

고주파 마그네트론 스퍼터링에 의해 성막된 TiO₂가 도핑된 ZnO 박막의 전기적 및 광학적 특성

Electrical and Optical properties of TiO₂-doped ZnO Films prepared on PEN by RF-magnetron Sputtering Method

김화민¹, 손선영^{1,a}

(Hwa-Min Kim¹ and Sun-Young Sohn^{1,a})

Abstract

TiO₂(2 wt.%)–doped ZnO(TZO) films with thickness from 100 nm to 500 nm were prepared on polyethylene naphthalate(PEN) substrate under various rf-power range from 40 W to 80 W. Their electrical and optical properties were investigated as a function of rf-power. We think that these properties were closely related with the crystallization and the film density of TZO films. It was also presumed that the vaporization of the water vapor and other adsorbed particles such as an organic solvents can affect the electrical properties of the conventional transparent conductive oxide(TCO) films. On the other hand, since the TZO film deposited on glass substrate at room temperature with rf-power of 80 W shows a very low resistivity of $7.5 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ and a very excellent transmittance over an average 85% in the visible range, that is comparable to that of ITO films. Therefore, we expect that the TZO films can be used as transparent electrode for optoelectronic devices such as touch-panels, flat-panel displays, and thin-film solar cells.

Key Words : TCO film, ZnO:TiO₂ film, RF-magnetron sputtering, Resistivity, Film density

1. 서론

투명 전도성 산화물(Transparent Conductive Oxide, TCO)은 터치 패널, 평판디스플레이, 그리고 태양전지와 같은 광전소자의 전극으로 널리 사용된다. 최근 불순물이 첨가된 In₂O₃, SnO₂, 그리고 ZnO와 같은 산화물들이 TCO 물질로서 많이 사용되고 있다. 그러나 이러한 물질들은 다양한 환경에서의 화학적 또는 열적 불안정성 때문에 그들의 응용에 있어서 많은 제약을 받는다[1-7]. 특히, 유리 기판을 사용하는 superstrate형 비정질 실리콘(a-Si) 박막 태양전지의 전면 전극(front electrode)

으로 사용되는 투명전도 박막은 태양전지의 효율 향상을 위하여 350 nm~1100 nm 영역에서의 높은 광투과도와 낮은 면저항, 그리고 수소플라즈마에 대한 화학적 안전성 및 광산란 특성 향상을 위한 거친 표면 등의 특성이 요구된다[8]. 특히, 투명전도막의 거친 표면에 의한 입사광의 산란 특성 향상은 빛의 경로 및 다중반사 증가를 통한 태양전지 내의 빛가둠(light trapping) 증대를 통하여 높은 광전류 발생을 유도할 수 있다. Superstrate형 a-Si 박막태양전지의 전극으로는 주로 SnO₂:F 또는 ITO 박막이 사용되고 있으나 수소 플라즈마에 의한 불안정성이나 높은 증착 온도 등이 문제점으로 부각되고 있다[9]. 최근 이를 대체하기 위한 다양한 투명전도막이 개발되고 있으며, 특히 ZnO를 기반으로 하여 다양한 불순물이 도핑된 투명전도막들이 많이 연구되고 있다. 이는 ZnO가 값이 싸고 매장량이 풍부하면서도 대면적 코팅이

1. 대구가톨릭대학교 전자공학과

(경북 경산시 하양읍 금락 1리 330)

a. Corresponding Author : sysohn@cu.ac.kr

접수일자 : 2009. 8. 3

1차 심사 : 2009. 9. 8

심사완료 : 2009. 9. 11

가능하고, 자외선 영역의 광 흡수가 가능하며, 수소 플라즈마에 대한 안정성이 매우 높고, 저온성막이 가능하기 때문이다. 특히, 다양한 소량의 금속(In, Al, Ga, Si, Ti,...) 첨가에 의해 ZnO 박막의 전기적 특성을 크게 향상시킬 수 있기 때문이다[10-15].

