

B, Al, Ga, In의 도핑물질이 투명 전도성 ZnO 박막의 특성에 미치는 영향

Effects of Different Dopants(B, Al, Ga, In) on the Properties of Transparent conducting ZnO Thin Films

노영우¹, 조종래¹, 손세모², 정수태^{1,a}
(Young-Woo No¹, Jong-Rae Cho¹, Se-Mo Son², and Su-Tae Chung^{1,a})

Abstract

The structural, optical and electrical properties of ZnO films doped with 1.5 at% of 3A materials(B, Al, Ga, In) were studied by sol-gel process. The films were found to be c-axis (002) oriented hexagonal structure on glass substrate, when post heated at 500 °C. The surface of the films showed a uniform and nano size microstructure and the crystalline size of doped films decreased. The lattice constants of ZnO:B/Al/Ga increased than that of ZnO, while ZnO:In decreased. All the films were highly transparent(above 90 %) in the visible region. The energy gaps of ZnO:B/Al/Ga were increased a little, but that of ZnO:In was not changed. The resistivities of ZnO:Al/Ga/In were less than 0.1 Ωcm. All the films showed a semiconductor properties in the light or temperature, however ZnO:In was less sensitive to it. A figure of merit of ZnO:In had the highest value of 0.025 Ω⁻¹ in all samples.

Key Words : ZnO, Thin film, Transparent, Figure of merit

1. 서론

투명 전도성 산화막(TCO)은 태양전지, LCD와 같은 광-전자소자의 전극용 물질이나 열차폐용 물질로 사용되며, 최근 이러한 물질의 응용이 확대됨에 따라서 TCO의 수요가 급속히 증가하였다. ZnO는 풍부한 천연자원으로 가격이 저렴하고, 화학적 기계적으로 매우 안정할 뿐만 아니라 넓은 에너지 갭(Eg >3 eV)을 갖는 n형 반도체 물질이다. 더욱이 ZnO 박막은 광학적으로 투과성이 좋고 전도성이 우수하므로 ITO 대체물질로 많은 연구자들이 정력적으로 연구를 하고 있다[1,2].

순수한 ZnO 박막의 전도성은 산소의 결함이나 과잉된 Zn이온의 입자치환에 의해서 나타나므로

그 특성이 매우 불안하다. 이러한 결점을 극복하고 높은 전도성을 얻기 위해서 도핑된 ZnO 박막이 유리하다. 주로 ZnO 박막의 도핑은 Zn(+2) 원자의 가전자 보다 높은 3가의 물질인 Al[3], B[4], Ga[2], In[5] 등이 사용된다. ZnO에 불순물의 치환은 도핑 물질과 ZnO 사이에 이온반경 또는 전자친화력의 차이에 따라서 결정구조나 결정성장 및 미세구조 등이 변화하며 전도성도 차이를 나타낸다[6,7].

본 실험에서는 졸겔 방법으로 3가 물질(B, Al, Ga, In)을 각각 도핑한 ZnO 박막을 만들어서 도핑 물질에 따른 ZnO 박막의 미세구조, 광학 및 전기적 특성을 조사하였다. 그리고 광 및 온도에 대한 저항률의 변화와 투명전도성 박막의 성능을 비교 검토하였다.

1. 부경대학교 전자공학과

(부산시 남구 대연3동 559-1)

