

고주파 마그네트론 스퍼터링법으로 제조된 ZnO:Ga,In(IGZO) 박막의 특성

김형민¹, 마대영², 박기철^{1,a}

¹ 경상대학교 반도체공학과

² 경상대학교 전기공학과

The Properties of ZnO:Ga,In(IGZO) Thin Films Prepared by RF Magnetron Sputtering

Hyoung Min Kim¹, Tae Young Ma², and Ki Cheol Park^{1,a}

¹ Department of Semiconductor Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

² Department of Electrical Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

(Received October 19, 2012; Revised October 29, 2012; Accepted November 29, 2012)

Abstract: IGZO thin films have been prepared by RF magnetron sputtering. The structural, electrical and optical properties of the IGZO thin films have been investigated as a function of deposition condition. XRD analysis of IGZO thin films showed a typical crystallographic orientation with c-axis perpendicular regardless of deposition conditions. The carrier mobility, carrier concentration and resistivity of the IGZO films sputtered at 200 W, 1mTorr and 300°C were 28.5 cm²/V·sec, 2.6×10²⁰ cm⁻³, 8.8×10⁻⁴ Ω·cm respectively. The optical transmittance were higher than 80% at visible region regardless of the deposition conditions under the experiments above, and specifically higher than 90% at wave length over 500 nm. The absorption edge was shifted to shorter wavelength with increase of carrier concentration.

Keywords: IGZO thin film, RF magnetron sputtering, Structural, Electrical and optical properties

1. 서론

투명도전성 산화막 (transparent conductive oxide, TCO)은 평판 디스플레이, 박막 태양전지, 광전자 소자 등에 투명전극으로 많이 활용되고 있다 [1,2]. 투명전극으로 활용이 가능한 투명도전성 산화막은 90%

이상의 가시광 영역에서의 광투과도와 10⁻⁴ Ω·cm대의 낮은 비저항이 요구된다. 그 중에서도 ITO (indium tin oxide, In₂O₃:Sn)는 투명도전막으로 널리 사용되고 있다. 그러나 관련된 산업의 급속한 성장으로 인해 In의 고갈과 공급 부족으로 재료의 원가가 증가하고 있으며 또한 수소 플라즈마에 대한 특성의 열화 문제가 제기되어 왔다. 이러한 문제들을 해결하기 위해 대체 물질에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 ZnO는 ITO에 비해 원료 물질이 풍부하여 가격이 월등히 저렴하며, 박막의 경우 고온에서의 열적인 안정성을 가지고 있다. 3.4 eV대의 에너지 밴드갭을 가지고 있으며, 가시광 영역에서의 우수한 광투과도 특성을 갖

a. Corresponding author; tfpkcc@gnu.ac.kr

는다. 또한 비화학양론적인 조성에 기인하여 비교적 낮은 비저항을 갖는 n형 반도체 특성을 가지고 있다. 그럼에도 불구하고 III족 원소 (B, Al, Ga, In)를 도핑함으로써 더 우수한 전기적 특성을 얻을 수 있는 것으로 보고되고 있다 [3-5].

본 연구에서는 박막증착 재현성과 막의 균질성이 우수하며 가장 일반적으로 사용되어지는 고주파 마그네트론 스퍼터링법으로 IGZO (ZnO:Ga,In) 박막을 제조하였다. 스퍼터링 시 RF출력, 분위기압 및 기판온도를 변화시켜 가면서 IGZO박막을 증착하였다. X-선 회절 분석기를 사용하여 IGZO박막의 구조적 특성을 조사하였으며, EDS를 사용하여 성분 분석을 하였다. 또한 Hall effect 측정시스템을 사용하여 캐리어 밀도, 캐리어 이동도 및 박막의 비저항을 측정하였으며, 분광광도계를 사용하여 광 투과도를 측정하고 광학적 밴드갭을 구하였다.

2. 실험 방법

2.1 타겟제조

순수한 ZnO (99.9%-Aldrich Co.) 분말에 Ga₂O₃ (99.99%-Aldrich Co.)와 In₂O₃ (99.99%-Aldrich Co.) 분말을 95 : 3 : 2의 무게비로 혼합하여 총 무게가 130 g 이 되게 평량하여 혼합된 분말과 지르코니아 볼, 메틸 알콜을 1:1:1의 무게비로 하여 습식볼밀 방식으로 72시간 동안 혼합하였다. 혼합된 분말을 3시간 동안 120°C 에서 충분히 건조한 다음 500°C에서 4시간 동안 하소하였다. 하소된 분말에 결합제인 PVA (polyvinyl alcohol 10 wt%)를 5 wt%의 무게비로 첨가하여 알루미늄 유발을 이용해 150 mesh될 때까지 분쇄하였다. 분쇄된 분말을 3 inch 몰드에 15 ton의 압력을 가해 성형하였고, 500°C에서 4시간, 1,000°C에서 4시간 동안 소결하였다. 이 때의 상온에서 500°C까지의 승온율은 분 당 1°C였으며, 500°C에서 1,000°C까지의 승온율은 분 당 3°C였다 [6]. 이 때 제조된 타겟의 소결밀도는 4.18 g/cm³였다.