그러나, 아무것도 도핑하지 않은 ZnO의 전기적 특성은 산소결핍과 틸이 갈라진 Zn 원자들로부터 화학양론적인 결함을 일으킬 수 있으며, 이는 아무런 도핑하지 않은 ZnO 박막은 불안정한 전기적 특성들을 갖는다는 것을 의미한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 ZnO를 기반으로 한 TCO 박막은 주로 Al, Ga, In과 같은 3족 원소들을 도핑함으로써 약 $10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}$ 정도 감소된 비저항 값을 얻을 수 있었으며, 금속 첨가에 의해 전하 농도와 이동도와 같은 전기적 특성에 미치는 영향에 대해 연구되어지고 있다[16-18]. 반면, 3족 원소들을 도핑한 ZnO 박막들과 비교해 TiO₂가 도핑된 ZnO(TZO)는 한 개의 전하 가전자 상태보다 더 많은 상태를 가질 수 있으며 Ti 원자들이 ZnO 격자 안으로 도핑 되었을 때 두 개의 자유전자들을 제공함에 의해 도너(doner)로써 작용할 수 있다. 현재 TZO에 관한 물성분석은 거의 없으며, 본 실험에서는 고주파-마그네트론 스퍼터링(rf-magnetron sputtering) 장치를 사용하여 제작된 TZO 박막에 대한 기초물성을 보고하고자 하며, 박막증착 시 공정 변수의 함수로 인가전력(rf-power)이 박막에 미치는 영향을 조사하기 위하여, TZO 박막들의 전기적 특성과 광학적 특성들을 분석하였다.

2. 실험

RF 마그네트론 스퍼터링용 TZO(TiO₂:ZnO=2:98 wt.%) 타겟의 제작 공정은 일본 고순도사의 4N(99.99%) 분말을 사용하여 분말내 습기를 제거하기 위하여 진공 오븐을 사용하여 150°C에서 30분 동안 열처리 하였다. 이 분말은 볼 밀(ball mill)에 의해 2시간 동안 혼합한 후 600°C에서 60분 동안 다시 열처리하였다. 열처리된 혼합 분말은 다시 핸드밀(hand mill)과 볼 밀 방법으로 24시간 동안 교반 및 분쇄 작업을 반복하고 1200 kg · weight/cm²의 압력으로 두께 5 mm, 지름 2 인치 원형 디스크 형태로 압착한 후에 1000°C의 공기 중에서 2시간 동안 소결과정을 거쳐 고형화 하였다.

기판은 polyethylene naphthalene(PEN)을 사용하였으며, 박리 또는 편출 등의 현상과 기판위에

제작되는 막(film) 부착성 저하의 요인이 되는 불순물을 제거하기 위하여 알코올 증류수에 의한 열세척과 초음파 세척을 반복하였다. 세척한 기판은 타겟과 평행하게 장착한 후, 타겟 표면의 불순물과 산화층을 제거하기 위하여 매 증착 시 25 sccm의 Ar 가스를 유입하여 10분 동안 예비 스퍼터링(pre-sputtering)을 실시하였다. TZO 박막 증착을 위한 챔버 내의 초기 진공도는 $\sim 10^{-5}$ Torr이었으며, 활성화 가스로는 Ar 가스를 유입시켜 진공도를 2×10^{-3} Torr로 일정하게 유지하면서 증착하였다. 본 실험의 모든 박막들은 상온(room temperature, RT)의 순수한 Ar 분위기에서 100 nm~500 nm 범위의 두께를 갖도록 제작하였다. 이 때 인가된 고주파 전력은 40 W~80 W의 범위로 하여, 증착된 박막들의 인가 전력 의존도를 조사하였다. 그리고 타겟과 기판과의 거리는 항상 60 mm를 유지하였다.

제작된 박막들의 전기적 특성으로는 4-Pin Probe 법에 의한 Lonesta-EP 장치(MCP-T360, Mitsubishi chemical Co.)를 사용해 면저항을 측정하였으며, Van der paw 방법을 이용한 Hall Effect (HEM-2000, EGK Co.) 장치로부터 인가전력에 따른 TZO 박막의 이동도와 캐리어농도를 측정하였다. 광학적 특성으로는 UV-VIS. spectrophotometer (Shimadzu, Japan.)를 사용해 250~1000 nm 파장 범위에서 광투과도를 측정하고, 이로부터 광학적 띠틈(optical band gap)과 굴절률을 계산하여 그 결과를 인가전력의 함수로 분석하였다. 그리고 박막들의 결정성과 표면 미세구조 분석으로는 Rikagu사의 X-선 회절 패턴(X-ray diffraction, XRD), Digital Instrument사의 원자 힘 현미경(atomic forced microscope, AFM), 그리고 Hitachi사의 주사 전자 현미경(scanning electron microscopy, SEM)을 관측하였다. 성막된 TZO 박막들의 두께 측정은 α -step(VEECO Co.)을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 RT에서 PEN 기판 위에 성막된 TZO 박막의 증착율을 나타낸 것이다. 인가 전력이 40, 60, 80 W로 증가함에 따라 TZO 박막의 증착율은 각각 1.02, 1.22, 1.9 A/s로 증가하였다. 이와 같은 인가전압에 따른 증착률을 통한 증착시간을 조절함으로써, 박막의 두께를 제어할 수 있다.