2. 부경대학교 인쇄공학과

a. Corresponding Author : chungst@pknu.ac.kr

접수일자 : 2007. 10. 26

1차 심사 : 2008. 1. 7

심사완료 : 2008. 1. 24

2. 실험

ZnO 박막은 졸겔 방법으로 제작하였다. 출발 물질로는 zinc acetate dihydrate(ZnAc), 2-methoxy-

ethanol (2ME) 과 monoethanolamine (MEA)를 각각 용매와 안정제로 사용하였다. 도핑물질로 boric acid, aluminum nitrate nonhydrate, gallium(III) nitrate hydrate, indium(III) nitrate hydrate를 각각 사용하였다. 먼저 실온에서 2ME와 MEA를 섞어 용액을 만들었다. 그 용액에 ZnAc와 도핑물질 1.5 at.%을 각각 넣어 60 °C에서 2시간동안 교반하여 투명하고 균일한 용액을 만들었다. MEA와 ZnAc의 몰비는 1.0이고 ZnAc의 농도는 0.5 M이었다. 만들어진 용액은 실온에서 식히고 3일간 숙성시킨 뒤 사용하였다. 박막용 기판은 유리 기판(corning cover glass, 0.16 mm thick, 18 mm x 18 mm)을 사용하였다. 3000 rpm의 속도로 30초간 스핀코팅을 한 후에 300 °C에서 10분간 건조하였고, 이러한 과정을 10회 반복하였다. 이 시편을 500 °C에서 1시간 동안 공기 중에서 열처리를 하였고, 이것을 다시 수소 5 %를 포함한 질소 중에서 500 °C의 온도로 1시간 동안 열처리를 하였다. 박막의 결정 구조를 조사하기 위하여 X선 회절분석(Philips, X'Pert-MPD system)을 하였고, 표면과 단면의 상태를 관찰하기 위해 FE-SEM(JEOL, JSM-6700F), 광학적 특성 측정에는 UV-VIS(Shimadzu, UV-3150)를 각각 사용하였다. 그리고 저항률은 van-der-pauw 방법을 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 결정구조적 특성

그림 1은 ZnO 박막의 XRD 패턴을 나타낸 것이다. 도핑물질에 관계없이 모든 박막은 (002)면의 피이커만 나타났으며, hexagonal 구조의 ZnO 피이커(JCPDS 36-1451)와 잘 일치하였다. 이것은 본 실험에서 졸겔 법으로 만드는 ZnO 박막이 기판에 대해서 수직된 c축 방향으로 배향성을 가지며 잘 성장되었음을 의미한다. 그러나 (002)피이커의 크기와 위치는 도핑물질의 종류에 따라서 조금씩 차이를 보였다. 이러한 차이는 격자상수와 결정크기가 다르기 때문이다. XRD 결과에서 계산된 (002)면의 격자 상수, c는 표 1에 나타내었다. 그 결과 Zn(0.089 nm) 보다 이온 반경이 작은 B(0.025 nm), Al(0.057 nm), Ga(0.062 nm)을 도핑한 박막의 격자상수들은 순수한 ZnO 박막보다도 감소한 반면에 이온반경이 큰 In(0.092 nm)을 도핑한 박막에서는 증가함을 보였다[5]. 이것은 이온 반경이

작은 원소는 ZnO 속으로 침투되지만, 이온 반경이 큰 원소는 ZnO 입자 사이에 존재하기 때문이다. 그리고 XRD 패턴으로부터 박막의 평균 결정크기를 계산하기 위해서 다음과 같은 Scherrer 식으로 계산하였다. 여기서 $\lambda=0.15418 \text{ nm}$, β 는 (002) 피이커의 FWHM(radian), θ 는 Bragg 회절각이다.

$$d = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1)$$

(1)의 식으로 계산된 결정크기는 표 1에 나타내었는데, 도핑을 함으로써 결정크기가 감소되었다.

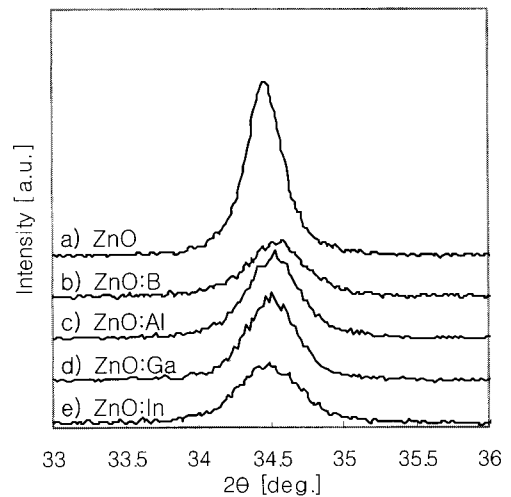


그림 1. 박막의 XRD 곡선.