2.2 IGZO박막의 증착

기판은 디스플레이용 corning glass를 세척하여 사용하였으며 고주파 마그네트론 스퍼터링 시스템 (SPS-S050, ULTEC Co.)으로 표 1과 같은 증착 조건으로 제조되었다.

Table 1. Deposition condition.

Deposition parameters	Deposition conditions
Base pressure	5×10^{-6} Torr
Ambient gas	Only Ar (50 sccm)
RF power	100 W ~ 250 W
Working pressure	1 mTorr~10 mTorr
Substrate temperature	Room temperature ~350°C
Substrate-target distance	10 cm

RF 출력은 100 W에서 250 W까지 50 W씩 증가시켜 가며 증착하였으며, 분위기압은 1 mTorr에서 10 mTorr 까지 변화시켜 가며 증착하였다. 또한 기판온도는 상온에서 350°C까지 변화시켜가며 증착하였다. 분위기 가스로는 Ar (99.999%)가스를 사용하였으며 챔버 내의 기판과 타겟과의 거리는 10 cm로 고정하였다. 또한 매 증착 시 마다 5분 간 pre-sputtering한 후 main sputtering하였다.

2.3 IGZO박막의 측정

증착된 IGZO박막의 두께측정을 위해 Alpha-step 500 (Tencor Co.)을 사용하였다. 증착 조건에 따른 막의 결정성, 결정방향 및 미세 결정립의 크기를 조사하기위해 X-선 회절분석기 (D8 Advance, Bruker AXS Co.)를 사용하였다. 이때의 X-선의 회절각은 20°~80°까지 변화시켰으며, 타겟의 CuK α 는 1.5 Å 파장을 사용하였다. 전기적 특성을 측정하기 위해 Hall effect 측정시스템 (HEM-2000, EGK Co.)을 사용하였다. 시편은 포토리소그래피 공정을 이용해 제작하였으며 전극부에는 고주파 마그네트론 스퍼터링 시스템을 이용해 Ag전극을 증착하였다. 증착된 전극과 측정용 PCB 기판은 0.1 mm 두께의 구리선을 이용하여 연결하였다. 분광광도계 (AvaSpec-2048-TEC Jin young Co.)를 이용하여 IGZO박막의 광투과도를 측정하였다. 또한 측정된 광투과도로부터 흡수계수 α 를 구하였으며, 흡수계수 α 와 광자에너지와의 관계식을 통해 광학적 밴드갭을 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 증착조건에 따른 증착률

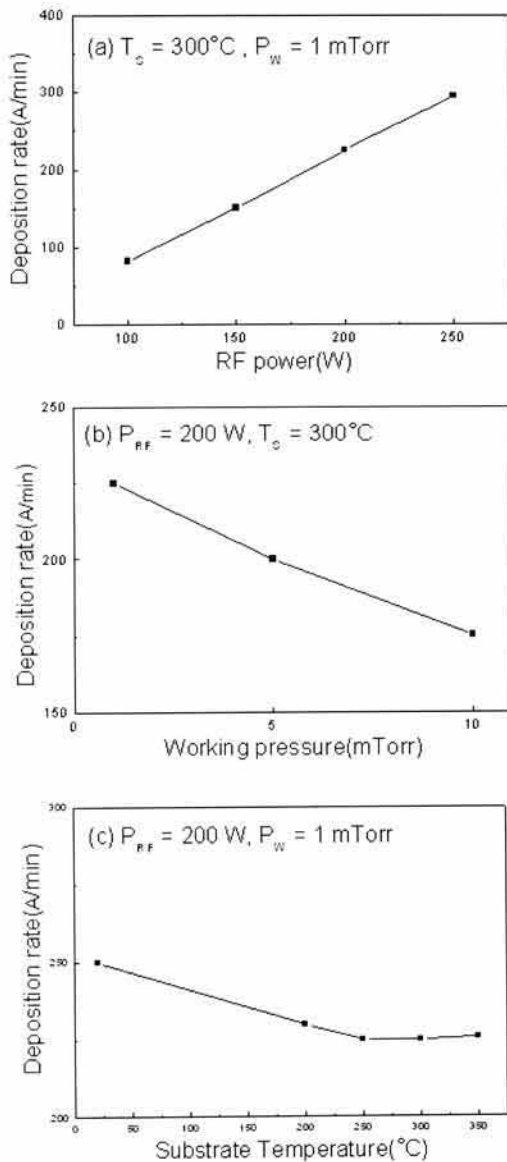


Fig. 1. Deposition rate of IGZO thin films as a function of (a) RF power, (b) working pressure, and (c) substrate temperature.