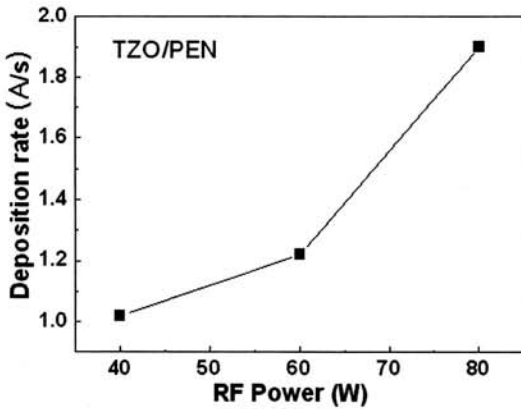


그림 1. Rf 마그네트론 스퍼터링에 의해 실온에서 PEN 기판위에 제작된 TZO 박막들의 rf-파워의 함수에 따른 증착율.

Fig. 1. Deposition rate as a function of rf-power for TZO films deposited on PEN substrate at RT by using rf-magnetron sputtering.

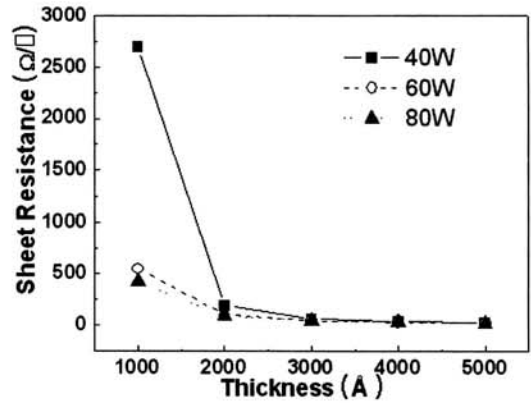


그림 2. 다양한 증착 파워에서 증착두께의 함수에 따른 TZO 박막의 면저항 변화.

Fig. 2. Changes of sheet resistance of the TZO thin films as a function of deposition thickness at various deposition power.

그림 2는 서로 다른 인가전압 하에서 박막 두께의 함수에 따른 TZO 박막의 면저항을 나타낸 것이다. 일반적으로 박막의 면저항 R_s 는 박막의 두께에 반비례하며, 비저항과의 관계식은 다음과 같이 주어진다. $\rho = R_s \cdot t$ 이며, 여기서 R_s 와 t 는 각각 박막의 면저항과 증착두께이고, ρ 는 박막의 비저항을 나타낸다. 따라서 그림 2에서 TZO 박막의 면저항은 두께가 증가할수록 현저하게 감소한다. 여기서 한 가지 주목할 것은 박막 증착 시 인가된 전압이 박막의 전기적 특성에 큰 영향을 주는 것을 볼 수 있다. 즉, 동일한 증착두께를 갖는 TZO 박막의 경우 인가전압이 증가할수록 면저항이 감소하며, 특히 TZO 박막의 두께가 2000 Å이하인 경우 더욱 차이가 나타난다.

일반적으로 박막은 물질이 증착되면서 증발(vapor) 또는 원자 분자들이 응축하게 되는데, 증착방법과 증착조건(기판온도, 증착률, 인가전압, 압력)에 의해 결정되는 이동도(mobility)를 갖고 박막 표면에 확산되어 평형 위치로 이동한다. 그러나 인가전력이 작을 경우, 낮은 이동도를 갖는 증착종(adatom)들은 기판에 충돌하는 순간 동결(freeze)됨으로써, 평형위치로 이동하기 어렵다. 그 결과 박막은 비정질 또는 결정립과 결정립 사이의 기공(pores)으로 구성된 그림 3의 (a)와(d)처럼 열린(open)구조를 갖는 반면, 증착종의 에너지가 클 경

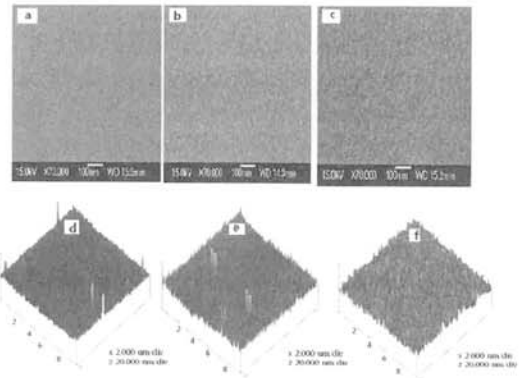


그림 3. 다양한 rf-파워에서 200 nm 두께를 갖고 제작된 TZO 박막의 SEM(위)과 AFM(아래) 이미지들.