Fig. 1. XRD patterns of films.

표 1. 시료의 격자상수와 결정크기(계산값).

Table 1. Lattice constant and crystalline size of films (calculated values).

sample	lattice const. c (nm)	crystallite size (nm)	
		XRD	FESEM
ZnO	52.0078	56	60
ZnO:B	51.8342	36	36
ZnO:Al	51.9078	40	33
ZnO:Ga	51.9743	40	38
ZnO:In	52.0108	31	40

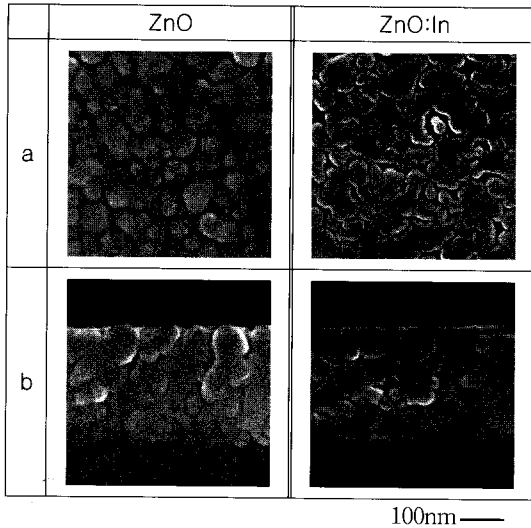


그림 2. 박막의 (a)표면과 (b)단면에 대한 SEM 사진.

Fig. 2. SEM micrographs for (a) surface and (b) cross section of films.

그림 2는 ZnO 및 ZnO:In 박막의 표면과 단면을 FESEM으로 관찰한 것이다(B, Al, Ga의 경우는 ZnO:In와 유사한 형태를 보였으므로 생략하였음). 모든 박막에서 입자가 균일하고 나노크기를 나타내었다. 순수한 ZnO 박막에서는 입자가 크게 성장되었으나, 도핑된 박막에서는 입자가 작음을 보여주고 있다. FESEM 사진에서 대각선법으로 계산된 결정크기를 표 1에 나타내었다. XRD나 FESEM의 결과로부터 도핑된 박막의 결정크기는 순수한 ZnO 박막보다 모두 작아짐을 보였다. 도핑한 박막에서 입자크기가 작은 이유는 ZnO의 이온반경과 도핑물질의 이온 반경 차이로 인하여 ZnO 입자가 응력을 받아서 입자 성장이 방해받기 때문이다[8]. 이러한 차이는 도핑한 ZnO 박막의 광 투과 특성에 영향을 클 것으로 생각된다.

그리고 ZnO 박막의 단면(250 nm의 두께)에서 결정의 성장은 모두 입자구조를 보였다. 일반적으로 박막물질과 기판사이의 격자상수가 다르기 때문에 기판 가까이에 있는 박막의 결정은 입자(grain)형태의 불규칙한 배열을 나타내지만, 성장되어가는 과정에서 결정구조는 (001)면으로 빠르게 배열된다. ZnO 박막은 스팟터 방법에서는 주로 주상(columnar) 구조[9]인 반면에 졸겔 방법에서는 도핑물질의 종류[6]나 열처리 온도[3]에 따라서 입자 또는 주상 구조를 가진다. 본 실험의 모든 박막

에서 입자 구조를 나타낸 것은 유리 기판과의 부정합에 기인하며 또한 열처리 온도가 500 °C인 점도 한 요인이라 생각한다(본 실험에서 사용한 유리 기판은 약 600 °C에서 형태가 일그러짐으로 인하여 그 자료를 얻지 못했으나, 그러나 동일 용액을 Si 웨이퍼 상에 코팅하여 700 °C에서 열처리한 ZnO:Al 시료는 주상구조가 됨을 확인하였다).