그림 1은 IGZO박막의 RF 출력, 분위기압 및 기판 온도의 변화에 따른 증착률의 변화를 보인 것이다. 그림 1(a)는 RF 출력이 증가함에 따라 박막의 증착률을 구한 것이다. 이 때 분위기압은 1 mTorr, 기판 온도는 300°C 로 고정하였다. RF 출력이 증가함에 따라 선형적으로 증착률이 증가하는 전형적인 모습을 보인다. 이때 단위 출력 당 증착률은 $1.4 \text{ \AA}/\text{min.W}$ 이었다.

그림 1(b)는 분위기압의 변화에 따른 박막의 증착률을 구한 것이다. 이 때 RF 출력은 200 W, 기판 온도는 300°C 로 고정하였다. 분위기압이 증가함에 따라 박막의 증착률이 감소함을 보인다. 이는 타겟으로부터 스퍼터링된 원자의 평균 자유행정이 분위기압이 높아짐에 제한되기 때문이다.

그림 1(c)는 기판온도의 변화에 따른 증착률을 나타낸다. 이때 RF출력은 200 W, 분위기압은 1 mTorr로 고정하였다. 기판 온도가 상승함에 따라 증착률을 감소하다가 250°C 이상에서는 증착률이 포화됨을 알 수 있다. 이는 일부는 250°C 이상에서는 표면에 도달하는 원자와 열적으로 표면을 이탈하는 원자의 비가 일정해지기 때문이며, 일부는 기판온도 증가에 의한 adatom들의 표면 이동도 증가로 IGZO 박막의 측면 성장도 이루어지기 때문으로 판단된다 [7].

3.2 구조적 특성

그림 2~4는 각각 증착조건에 따른 IGZO박막의 X-선 회절패턴 분석을 나타낸 것이다. 또한 표 2~4는 각각 X-선 회절 패턴으로부터 구한 반치폭 (full width at half maximum, FWHM)과 X-선 회절패턴의 반치폭 (FWHM)을 사용하여 식 (1)의 Scherrer의 식으로 구한 미세 결정립의 크기를 구한 것이다.

$$t = 0.9\lambda / (\cos\theta \cdot B) \quad (1)$$

λ 는 X-선의 파장, t 는 결정입자의 크기, θ 는 최대 회절 피크의 강도, B 는 반치폭을 나타낸다.

그림 2는 RF 출력에 대한 IGZO박막의 X-선 회절 패턴이다.

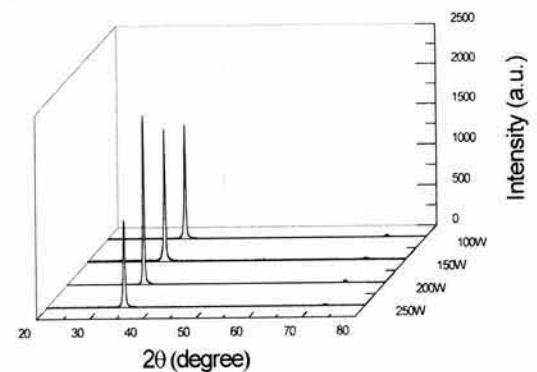
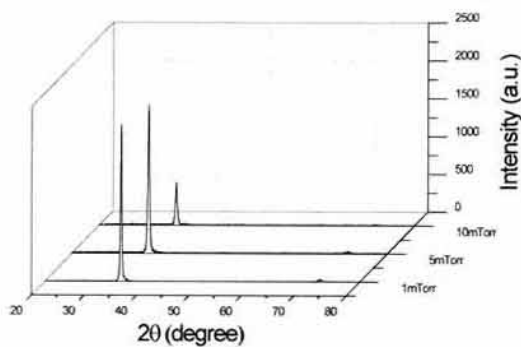


Fig. 2. XRD patterns of IGZO thin films prepared at RF powers ($T_s = 300^\circ\text{C}$, $P_w = 1 \text{ mTorr}$).

Table 2. Variation of IGZO thin films with RF powers ($T_S = 300^\circ\text{C}$, $P_W = 1 \text{ mTorr}$).

	FWHM	Grain size(nm)
100 W	0.33°	25
150 W	0.30°	27
200 W	0.27°	30
250 W	0.38°	21

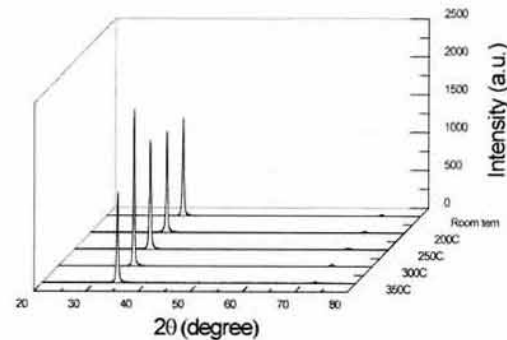
**Fig. 3.** XRD patterns of IGZO thin films prepared at different RF powers ($T_S = 300^\circ\text{C}$, $P_W = 1 \text{ mTorr}$).