Fig. 3. SEM(top) and AFM(bottom) images of the TZO thin films deposited with 200 nm thickness under various rf-power. (a) and (d) of 40 W, (b) and (e) of 60 W, (c) and (f) of 80 W.

우에는 기판에 도달하여 응축되기 전에 그들의 평형상태에 도달하려하기 때문에 박막은 그림 3의 (c)와 (f)에서처럼 상대적으로 치밀한 구조를 형성하게 될 것이다.

그림 3은 200 nm의 동일한 증착 두께를 갖는 TZO 박막들에서 인가전력의 함수에 따른 박막들의 SEM(a, b, c)과 AFM(d, e, f) 이미지들을 보여 주고 있다. 우선 SEM 사진들을 비교해 보면, 인가전력이 40 W에서 80 W로 증가함에 따라 TZO 박막의 결정립의 크기가 증가하면서 더욱 치밀한 구조를 갖는 것을 볼 수 있다. 인가전력의 증가에 따른 TZO 박막의 구조적 특성 향상은 전자의 이동도를 증가시켜 전기 전도성을 증가 시킬 수 있으며, 이 결과는 그림 4의 XRD의 회절 패턴으로부터도 확인할 수 있다.

그림 4는 인가전력의 함수에 따른 TZO 박막의 XRD 패턴을 나타낸 것이다. 본 실험의 증착조건에서 제작된 모든 TZO 박막은 육방정계 (hexagonal wurtzite) 구조를 가지며 c축 우선 배향성을 나타내었다. 그림 4에서 보는 바와 같이 TZO 박막의 우선 배향성은 인가전압이 커질수록 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 XRD 분석결과로부터 Scherrer fomular를 이용하여 입자의 결정 크기를 산출하였다[19].

$$D = \frac{0.9\lambda}{B \cos \theta} \quad (1)$$

계산에 적용된 X-선의 파장(λ)은 Cu-K α 선 (1.5405 Å)이며, B는 [001] 피크의 반치폭(full width at half maximum, FWHM), θ 는 회절각을 나타낸다. XRD결과로부터 [001] 피크의 반치폭은 0.310°~0.635°로 측정되었으며, 이로부터 식 (1)에 의하여 계산된 입자의 결정크기는 16~28 nm로 나타났다. 즉, 인가전력이 증가함에 따라 TZO 박막의 결정성이 향상되면서 박막밀도도 증가하는 것으로 분석되었다. 결정성 향상과 박막 밀도의 증가는 TZO 박막의 전기전도도(conductivity)에 영향을 줄 수 있다. 박막밀도가 증가하면, 캐리어들의 평균자유행로(mean free path)가 증가하게 되고, 이는 곧 전하이동도(mobility)의 증가를 의미한다[8]. 따라서 인가전압이 증가함에 따라 TZO 박막의 면저항이 감소하는 것은 박막밀도의 증가에 의한 것으로 설명할 수 있다.

그림 5는 인가전력 변화에 따른 TZO 박막들의 hall effect 측정 결과를 나타낸 것이다. 그래프에서 인가전압이 증가함에 따라 이동도가 증가하면서 비저항이 감소하는 결과를 나타내고 있다. 그림 5에 삽입된 그래프는 TZO 박막의 전하 농도(carrier concentration)를 인가전력의 함수로 나타낸 것이다. 전하 농도는 인가 전력이 증가함에 따라 증가하는 것을 보여 준다. 따라서 TZO 박막의

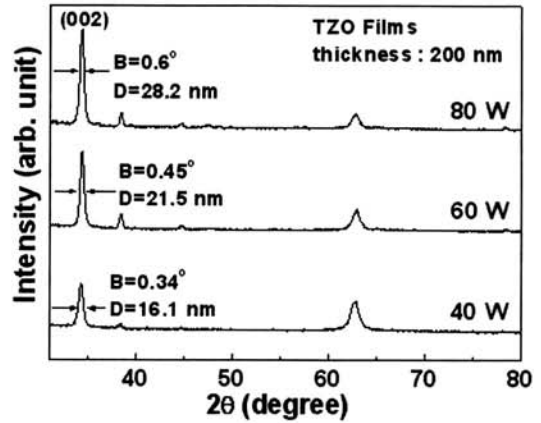


그림 4. 다양한 rf-파워에서 PEN 기판위에 200 nm의 두께를 갖는 TZO 박막의 XRD 패턴들.