3.2 광학적특성

전도성 투명 박막은 광 투과 스펙트럼 특성이 매우 중요하다. 그림 3은 박막의 투과 스펙트럼 특성을 나타낸 것이다. 모든 시료는 370-390 nm (UV영역) 이하에서 거의 흡수된 반면에 그 이상의 파장에서는 투과율이 급격히 증가하였다. 가시광선 영역에서 ZnO 박막은 90 % 정도의 투과율을 가진 반면에 도핑한 시료에서는 약 95 % 이상의 높은 투과율을 나타내었다. 이러한 이유는 도핑한 박막의 결정입자가 순수한 ZnO의 박막 입자보다 작기 때문에 광 분산이 감소하였기 때문이다[5]. 이와 같이 ZnO 박막의 투과율은 박막의 두께, 표면거칠기[10] 도핑물질의 종류[6]나 량[9]에 따라서도 약간의 차이가 있지만 무엇보다도 박막의 열처리 온도가 중요한 변수가 된다. Xue 등[11]은 ZnO:Al 박막에서 열처리 온도가 600 °C에서 950 °C 까지 증가시킴에 따라서 가시영역에서의 투과율이 80 %에서 60 %로 감소함을 보고하였다. 그러므로 본 실험의 박막들이 투과율이 높은 이유는 열처리 온도가 500 °C로 낮기 때문이라 생각한다. 따라서 박막의 광 투과율을 높이기 위해서는 열처리 온도를 낮추는 것이 바람직하다.

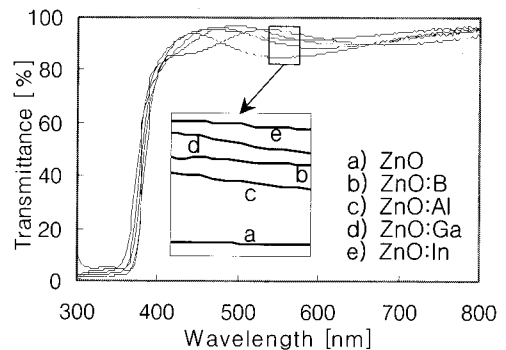


그림 3. 박막의 투과 스펙트럼.

Fig. 3. Transmission spectra of films.

그림 3에서 광의 흡수와 투과가 일어나는 경계에 해당하는 파장의 에너지가 반도체 물질의 에너지 갭, E_g 이다. 박막의 에너지 갭을 구하기 위하여 다음 식을 사용하였다.

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

여기서 α 는 흡수계수로 측정 시에 얻은 값이다. h 는 프랑크 상수($4.14 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{sec}$), ν 는 진동수(광속도($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)/파장)이고 C 는 상수이다. 이 수식으로부터 $(\alpha h\nu)^2$ vs. $h\nu$ 곡선을 그리고(그림 4), 그 기울기가 $h\nu$ 에서 만나는 점이 E_g 이다. ZnO의 진성 에너지 갭은 3.2 eV로 알려져 있고 진성 또는 외인성의 결합 정도에 따라서 그 값이 변한다. 그림 4에서 In을 제외한 도핑된 박막 들은 순수한 ZnO 박막에 비하여 에너지 갭이 증가함을 보였다. 그러나 Nunes 등[7]의 실험에 의하면 In의 경우에도 에너지 갭이 증가하였는데, 이러한 결과는 출발원료, 제법 등에 의해서도 조금씩 차이가 있다. 본 실험에서 모든 박막의 에너지 갭은 3.28 - 3.35 eV로 다른 연구자들의 결과와 잘 일치하였다. 그리고 도핑 물질에 따라서 에너지 갭이 차이가 나는 이유(광의 흡수가 자외선 쪽으로 이동하는 것)는 도핑 물질에 의해서 전도전자의 상태밀도 분포가 확장되어 Moss-Burstein shift가 일어나기 때문이다[4,7,8].