이때 분위기압은 1 mTorr, 기판온도는 300°C 로 고정하였으며 막의 두께는 3,000 Å으로 하였다. IGZO 박막은 RF 출력의 변화와 무관하게 대체로 (002)면으로의 피크만 관찰되어 c-축 배향성을 가지고 기판에 수직으로 성장함을 알 수 있었다. RF 출력이 상승함에 따라 (002)면의 피크강도가 증가하다가 250 W에서는 오히려 감소하였다. 이는 RF 출력이 증가함에 따라 IGZO박막의 결정성이 향상되다가 250 W에서 오히려 결정성이 감소함을 의미한다. RF 출력이 증가함에 따라 타겟으로 부터 스퍼터링된 원자들의 에너지가 증가하여 기판에 결정들이 치밀하게 증착되고 이 결정들이 유합하면서 더 큰 미세 결정립으로 성장된 것으로 판단되나 250 W 이상에서 결정성이 감소하고 결정립의 크기도 감소하는 것은 높은 증착률에 기인하여 표면에 도달하는 원자들이 격자 평형위치에 도달하지 못하고 계속 스퍼터링되는 입자들이 기판에 도달하기 때문으로 판단된다. 이외 빠른 증착률에 기인한 막내의 결함의 증가에도 원인 있는 것으로 판단된다 [8].

그림 3은 분위기압에 대한 IGZO 박막의 X-선 회절 패턴이다.

Table 3. Variation of IGZO thin films with working pressures ($T_S = 300^\circ\text{C}$, $P_{RF} = 200 \text{ W}$).

	FWHM	Grain size(nm)
1 mTorr	0.27°	30
5 mTorr	0.33°	25
10 mTorr	0.40°	20

**Fig. 4.** XRD patterns of IGZO thin films prepared at different temperatures ($P_W = 1 \text{ mTorr}$, $P_{RF} = 200 \text{ W}$).

이때 RF 출력은 200 W, 기판온도는 300°C 로 고정하였다. 분위기압의 변화에서도 (002)면의 성장만이 관찰되는 것을 알 수 있다. 분위기압이 증가함에 따라 (002)면의 피크강도가 감소함을 알 수 있는데, 이는 분위기압이 증가됨에 따라 스퍼터링된 원자들과 Ar 이온들이 충돌될 확률이 증가되고 충돌로 인해 막의 표면에 도달하는 원자들의 에너지가 감소하여 표면이동이 제한되기 때문으로 판단된다 [7,8]. 표 3에서 분위기압이 증가함에 따라 반치폭 (FWHM)은 증가하였으며, 미세 결정립의 크기 역시 감소하였다. 이 역시 제한되어진 표면 이동으로 인해 결정들의 성장이 이루어지지 못한 것으로 판단된다.

그림 4는 기판온도에 대한 IGZO박막의 X-선 회절 패턴이다.

이 때 RF 출력은 200 W, 분위기압은 1 mTorr로 고정하였다. 기판온도에 대해서도 기판온도의 변화와 무관하게 (002)면으로의 성장만 관찰되었다. 또한 기판온도가 증가함에 따라 (002)면의 피크가 증가함을 보이다가 350°C 에서는 오히려 감소함을 보인다. 이는 기판온도가 증가함에 따라 막의 결정성이 향상되다가 350°C 에서는 오히려 결정성이 감소되는 것으로 나타났다.

Table 4. Variation of IGZO thin films with substrate temperatures ($P_W = 1$ mTorr, $P_{RF} = 200$ W).

	FWHM	Grain size(nm)
Room temperature	0.31°	26
200°C	0.29°	28
250°C	0.30°	27
300°C	0.27°	30
350°C	0.32°	25

표 4에서는 반치폭 (FWHM)으로부터 계산된 미세 결정립의 크기는 기판온도가 300°C에서 30 nm로 가장 컸으나 350°C에서는 25 nm로 오히려 감소하였다. Park 등 [8]은 Al이 도핑된 ZnO막의 연구에서 이를 Thornton의 structural zone model [9]에서 주상성장에서 보다 큰 그레인 구조로의 전이영역에 해당되기 때문으로 판단하였다.

3.3 전기적 특성

그림 5는 RF 출력의 변화에 대한 IGZO박막의 비저항, 캐리어 이동도 및 캐리어 밀도의 변화를 나타낸 것이다.

