-shift 가 관찰되었다.

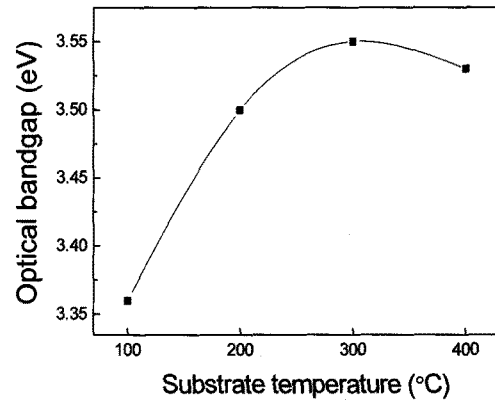
ZnO는 직접 천이형 반도체이므로 다음 관계식을 이용하여 에너지 밴드 갭을 구할 수 있다.^[4]

$$(\alpha hv) = A(hv - E_g)^{1/2} \tag{3}$$

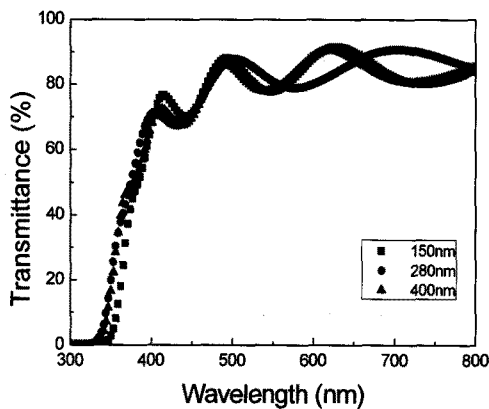
여기서, A 는 상수, h 는 플랑크 상수, v 는 입사광자의 주파수이다. 또한, 흡수 계수 α 는 투과율 (T)과 박막의



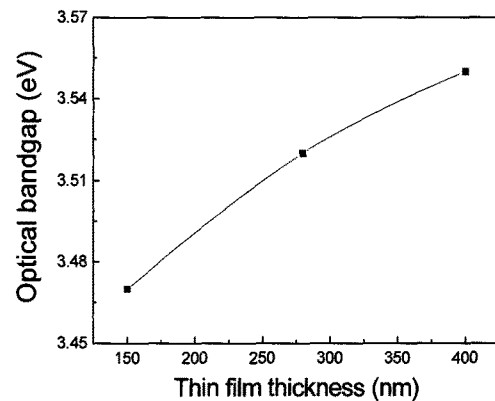
(a)



(a)



(b)



(b)

그림 5. GZO 박막의 투과도 스펙트럼

(a) 기판온도 (b) 박막두께

Fig. 5. Transmittance spectrum of the GZO thin films. (a) Substrate temperature (b) Thin film thickness

그림 6. GZO 박막의 광학적 밴드 갭

(a) 기판온도 (b) 박막두께

Fig. 6. Optical band-gap of the GZO thin films. (a) Substrate temperature (b) Thin film thickness

두께 (d)를 이용한 다음의 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$T = \exp(-\alpha d) \quad (4)$$

그림 6 (a)와 (b)는 기판온도 및 박막두께에 따른 GZO 박막의 광학적 밴드 갭을 나타낸 것이다. 그림 6 (a)에서 보듯이, 기판온도가 증가함에 따라 광학적 밴드갭 에너지가 증가하여 300 °C에서 최대값 3.55 eV 를 나타낸다. 또, 그림 6 (b)에서 보듯이, 박막두께가 증가함에 따라 광학적 밴드갭 에너지는 3.47 eV에서 3.55 eV 로 증가하였다. Burstein-Moss 효과에 의하면 밴드갭 에너지의 증가는 캐리어 농도와 밀접한 관계를 가지고 있다. 10^{20} cm^{-3} 이상의 전자농도를 가지고 있는 GZO 박막에서 페르미 레벨은 전도대역을 넘어서게 되고 이로 인해 에너지 대역이 확장 된다. 광학적 밴드 갭의 확장은 다음 관계식으로 표현 될 수 있다.^[16]

$$\Delta E_g = \frac{\hbar^2}{8m^*} \left(\frac{3}{\pi} \right)^{2/3} N_e^{2/3} \quad (5)$$