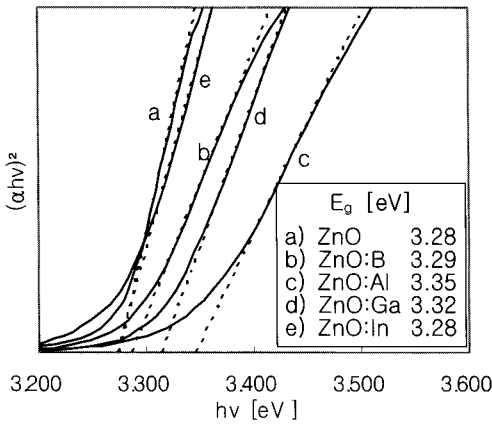


그림 4. 박막의 $(\alpha h\nu)^2$ vs. $h\nu$ 곡선.
Fig. 4. Plots of $(\alpha h\nu)^2$ vs. $h\nu$ of films.

3.3 저항 특성

ZnO 박막은 격자 내부의 결합에 의해서 전도성을 나타낸다. 그림 5는 공기 중에서 1차 열처리한 시료(air)와 H(5 %)/N(95 %) 혼합 가스 분위기에서 2차 열처리 한 시료(H/N)의 도핑물질에 대한 저항률(500 lux의 실내에서 측정값)을 나타낸 것이다. 먼저 공기 중에서 1차 열처리한 시료에 대해서 설명한다. 순수한 ZnO 박막은 높은 저항률을 나타내었으나, 도핑된 박막에서는 낮은 저항률을 가졌다. 이때 ZnO:Al과 ZnO:Ga는 8 Ωcm 로 비교적 낮은 저항률을 나타내었다. 이 시료를 2차로 H/N 혼합 가스 분위기에서 열처리한 경우에는 1차 열처리한 시료의 저항률 보다 모두 저항률이 감소함을 보였다. 즉 순수한 ZnO에서는 280 Ωcm 에서 0.3 Ωcm , ZnO:B는 131 Ωcm 에서 24 Ωcm , ZnO:Al은 6.2 Ωcm 에서 0.10 Ωcm , ZnO:Ga는 5.4 Ωcm 에서 0.08 Ωcm , 그리고 ZnO:In은 24 Ωcm 에서 0.09 Ωcm 로 각각 감소하였다. 이와 같이 저항률이 감소하는 이유는 환원 분위기에서 소결함으로 인하여 산소의 결핍이 일어나기 때문이다. 실험에서 Al, Ga 그리고 In을 도핑한 ZnO 박막의 저항률이 0.1 Ωcm 이하를 나타내었다. 이 값은 줄겔법[5]이나 스프레이 법[7]으로 만든 ZnO 박막들 중에서 매우 낮은 수치이며, 도전성 전극으로 사용하여도 손색이 없다.

표 2는 도핑 박막들의 광조사 전후에 있어서 저항률을 나타낸 것이다. 여기서 ρ_{dark} 는 외부에서 광을

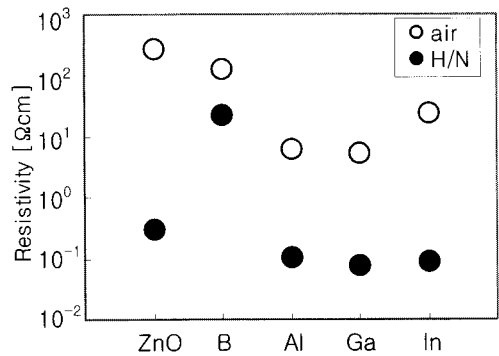


그림 5. 도핑물질에 대한 저항률(O:공기중에서 1차 열처리, ●:수소/질소 분위기에서 2차 열처리).

Fig. 5. Resistivity for dopants(O:1st heating in air, ●:2nd heating in H/N).