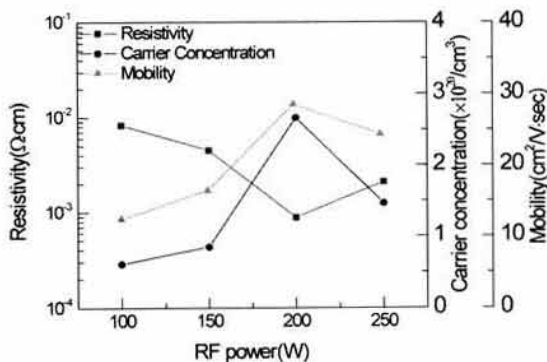


Fig. 5. Variations of resistivity, carrier concentration and carrier mobility of IGZO thin films with RF powers ($T_S = 300^\circ\text{C}$, $P_W = 1$ mTorr).

이 때 분위기압, 기판온도는 1 mTorr, 300°C로 고정하였다.

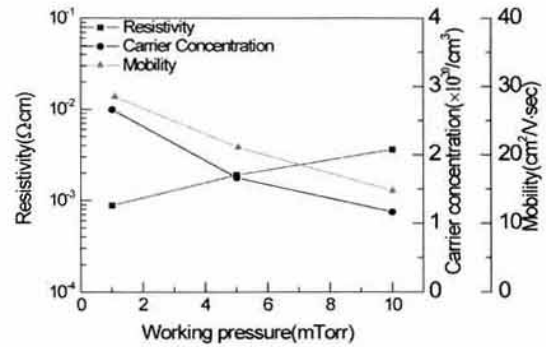


Fig. 6. Variations of resistivity, carrier concentration and carrier mobility of IGZO thin films with working pressures ($T_S = 300^\circ\text{C}$, $P_{RF} = 200$ W).

RF 출력이 증가함에 따라 캐리어 밀도와 캐리어 이동도는 증가하나 250 W에서는 오히려 감소하였다. 캐리어 밀도와 캐리어 이동도의 RF 출력이 증가함에 따라 adatom의 에너지가 증가하여 Zn원자가 Ga, In 원자로 활발히 치환되어 캐리어 밀도가 상승된 것으로 판단된다 [10]. 표 2의 X-선 회절 패턴의 분석 결과에서 보듯이 미세 결정립의 크기가 증가함에 따라 grain boundary scattering이 감소되어지고 이로 인해 캐리어 이동도가 증가 한 것으로 판단된다 [11]. 250 W 이상에서의 저항률의 증가는 빠른 증착물에 기인한 결함의 증가 및 미세 결정립의 크기 감소로 인한 것으로 판단된다. 캐리어 밀도, 캐리어 이동도의 증가로 RF 출력이 200 W에서 가장 낮은 비저항을 나타냈다.

그림 6은 분위기압의 변화에 대한 IGZO박막의 캐리어 이동도와 캐리어 밀도 및 비저항의 변화를 나타낸 것이다. 이 때 RF 출력, 기판온도는 200 W, 300°C였다. 분위기압이 증가함에 따라 캐리어 밀도는 감소함을 보이는데, 이는 분위기압에 증가함에 따라 IGZO막의 거칠기와 다공성의 증가로 인해 막의 표면적이 증가하였기 때문으로 판단된다. 이는 ZnO박막의 표면이 화학적으로 활성적이므로 막 표면의 산소원자를 흡착하여지고 conduction band로부터 전자를 받아 캐리어 밀도를 감소시키기 때문이다 [12]. 또한 분위기압이 증가함에 따라 캐리어 이동도가 감소함을 보이는데 이는 표 3의 X-선 회절 패턴 분석결과에서 보여주듯이 미세 결정립의 크기의 감소로 인해 grain boundary scattering의 증가하였기 때문으로 판단된다. 비저항의 증가는 캐리어 이동도와 캐리어 밀도의

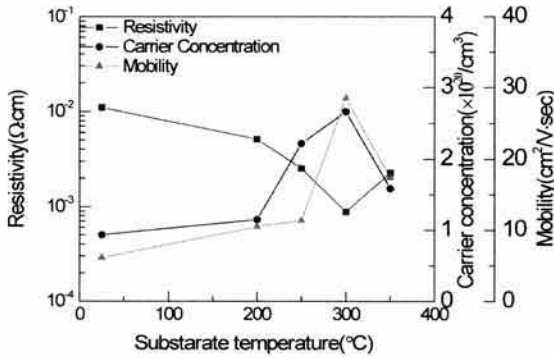


Fig. 7. Variations of resistivity, carrier concentration and carrier mobility of IGZO thin films with substrate temperatures ($P_W = 1$ mTorr, $P_{RF} = 200$ W).

감소에 기인한다.