여기서 ΔE_g 는 에너지 밴드갭의 변화량, \hbar 플랑크 상수 m^* 전도대역에서의 유효전자질량, N_e 전자 캐리어 농도이다. (5) 번 관계식으로부터 기판온도 100~300 °C 및 박막두께가 증가할수록 Ga의 도핑효과가 현저하게 나타나 캐리어 농도가 증가함으로써 광학적 밴드갭의 확장에 직접적으로 영향을 주게 됨을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 GZO 박막을 제작하여 기판온도 및 박막두께에 따른 구조적, 전기적 및 광학적 특성을 조사 하였다. XRD 측정으로부터 300 °C에서 400 nm 증착한 GZO 박막이 가장 우수한 (002) 배향성을 나타내었으며 그 때의 반가폭 값은 0.4° 이었다. 또한 AFM 으로 박막의 표면형상 분석결과 비교적 입자가 고르고 치밀한 박막이 형성되었다. 전기적 특성을 조사한 결과, 300 °C에서 400 nm 증착한 GZO 박막이 가장 낮은 비저항 ($8.01 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$)과 가장 높은 캐리어 농도 ($3.81 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) 를 나타내었다. 광학적 특성으로는 모든 박막에서 80 %의 투과율을 나타내었으며 기판온도 100~300 °C 및 박막두께 증가에 따른 Ga 도핑효과의 증가로 밴드 갭이 넓어지는 Burstein-Moss 효과가 관찰되었다.

본 연구를 통해 RF magnetron sputtering 으로 제작

한 GZO 박막이 투명 전도막의 기본 조건을 만족하는 것을 확인할 수 있었다. 향후 저온 증착 공정 조건을 개발한다면 여러 투명 전자소자의 적용에서 GZO 박막이 ITO 를 대체할 수 있는 유망한 재료가 될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Q. B. Ma, Z. Z. Ye, H. P. He, L. P. Zhu, J. R. Wang, B. H. Zhao, "Influence of Ar/O2 ratio on the properties of transparent conductive ZnO: Ga films prepared by DC reactive magnetron sputtering", materials letters, vol. 61, pp. 2460-2463, 2007.
- [2] B. D. Ahn, S. H. Oh, C. H. Lee, G. H. Kim, H. J. Kim, S. Y. Lee, "Influence of annealing ambient on Ga-doped ZnO thin films", J. Crystal Growth, vol. 309, pp. 128-133, 2007.
- [3] J. H. Park, J. M. Shin, S. Y. Cha, J. W. Park, S. E. Jeong, "Deposition-Temperature Effects on AZO thin Films Prepared by RF Magnetron Sputtering and Their Physical Properties", J. Korean. Phys. Soc, vol. 49, pp. 584-588, 2006.
- [4] Q. B. Ma, Z. Z. Ye, H. P. He, L. P. Zhu, J. R. Wang, B. H. Zhao, "Structural, electrical, and optical properties of transparent conductive ZnO:Ga films prepared by DC reactive magnetron sputtering", J. Crystal. growth, vol. 304, pp. 64-68, 2007.
- [5] X. Yu, J. Ma, F. Ji, Y. Wang, C. Cheng, H. Ma, "Thickness dependence of properties of ZnO:Ga films deposited by rf magnetron sputtering", applied. surface. science, vol. 245, pp. 310-315, 2005.
- [6] J. J. Robbins, J. Harvey, J. Leaf, C. Fry, C. A. Wolden, "Transport phenomena in high performance nanocrystalline ZnO:Ga films deposited by plasma-enhanced chemical vapor deposition", Thin Solid Films, vol. 473, pp. 35-40, 2005.
- [7] K. Y. Cheong, N. Muti, S. R. Ramanan, "Electrical and optical studies of ZnO:Ga thin films fabricated via the sol-gel technique", Thin Solid Films, vol. 410, pp.142-146, 2002.
- [8] X. Chen, W. Guan, G. Fang, X. Z. Zhao, "Influence of substrate temperature and post-treatment on the properties of ZnO:Al thin films prepared by pulsed laser deposition", applied. surface. science, vol. 252, pp. 1561-1567, 2005.