차단하여 저항률을 측정한 값이고, ρ_{light} 는 40,000 lux의 광을 조사하여 30초 후에 측정한 값이다. 여기서 저항변화율은 다음 식으로 계산한 값이다.

$$\Delta\rho = \frac{\rho_{light} - \rho_{dark}}{\rho_{dark}} \times 100 \quad [\%] \quad (3)$$

표 2에서 모든 박막은 광을 조사함으로써 저항률이 감소하였다. 이것은 광 에너지로 인하여 전자-정공쌍이 발생하므로 인하여 많은 캐리어가 생성된다. 그러나 도전성을 갖는 전극으로 사용할 경우에는 광에 대한 영향이 적어야 좋다. 그 결과 Ga나 In을 첨가한 박막이 비교적 광에 대한 저항률의 변화가 적음을 보였다.

표 2. 박막의 암저항과 광저항에 대한 저항률.

Table 2. Resistivity in the dark and light of films.

sample	ρ_{dark} [Ωcm]	ρ_{light} [Ωcm]	$\Delta\rho$ [%]
ZnO	0.351	0.285	-19
ZnO:B	27.093	8.655	-68
ZnO:Al	0.105	0.086	-18
ZnO:Ga	0.083	0.076	- 8
ZnO:In	0.095	0.090	- 5

그림 6은 박막의 온도에 대한 dark 저항의 변화 (ρ_T/ρ_{dark})를 나타낸 것이다. 모든 박막이 온도의 증가에 대하여 거의 선형적으로 감소함을 보였다. 이러한 저항-온도곡선의 변화는 도핑물질에 관계없이 모두 반도체적 성질을 가지고 있음을 알 수 있다. 더욱이 Al, Ga, In을 도핑한 박막에서는 거의 기울기가 비슷한 반면에 도핑을 하지 않았거나 B를 도핑한 박막에서는 그 변화가 큼을 나타내었다.

그림 7은 박막의 온도에 대한 light 저항의 변화 (ρ_T/ρ_{light})을 나타낸 것이다. 측정 시에 40000 lux의 광을 시료에 조사하면서 온도를 변화시켰다. 순수한 ZnO와 B, In을 도핑한 박막에서는 온도의 증가에 대하여 저항이 감소하는 반도체적 성질을 가지고 있으나, Al과 Ga를 도핑한 박막에서는 온도의 증가에 대하여 저항이 증가하는 금속적 전도현상을 나타내었다. 그리고 Al과 In을 도핑한 박막에서는 온도변화에 대한 저항률의 변화가 적고 비교적 안정되어 있음을 알 수 있다.

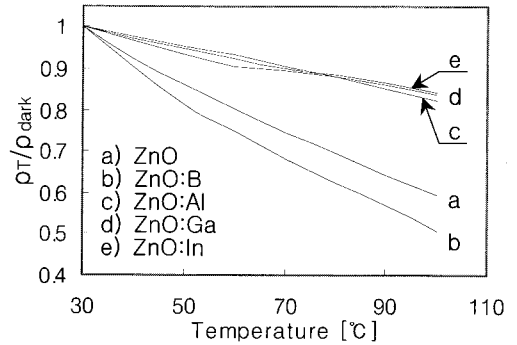


그림 6. 암저항의 온도의존성.

Fig. 6. Temperature dependence of dark resistivity.

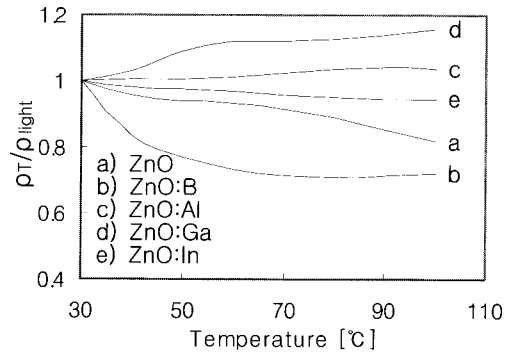


그림 7. 광저항의 온도의존성.

Fig. 7. Temperature dependence of light resistivity.