Fig. 4. X-ray diffraction patterns of the TZO thin films with thickness of 200 nm on PEN substrate under various rf-power.

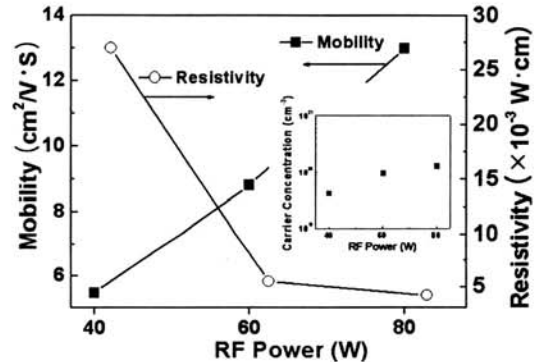


그림 5. PEN 기판위에 rf-파워의 함수에 따른 TZO 박막의 저항과 이동도. 삽입된 그래프는 다양한 증착 파워를 갖는 TZO 박막들의 전하 농도를 나타낸 것이다.

Fig. 5. Resistivity and mobility of the TZO thin films as a function of rf-power on PEN substrate. The inset shows the carrier concentration of TZO films with various deposition power.

전기적 특성은 인가전력이 증가함에 따라 결정립의 크기가 증가함에 따라 박막의 이동도가 빨라지며 박막밀도가 증가함에 의해 비저항이 낮아지는

것으로 사료된다. 한편 인가전력 증가에 따른 비저항의 감소에는 전하 운반자의 증가에도 기인할 수 있으나 현재의 실험 데이터 만으로는 인가전력 증가에 따른 전하 운반자의 증가를 설명하기는 어렵다.

일반적으로 PEN, polyethylene terephthalate (PET), polycarbonate(PC)와 같은 플라스틱 기판은 기판 자체에 수분이나 유기 용매와 같은 휘발성 물질을 포함하고 있기 때문에 TCO 박막 증착시 이들이 기판으로부터 확산되어 TCO 박막의 전기적 특성에 영향을 줄 수 있으므로, 그림 4에 나타난 인가전력에 따른 전하 운반자농도변화는 이와 무관하지는 않을 것이다. 즉, 인가 전력이 40 W일 때 증착률은 1.09 A/s이고, 인가 전력이 80 W일 때 증착률은 약 2 A/s이므로 40 W 일 때보다 두 배 이상의 증착률을 가진다. 이 결과는 동일한 두께의 TZO 박막을 제작하기 위해서는 80 W보다 40 W일 때 증착시간이 두 배 정도 더 소요되며, 증착시간이 길어질수록 PEN 기판으로부터 확산되는 수분 및 유기용매와 같은 성분들이 TZO 박막에 더 많은 영향을 끼칠 것으로 예측된다. 즉 다시 말해 TZO 박막은 인가 전력이 작을수록 박막 증착시간이 길기 때문에 PEN 기판으로부터 확산되는 수분을 많이 흡착하게 된다. 물론 여기서 박막의 운반자는 전자이다. ZnO는 전형적인 n-type 반도체이며, 박막 내의 전도전자는 산소 결핍(oxygen vacancy)에 주로 기인하므로 TZO 박막의 인가전압에 의한 전하운반자의 변화는 다음과 같이 설명할 수 있다. 흡착된 수분은 주로 TZO 박막의 산소 결핍을 줄여 줌으로써 운반자의 농도를 감소시키는 것으로 추정할 수 있다.