- [9] A. R. Babar, P. R. Deshamukhl, R. J. Deokatel, D. Haranath, C. H. Bhosalel, K Y Rajpure, "Gallium doping in transparent conductive ZnO thin films prepared by chemical spray pyrolysis", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 41, pp. 135404, 2008.
- [10] B. Z. Dong, G. J. Fang, J. F. Wang, W. J. Guan, X. Z. Zhao, "Effect of thickness on structural, electrical, and optical properties of ZnO:Al films deposited by pulsed laser deposition", *J. Appl. Phys.*, vol. 101, pp. 033713, 2007.
- [11] F. K. Shan, B. I. Kim, G. X. Liu, J. Y. Sohn, W. J. Lee, B. C. Shin, Y. S. Yu, "Blueshift of near band edge emission in Mg doped ZnO thin films and aging", *J. Appl. Phys.*, vol. 95, pp. 4772-4775, 2004.
- [12] H. H. Shin, S. J. Kang, Y. S. Yoon, "Optical and Electrical Properties of Al-doped ZnO Thin Films Fabricated by Sol-gel Method with Various Al Doping Concentrations and Annealing Temperatures", *대한전자공학회, 제 44 권 SD 편 제 5 호*, 2007.
- [13] S. Liang, X. Bi, "Structure, conductivity, and transparency of Ga-doped ZnO thin films arising from thickness contributions", *J. Appl. Phys.*, vol. 104, pp. 113533, 2008.
- [14] S. J. Lee, H. W. Yoon, B. S. Kim, S. G. Lee, M. W. Park, D. J. Kwak, "Characterization of ZnO:Al Transparent Conduction Films produced by DC Magnetron Sputtering Method", *대한금속·재료학회지*, vol. 42, No. 9, 2004.
- [15] Q. B. Ma, Z. Z. Ye, H. P. He, L. P. Zhu, W. C. Liu, Y. F. Yang, L. Gong, J. Y. Huang, Y. Z. Zhang, B. H. Zhao, "Highly near-infrared reflecting and transparent conducting ZnO : Ga films : substrate temperature effect" *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 41, pp. 055302, 2008.
- [16] S. S. Lin, J. L. Huang, D. F. Lii, "The effect of thickness on the properties of Ti-doped ZnO films by simultaneous r.f. and d.c. magnetron sputtering", *Surf. Coat. Tech.*, vol. 190, pp. 372-377, 2005.
- [17] K. H. Kim, K. C. Park, D. Y. Ma, "Structural, electrical and optical properties of aluminum doped zinc oxide films prepared by radio frequency magnetron sputtering", *J. Appl. Phys.*, vol. 81, pp. 7764-7772, 1997.

저 자 소 개



조 원 준(학생회원)
 2007년 명지대학교
 전자공학과 학사졸업.
 2007년~현재 인하대학교
 전자공학과 석사 과정.
 <주관심분야 : 투명전도막, LED>



강 성 준(정회원)
 1989년 인하대학교
 응용물리학과 학사 졸업.
 1994년 인하대학교
 전자재료공학과 석사졸업.
 1999년 인하대학교
 전자재료공학과 박사졸업.
 1999년~2000년 인하대학교 전자재료공학과
 연구원 (Post Doc.)
 2000년~현재 전남대학교 전기 및 반도체공학과
 <주관심분야 : 나노 반도체 공정, 차세대 메모리
 소자, 압전박막, 광소자>



윤 영 섭(정회원)
 1975년 서울대학교
 금속공학과 학사 졸업.
 1977년 한국과학원
 재료공학과 석사 졸업.
 1988년 Univ. Southern California
 전자공학과 박사 졸업.

1987년~1988년 Oklahoma State University
 대우교수
 1988년~1989년 UCLA Device Research Lab.
 연구원
 1989년~1992년 삼성전자 기흥반도체연구소
 수석연구원
 1992년~현재 인하대학교 전자공학과 교수
 <주관심분야 : ULSI DRAM을 위한 신물질 개발,
 강유전성 박막, Pyroelectric 센서, SAW device>