3.4 박막의 성능평가

그림 8은 가시광선영역(380 - 750 nm)에서의 흡수계수를 나타낸 것이다. 순수한 ZnO 박막에 비하여 도핑한 박막의 흡수계수가 작음을 보였고, 또한 각각 박막에 대한 흡수계수의 최소 점은 B, Al, Ga, In 순으로 장파장 쪽으로 이동하였다. 한편 가시광선 영역에서 매질의 흡수계수는 매우 중요하다. 광 투명성과 전도성이 좋은 산화물 투명전극은 낮은 저항률과 가시광선영역에서 흡수율이 적어야 한다. 그래서 투명 전도성 박막의 좋고 나쁨을 비교하는 성능지수, FOM(figure of merit)은 다음 식으로 정의된다.

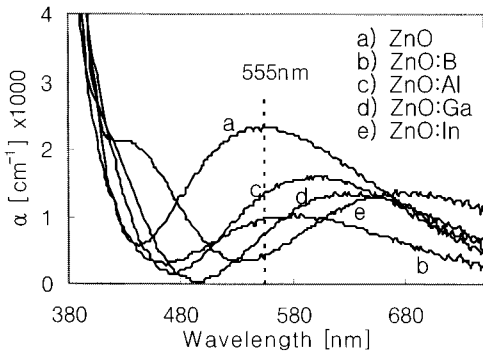


그림 8. 가시광선 영역에서 박막의 흡수계수.
 Fig. 8. Absorption coefficient of films in visible region.

$$FOM = \frac{1}{\alpha\rho} [\Omega^{-1}] \quad (4)$$

여기서 α [cm^{-1}]는 흡수계수이고, ρ [Ωcm]는 고유저항이다.

표 3은 도핑물질에 대하여 박막의 FOM을 나타낸 것이다. α 값은 가시광선의 파장에 따라서 그 값이 다르므로 사람의 최대 시감도를 나타내는 파장인 555 nm에 대한 값을 적용하였고, ρ 는 표 2에서 광을 조사하였을 때의 고유저항을 적용하였다. 그 결과 성능지수는 $\text{In} > \text{Ga} > \text{Al} > \text{B}$ 순서로 나타났다. ZnO:In의 경우에 성능지수는 $0.0253 \Omega^{-1}$ 를 나타내었는데, 이 값은 스프레이 법으로 만든 Nunes 등[7] 결과에서 In을 도핑한 박막의 약 $0.001 \Omega^{-1}$ 보다는 약 25배나 큼을 보였다. 그러나 Choi[12]는 스퍼터 법으로 성능지수가 $2.67 \Omega^{-1}$ 되는 것으로 보고하였다.

표 3. 파장 555 nm에서 박막의 성능지수.
 Table 3. FOM (figure of merit) of the films at 555 nm (wavelength).

sample	α [cm^{-1}]	ρ [Ωcm]	FOM [Ω^{-1}]
ZnO	2320	0.285	0.0015
ZnO:B	1000	8.665	0.0001
ZnO:Al	1360	0.082	0.0090
ZnO:Ga	760	0.076	0.0173
ZnO:In	440	0.090	0.0253

그러므로 졸겔 법이나 스프레이 법으로 만든 ZnO 박막에서는 고유저항이 스퍼터 법에 비하여 약 1000배 정도 높은 고유저항을 가지므로 시료의 저항률을 개선시키지 않고는 높은 성능지수를 기대하기는 어렵다. 지금까지의 실험에서 도핑 물질에 대한 저항률, 저항률의 광 및 온도특성, 그리고 성능지수 등을 고려해 볼 때 ZnO 투명 전도성 박막의 도핑물질은 In이 가장 적합하다고 생각한다.