그림 6은 PEN 기판 위에 500 nm의 두께를 갖는 TZO 박막들의 인가전력에 따른 광투과 스펙트럼을 나타낸 것이다. 각 박막은 두께가 같기 때문에 가시광 영역에서 Bragg 반사에 의한 광투과율의 최대와 최소에 의한 진동피크들이 거의 비슷한 경향을 보이며, 가시광 영역에서 평균투과율이 약 83% 이상의 매우 우수한 광투과 특성을 나타내고 있다. 한편, 광투과도 스펙트럼의 흡수단(absorption edge) 영역에서의 광투과율(transmittance, T)은 식 (2)로 주어진다.

$$T = A \exp(-at) \quad (2)$$

여기서 A, a, t는 각각 상수, 흡수계수, 박막의 두께를 나타낸다. A는 흡수단에서는 거의 1이기 때문에 박막의 두께를 알면, 앞의 식을 이용하여 a를 구할 수 있다. 그리고 직접 천이에 대한 a와 임

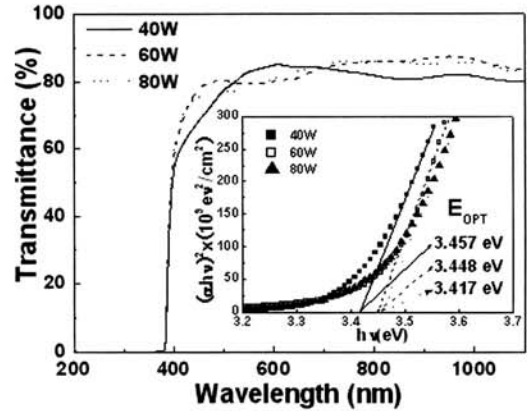


그림 6. 다양한 rf-파워에서 PEN 기판위에 500 nm의 증착 두께를 갖고 제작된 TZO 박막의 광학적 투과율. 삽입물은 광학적 투과율 스펙트럼으로부터 계산된 ahv 대 hv 의 그래프를 보여주고 있다.

Fig. 6. Optical transmittance of TZO thin films deposited with deposition thickness of 500 nm on PEN substrate under various rf-power. The inset shows a plot of ahv vs. hv calculated from the optical transmittance spectra.

사광의 에너지 hv 사이의 관계식 $ahv = A'(hv - E_{opt})$ 으로부터 각 박막들의 광학적 띠 간격(optical band gap)인 E_{opt} 를 구할 수 있다. 그림 6에 삽입된 그래프는 Tauc 관계식(Tauc's relation)에 의해 계산된 $(ahv)^2$ 대 hv 의 그래프에서 나타나는 직선 부분을 연장하여 hv 축과 교차하는 부분의 값으로부터 광학적 띠간격을 구할 수 있다[20]. TZO 박막의 광학적 띠간격은 그림 6의 삽입된 그래프에서 보는 바와 같이 인가 전력이 증가함에 따라 3.457 eV에서 3.417 eV로 약간씩 감소하는 것으로 나타나는데 이는 그림 5에서 rf-파워 증가에 따른 TZO 박막의 전기적 특성 향상과 잘 일치한다. 이는 Burnstine Moss 효과로 알려져 있으며, 광학적 띠간격의 증가치인 ΔE_{opt} 는 식 (3)으로 주어진다.

$$\Delta E_{opt} = \frac{\hbar^2}{2m^*} (3\pi^2)^{\frac{2}{3}} N^{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

여기서 \hbar 는 Planck 상수이고, m^* 는 유효 질량(effective mass)이다. 식 (3)으로부터 운반자 농도인 N 이 증가함에 따라 광학적 띠간격이 커짐을 알 수 있다.

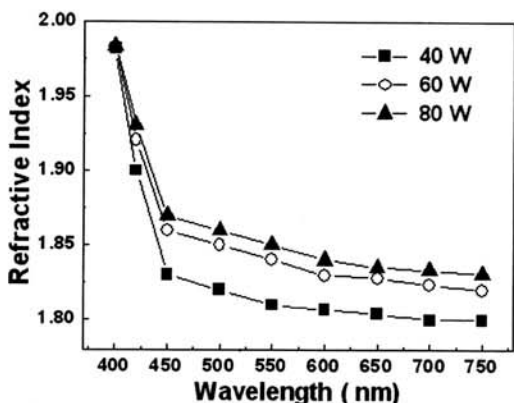


그림 7. 파장의 함수에 따른 다양한 rf-파워에서 제작된 TZO 박막들의 굴절율.

Fig. 7. Refractive index of the TZO thin films deposited under various rf-power as a function of wavelength.