그림 7은 기판온도의 변화에 대한 IGZO박막의 캐리어 이동도와 캐리어 밀도 및 비저항의 변화를 나타낸 것이다. 이 때 RF 출력, 분위기압은 200 W, 1 mTorr였다. 기판온도가 증가함에 따라 캐리어 밀도와 이동도는 증가하나 350°C에서는 오히려 감소하였다. 기판온도가 상승함에 따라 adatom의 에너지가 증가하여 Zn원자가 Ga, In원자로 활발히 치환되면서 캐리어 밀도가 증가되어진 것으로 판단된다 [13]. 캐리어 이동도의 증가는 grain boundary scattering이 감소하였기 때문이다. 기판온도가 350°C에서 비저항의 증가는 이동도의 감소와 캐리어 밀도의 감소에 기인하는 것으로 그림 4의 X-선 회절 분석 결과와 일치하는 것으로 보인다. 기판온도가 300°C일 때 캐리어 밀도는 $2.6 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, 캐리어 이동도는 $28.5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$, 비저항은 $8.8 \times 10^{-4} \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ 으로 가장 우수한 전기적 특성을 보였다.

3.4 광학적 특성

그림 8은 RF 출력 변화에 대한 IGZO박막의 광투과도 특성변화를 나타낸 것이다.

이 때 분위기압은 1 mTorr, 기판온도는 300°C로 유지하였으며, 막의 두께는 약 3,000 Å로 고정하였다. 500 nm 이상에서의 가시광 영역에서는 RF 출력과 무관하게 90% 이상의 광 투과도를 보였으며 특히 200 W에서는 400~500 nm에서도 85% 이상이었다.

광 흡수단은 RF 출력의 변화에 단파장쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다. 광 투과도 특성에서 다음 식

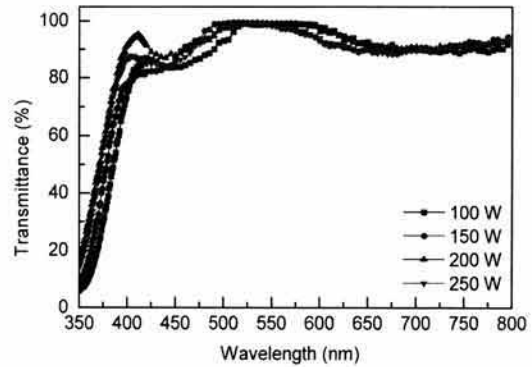


Fig. 8. Dependence of the transmittance of IGZO thin films at different RF powers ($T_S = 300^\circ\text{C}$, $P_W = 1$ mTorr).

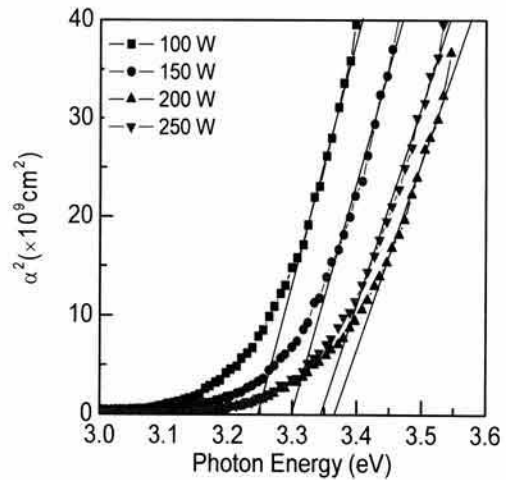


Fig. 9. Dependence of the optical band gap of IGZO thin films at different RF powers ($T_S = 300^\circ\text{C}$, $P_W = 1$ mTorr).

(2)를 이용하여 IGZO박막의 광흡수계수를 구하고 광자에너지와 광흡수계수와와의 관계곡선을 그림 9에 나타내었다.

$$I_t = I_0 e^{-\alpha t} \quad (2)$$

식 (2)에서 I_t 는 투과된 광원의 강도, I_0 는 입사된 광원의 강도, α 는 흡수계수이며, t 는 IGZO박막의 두께이다. IGZO박막은 직접 천이형 반도체이므로 광흡수계수와 에너지 밴드갭과의 관계식은 식 (3)과 같다.

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

h 는 Planck상수, ν 는 진동수, E_g 는 에너지 밴드갭을

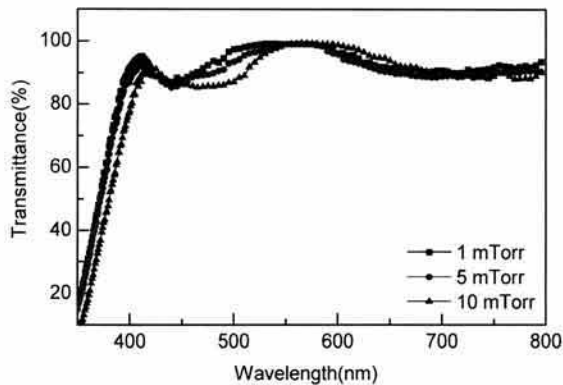


Fig. 10. Dependence of the transmittance of IGZO thin films at different working pressures ($T_S = 300^\circ\text{C}$, $P_{RF} = 200\text{ W}$).