4. 결론

졸겔 방법으로 3가 물질(B, Al, Ga, In)을 각각 1.5 at% 도핑한 ZnO 박막을 만들고, 도핑물질에 따른 ZnO 박막의 미세구조, 광학특성 및 저항률을 조사 비교하였다. 500 °C에서 열처리한 ZnO 박막들은 c(002)축으로 잘 배향된 hexagonal 구조를 나타내었다. 도핑한 시료들의 결정 입자는 순수한 ZnO 시료보다 감소하였다. 그리고 Zn보다 입경이 작은 B, Al, Ga를 도핑한 시료의 격자상수는 ZnO보다 감소한 반면에, 입경이 큰 In을 도핑한 시료의 격자상수는 증가하였다. 모든 박막은 가시영역에서 90 % 이상의 높은 투과성을 나타내었다. In을 도핑한 시료에서는 에너지갭의 변화는 없었지만, 그 외 시료들의 에너지 갭은 조금 증가함을 보였다. Al, Ga 및 In을 도핑한 시료의 저항률은 0.1 Ωcm 이하의 값을 가졌으며, 광 또는 온도의 변화에 대하여 민감한 반도체 특성을 나타내었다. In을 도핑한 시료에서는 광이나 온도에 대한 영향이 매우 적었으며, 최대 시감도(555 nm)에서 성능지수(MOF)가 가장 높은 $0.025 \Omega^{-1}$ 를 나타내었다. 이러한 결과로부터 ZnO 투명 전도성 박막의 도핑물질은 In이 가장 적합하다고 생각한다.

참고문헌

- [1] 박강일, 김병섭, 임동건, 이수호, 광동주, "Bias 전압에 따른 ZnO:Al 투명전도막의 전기적 특성", 전기전자재료학회논문지, 17권, 7호, p. 738, 2004.
- [2] 오수영, 김웅권, 이태용, 강현일, 김봉석, 송준태, "Ga doped ZnO 박막의 열처리 조건에 따른 구조 및 전기적 특성에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 20권, 9호, p. 776, 2007.
- [3] M. Ohyama, H. Kozuka, and T. Yoko, "Sol-gel preparation of ZnO films with extremely

- preferred orientation along (002) plane from zinc acetate solution", *Thin Solid Films*, Vol. 306, p. 78, 1997.
- [4] B. N. Pawar, S. R. Jadkar, and M. G. Takwale, "Deposition and characterization of transparent and conductive sprayed ZnO:B thin films", *J. Phys. Chem. Solids.*, Vol. 66, p. 1779, 2005.
- [5] C.-S. Hong, H.-H. Park, J. H. Moon, and H.-H. Park, "Effect of metal(Al, Ga, and In)-dopants and/or Ag-nano-particles on the optical and electrical properties of ZnO thin films", *Thin Solid Films*, Vol. 515, p. 957, 2006.
- [6] J.-H. Lee and B.-O. Park, "Transparent conducting ZnO:Al, In and Sn thin films deposited by the sol-gel method", *Thin Solid Films*, Vol. 426, p. 94, 2003.
- [7] P. nunes, E. Fortunato, P. tonello, F. Braz Fernandes, and P. Vilarinho, "Effects of different dopant elements on the properties of ZnO thin films", *Vacuum*, Vol. 64, p. 281, 2002.
- [8] J. Mass, P. Bhattacharya, and R. S. Katiyar, "Effect of high substrate temperature on Al-doped ZnO thin films grown by pulsed laser deposition", *Materials science and Engineering B*, Vol. 103, p. 9, 2003.
- [9] A. Kh. Abduev, A. K. Akhmedov, and A. Sh. Asvarov, "The structural and electrical properties of Ga, B-codoped ZnO thin films: The effects of additional boron impurity", *Solar Energy materials & Solar Cells*, Vol. 91, p. 258, 2007.
- [10] T. Schuler and M. A. Aegerter, "Optical, electrical and structural properties of sol gel ZnO:Al coatings", *Thin Solid films*, Vol. 351, p. 125, 1999.
- [11] S. W. Xue, X. T. Zu, W. G. Zheng, M. Y. Chen, and X. Xiang, "Effects of annealing and dopant concentration on the optical characteristics of ZnO:Al thin films by sol-gel technique", *Physica B*, Vol. 382, p. 201, 2006.
- [12] B. G. Choi, I. H. Kim, D. H. Kim, K. S. Lee, B. Cheong, Y. J. Baik, and W. M. Kim, "Electrical, optical and structural properties of transparent and conducting ZnO thin films doped with Al and Fby rf magnetron sputter", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 25, p. 2161, 2005.