그림 7은 그림 6의 광투과도 스펙트럼으로부터 Modified Envelope 방법을 사용하여 각각 인가전력이 다른 TZO 박막들의 굴절율을 가시광 영역에서 계산하여 그 결과를 파장의 함수로 나타낸 것이다. TZO 박막의 굴절율은 인가전력이 증가함에 따라 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이 결과는 그림 3에서 SEM과 AFM 이미지에서 관측된 바와 같이 인가전력이 증가함에 따라 박막밀도가 치밀해지는 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

한편 위의 설명이 옳다면, 잔류가스가 방출되지 않는 유리 기판 위에 TZO 박막을 성막할 경우에는 TZO 박막의 전기적 특성이 많이 향상될 것으로 판단되어 본 실험에서는 그림 8과 같이 유리 기판과 PEN 기판 위에 동일한 조건으로 성막된 TZO 박막의 전기적 특성을 비교하였다. 예측되었던 것처럼 유리위에 성막된 TZO 박막의 면저항이 PEN 기판위에 성막된 TZO 박막들의 면저항보다 작은 것을 볼 수 있으며, 특히 200 nm 이하의 두께에서 더욱 현저하게 감소한 것을 알 수 있다. 한편, 그림 8에 나타난 실선과 점선은 비저항과 면저항의 관계식인 $\rho = R_s \cdot t$ 을 이용하여 어떤 특정 비저항 값으로부터 피팅된 면저항의 이론값을 두께의 함수로 나타낸 것이다.

이론적으로 계산된 비저항 값은 그림 8에 나타난 바와 같이 PEN 기판의 경우 $1.2 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 이며, 반면 유리 기판에 성막된 TZO 박막의 경우는 $7.5 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 의 매우 낮은 비저항을 보여주고 있다. 이는 현재 투명전도막으로 가장 많이 사용되

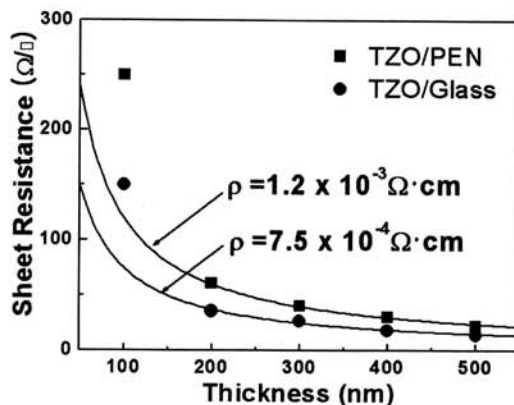


그림 8. PEN과 유리 기판위에 제작된 TZO 박막의 막 두께의 함수에 따른 면저항의 변화.

Fig. 8. Changes of sheet resistance as a function of the film thickness for TZO thin films prepared on PEN and glass substrates.

고 있는 ITO 박막의 비저항($\sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$)과 거의 대응되는 값이다. 이 결과에 의하면, PEN과 같은 플라스틱 기판을 사용하여 TCO 박막을 증착할 경우, TCO 박막의 전기전도도를 향상시키기 위해서는 기판과 TCO 박막 사이에 가스 차단막(gas barrier layer)을 삽입하거나 TCO 박막을 증착하기 전에 플라스틱 기판을 최적의 온도에서 열처리하여 잔류 가스를 충분히 제거 한 후, TCO 박막을 증착하는 것이 바람직 할 것이다.

4. 결론

Rf-마그네트론 스퍼터링 방법을 사용하여 PEN 기판위에 TiO_2 가 도핑된 ZnO(TZO) 박막들을 100 nm에서 500 nm의 증착두께로 40~80 W의 다양한 인가전력의 함수에 따라 제작되었으며, 이들 박막의 전기적, 광학적, 그리고 구조적인 특성들에 대해 분석하였다. PEN 기판 위에 성막된 TZO 박막들의 비저항은 인가전력이 증가함에 따라 현저하게 감소하는 것으로 나타나는데, 이는 인가전력이 증가함에 따라 TZO 박막의 결정립 크기가 증가할 뿐만 아니라 박막의 밀도 또한 증가함으로써 TZO 박막의 전하 이동도가 증가했기 때문인 것으로 사료된다. 한편 광학적 특성으로는 광학적 띠틈간격이 인가 전력이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났으며, 이와 같은 광학적 띠틈간격의 감소는 전하운반자 농도의 증가에 의한 Burstein Moss 효과

로 설명될 수 있다. 한편 80 W의 인가 전력에서 유리 기판위에 성막된 TZO 박막은 $7.5 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 의 매우 낮은 비저항과 가시광에서 평균 85% 이상의 매우 우수한 광투과율 특성을 보여주는데 이는 ITO와 비교해 유사한 특성을 가지며 차후 평판 디스플레이 또는 박막형 태양전지와 같은 광전기 소자의 투명전극으로 충분히 사용될 수 있음을 제시한다.