의미한다. α^2 이 광자에너지에 선형적이므로 $\alpha^2 = 0$ 로 외삽하여 광학적 밴드갭을 구할 수 있다. RF 출력이 증가함에 따라 광학적 밴드갭의 확장이 관찰되었다. Burstein [14]은 캐리어 밀도 증가에 따른 축퇴된 반도체의 광학적 밴드갭의 변화와 캐리어 밀도 사이의 관계를 아래 식 (4)와 같이 됨을 보였다.

$$\Delta E_g \cong \frac{h^2}{8m^*} \left(\frac{3}{\pi} \right)^{2/3} n^{2/3} \quad (4)$$

이 식에서 ΔE_g 는 광학적 밴드갭의 변화, h 는 Planck 상수, m^* 는 전자의 유효질량, n 은 캐리어 밀도를 나타낸다. 광학적 밴드갭의 확장은 그림 5의 캐리어 밀도의 변화경향과 일치한다 [18]. 그림 10과 그림 11은 분위기압의 변화 따른 광 투과도 특성 및 α^2 과 photon energy와의 관계곡선에서 외삽법을 통해 광학적 밴드갭의 변화를 나타낸 것이다. 이 때 RF 출력은 200 W, 기판온도는 300°C 로 유지하였으며, 막의 두께는 $3,000\text{ \AA} \pm 5\%$ 로 고정하였다.

그림 10에서 분위기압의 변화의 관계없이 가시광 영역에서 80% 이상의 광 투과도를 나타내었으며 500 nm 이상에서는 90% 이상의 광 투과도를 나타내었다. 광 흡수단은 분위기압이 증가함에 따라 장파장 쪽으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 11에서는 광학적 밴드갭이 분위기압이 증가함에 따라 축소되어짐을 확인할 수 있다. 이는 그림 6의 Hall 효과 측정에서 나타난 캐리어 밀도의 감소와 일치한다.

그림 12와 그림 13은 기판온도의 변화에 따른 광 투과도 특성 및 광학적 밴드갭의 변화를 나타낸 것이다.

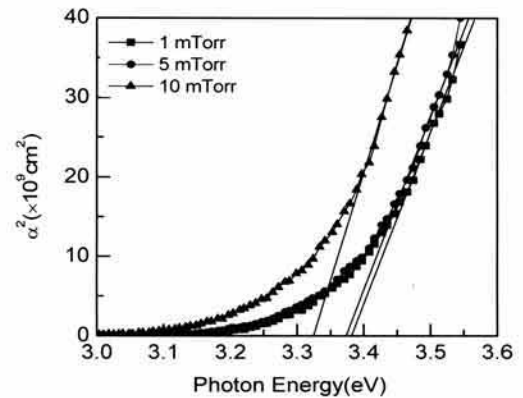


Fig. 11. Dependence of the optical band gap of IGZO thin films at different working pressures ($T_S = 300^\circ\text{C}$, $P_{RF} = 200\text{ W}$).

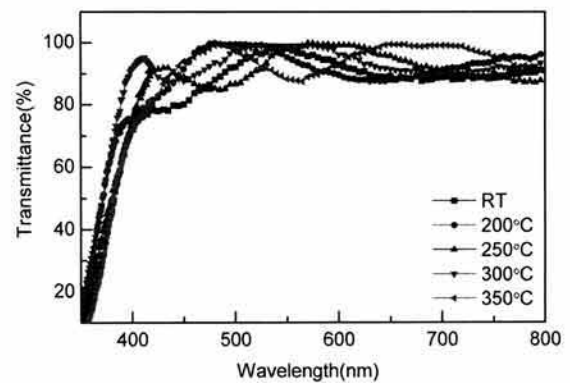


Fig. 12. Dependence of the transmittance of IGZO thin films at different substrate temperatures ($P_W = 1\text{ mTorr}$, $P_{RF} = 200\text{ W}$).

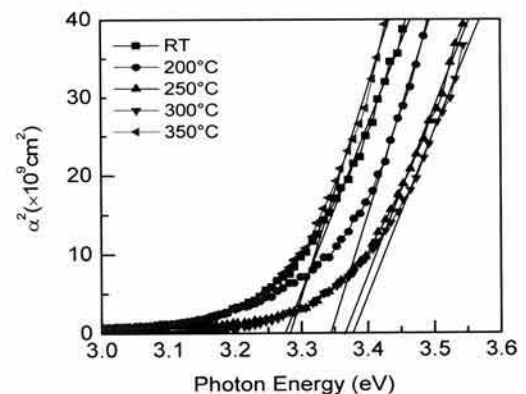


Fig. 13. Dependence of the optical band gap of IGZO thin films at different substrate temperatures ($P_W = 1\text{ mTorr}$, $P_{RF} = 200\text{ W}$).

기관온도의 변화와 무관하게 500 nm 이상의 가시광 영역에서 90% 이상의 광 투과도를 나타내었다.

그림 13에서는 기관온도가 상승함에 따라 광학적 밴드갭이 확장되다가 350°C에서는 오히려 축소됨을 알 수 있다. 이는 캐리어 밀도의 변화와 일치하는 결과를 보여주고 있다.

4. 결론

RF 마그네트론 스퍼터링법을 사용하여 IGZO박막을 증착하였으며, 순수한 ZnO분말에 Ga₂O₃분말 및 In₂O₃분말을 각각 3 wt%와 2 wt%로 첨가하여 타겟을 제작하였다. 증착된 IGZO박막은 X-선 회절 패턴의 분석 결과로 증착 조건에 관계없이 (002)면으로의 수직 성장하였으며 c-축 배향성을 보였다. RF 출력과 기관온도가 상승함에 따라 X-선 회절 피크의 강도가 증가하였으며 분위기압의 증가에는 오히려 감소하였다. 또한 미세 결정립의 크기도 RF 출력과 기관온도가 상승함에 따라 증가하였으나 분위기압이 증가함에 따라서는 오히려 감소하였다. Hall 효과 측정 결과, RF 출력의 증가, 기관온도의 상승 및 분위기압의 감소에서 비저항은 감소하는데 이는 adatom의 에너지가 증가하여 Zn원자가 Ga, In원자로 활발히 치환되면서 캐리어 밀도가 증가하고, 미세 결정립의 증가로 인해 grain boundary scattering이 감소하여서 캐리어 이동도가 증가하기 때문으로 판단된다. IGZO박막의 광투과도 측정 결과 증착 조건에 관계없이 가시광 영역에서 80% 이상의 광투과도를 나타냈으며 특히 500 nm 이상에서는 90% 이상의 광투과도를 나타내었다. 캐리어 밀도가 증가함에 따라 광 흡수단은 단파장 쪽으로 이동하였으며, 광학적 밴드갭은 확장되었다. RF 출력이 200 W, 분위기압은 1 mTorr, 기관온도가 300°C, 막의 두께가 3000 Å일 때 캐리어 밀도가 $2.6 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, 캐리어 이동도는 $285 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 였으며, 비저항이 $8.8 \times 10^{-4} \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ 로 가장 낮게 나타났다. 가시광 영역에서 85% 이상의 광 투과도를 나타내었다. 또한 3.38 eV의 광학적 밴드갭을 나타내었다. Ca과 In의 첨가량을 변화시키는 향후의 연구를 통하여 투명도전막으로써 응용이 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2012년 경상대학교 학술진흥지원사업연구비 (RPP-2012-000)와 2010년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원 (No. 2010-0007697)을 받아 수행된 기초 연구임.

REFERENCES

- [1] J. Hamberg and C. G. Granqvist, *J. Appl. Phys.*, **60**, R123 (1986).
- [2] K. L. Chopla, S. Major, and D. K. Pandya, *Thin Solid Films*, **102**, 1 (1983).
- [3] J. Y. Tseng, Y. T. Chen, M. Y. Yang, C. Y. Yang, P. C. Li, W. C. Yu, Y. F. Hsu, and S. F. Wang, *Thin Solid Films*, **517**, 6310 (2009).
- [4] Sim, K. U. Shin, S. W. Moholkar, A. V. Yun, J. H. Moon, J. H. Kim, and J. H. J. *J. Appl. Phys.*, **10**, 1016 (2010).
- [5] K. C. Park, D. Y. Ma, and K. H. Kim, *Thin Solid Films*, **81**, 7764 (1997).
- [6] H. G. Lee, Master Thesis, Gyeongsang National University, Jinju (1996).
- [7] K. C. Park, H. K. Lee, T. Y. Ma, and K. H. Kim, *Ungyong Mulli*, **9**, 450 (1996).
- [8] B. H. Choi, H.B. Im, J. S. Song, and K. H. Yoon, *Thin Solid Films*, **193**, 712 (1990).
- [9] R. F. Bunshah, *Deposition Technologies for Films and Coating* (Noyes Publications, 1982) p. 129.
- [10] X. Yu, J. Ma, F. Ji, Y. Wang, X. Zhang, C. Cheng, and H. Ma, *J. Crystal. Growth*, **274**, 474 (2005).
- [11] J. Y. W. Seto, *J. Appl. Phys.*, **46**, 5247 (1975).
- [12] Y. Igasaki and H. Saito, *J. Appl. Phys.*, **70**, 3613 (1991).
- [13] J. K. Sheu, K. W. Shu, M. L. Lee, C. J. Tun, and G. C. Chic, *J. Ele. Soc.*, **154** (1991).
- [14] E. Burstein, *Phys. Rev.*, **93**, 632 (1981).