참고 문헌

- [1] K. L. Chopra and D. K. Pandya, "Transparent conductors - A status review", *Thin Solid Films*, Vol. 102, p. 1, 1983.
- [2] S. Takada, T. Minami, and H. Nanto, "The stability of aluminium-doped ZnO transparent electrodes fabricated by sputtering", *Thin Solid Films*, Vol. 135, p. 183, 1986.
- [3] Z. L. Pei, C. Sun, M. H. Tan, J. Q. Xiao, R. F. Huang, and L. S. Wen, "Optical and electrical properties of direct-current magnetron sputtered ZnO:Al films", *J. Appl. Phys.*, Vol. 90, p. 3432, 2001.
- [4] K. Tabuchi, W. W. Wenas, A. Yamada, M. Konagai, and K. Takahashi, "Optimization of ZnO films for amorphous silicon solar cells", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 32, p. 3764, 1993.
- [5] I. An, Y. Lu, C. R. Wronski, and R. W. Collins, "Real time spectro ellipsometry study of the interaction of hydrogen with ZnO during ZnO/a-Si_{1-x}C_xH interface formation", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 64, p. 3317, 1994.
- [6] 이재형, "플라스틱 기판에 증착한 ZnO:Al 박막의 특성에 미치는 스퍼터 압력 효과", *전기전자재료학회논문지*, 22권, 3호, p. 277, 2009.
- [7] 김봉석, 이규일, 강현일, 이태용, 오수영, 이종환, 송준태, "다층박막을 이용한 Ga-doped ZnO 투명전도막의 특성", *전기전자재료학회 논문지*, 20권, 12호, p. 1044, 2007.
- [8] 이정철, 윤경훈, "박막 실리콘 태양전지 기술 동향", *세라미스트*, 8권, 5호, p. 7, 2005.
- [9] U. Lampe and J. Muller, "Thin-film oxygen sensors made of reactively sputtered ZnO", *Sens. Actuators*, Vol. 18, p. 269, 1989.
- [10] W. H. G. Horsthuis, "ZnO processing for integrated optic sensors", *Thin Solid Films*, Vol. 137, p. 185, 1989.
- [11] S. Honda, A. Tsujimoto, M. Watamori, and K. Oura, "Oxygen content of indium tin oxide films fabricated by reactive sputtering", *J. Vac. Sci. Technol. A*, Vol. 13, p. 1100, 1995.
- [12] I. Hamberg and C. G. Granqvist, "Evaporated Sn-doped In₂O₃ films: Basic optical properties and applications to energy-efficient windows", *J. Appl. Phys.*, Vol. 60, p. R123, 1986.
- [13] T. Minami, H. Nanto, and S. Takata, "Highly conductive and transparent aluminum doped zinc oxide thin films prepared by RF magnetron sputtering", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 23, p. L280, 1984.
- [14] J.-M. Park, J.-S. Hong, J.-J. Kim, S.-H. Park, H.-M. Kim, and J.-S. Ahn, "Bending effects of indium-zinc oxide thin films deposited on polyethylene terephthalate substrate by radio frequency magnetron sputtering", *J. Korean Phys. Soc.*, Vol. 48, p. 1530, 2006.
- [15] J. M. Park, J. J. Kim, H. M. Kim, J. H. Kim, S. W. Ryu, S. H. Park, and J. S. Ahn, "Substrate effects on the characteristics of (In₂O₃)_{1-x}(ZnO)_x films", *J. Korean Phys. Soc.*, Vol. 48, p. 1624, 2006.
- [16] K. Ito and T. Nakazawa, "Transparent and highly conductive films of ZnO prepared by RF sputtering", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 22, p. L245, 1983.
- [17] T. Minami, H. Saito, S. Takada, and I. Fukuda, "Low temperature formation of textured ZnO transparent electrodes by magnetron sputtering", *J. Vac. Sci. Technol. A*, Vol. 13, p. 1053, 1995.
- [18] Y. Igasaki and H. Saito, "The effects of deposition rate on the structural and electrical properties of ZnO:Al films deposited on (110) oriented sapphire substrates", *J. Appl. Phys.*, Vol. 70, p. 3613, 1991.
- [19] D. Mardare, M. Tasca, M. Delibas, and G. I. Rusu, "On the structural properties and optical transmittance of TiO₂ r.f. sputtered thin films", *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 156, p. 200, 2000.
- [20] J. Tauc, in: J. Tauc (Ed.), *Amorphous and Liquid Semiconductors*, Plenum, London, 1974.