Journal of the Korean Ceramic Society
Vol. 47, No. 4, pp. 329~332, 2010.

DOI:10.4191/KCERS.2010.47.4.329

The Effect of Tail State on the Electrical and the Optical Properties in Amorphous IGZO

Sung-Hwan Bae*, Il Hwan Yoo*, Sukill Kang, and Chan Park*,***,†**

*Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea
**Department of Physics, Chounbuk National University, Jeonju 561-756, Korea
***Research Institute of Advanced Materials (RIAM), Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

(Received March 30, 2010; Revised May 6, 2010; Accepted May 28, 2010)

비정질 $InGaZnO_4$ 박막의 전기적, 광학적 특성간의 상관관계 연구

배성환* · 유일환* · 강석일 · 박 찬*,***,†**

*서울대학교 재료공학부
**전북대학교 물리학과
***서울대학교 신소재공동연구소

(2010년 3월 30일 접수 ; 2010년 5월 6일 수정 ; 2010년 5월 28일 승인)

ABSTRACT

In order to investigate the effect of tail state on the electrical and the optical properties in amorphous IGZO(a-IGZO), a-IGZO films were deposited at room temperature on fused silica substrats using pulsed laser deposition method. The laser pulse energy was used as the processing parameter. In-situ post annealing was carried out at 150°C right after the film deposition. The O_2 partial pressure during the deposition and the post annealing was fixed to 10mTorr. The carrier mobility of the a-IGZO films had a range from 2 to 18 cm^2/Vs at carrier concentrations greater than 10^{18} cm^{-3}. As the laser energy density increased, the Hall mobility increased. And post annealing improved the Hall mobility, as well. The optical property was examined using the ultraviolet-visible spectroscopy. The a-IGZO films that have low Hall mobility exhibited stronger and broader absorption tails in >3.0 eV region. Post annealing reduced the intensity of the tail-like absorption. The absorption tail in a-IGZO films is an important factor which affects the electrical and the optical properties.

Key words **: *Amorphous oxide semiconductor, Thin film transistor, IGZO, Absorption tail***

1. 서 론

투명 비정질 산화물 반도체(Transparent Amorphous Oxide Semiconductor; TAOS)는 디스플레이의 구동소자인 박막 트랜지스터(Thin film transistor; TFT) 소자에 채널층으로 사용되며, 투명하면서 유연성이 있는 소자를 저비용으로 제작할 수 있는 장점을 가진다.[1-6] TAOS 재료 중 비정질 In-Ga-Zn-O(IGZO)는 플라스틱과 유리 기판 위에 저온 공정으로 소자를 제작할 수 있으면서도 다른 비정질 재료에 비해 높은 전하 이동도(~20 cm^2/Vs)를 가지기 때문에 우수한 성능의 TFT 소자를 제작할 수 있다. 이러한 장점 때문에 2004년 비정질 IGZO를 TFT의 채널층으로 사용한 TFT 결과가 발표[1]된 이후 활발한 연구가 진행되어 왔으며, 현재 비정질 IGZO를 TFT 소자의 채널층으로 사용한 디스플레이 제품이 생산되는 수준으로 발전했다.

우수한 성능의 TFT 소자를 제작하기 위해서는 높은 전하 이동도를 가지는 채널층을 증착하여야 한다. 높은 전하이동도의 비정질 IGZO 박막을 얻기 위해서 증착 공정시의 변수제어 외에 후열처리 공정을 통해 박막의 성능을 높인 결과도 발표되었다.[7] TFT 소자제조공정에서, 기판재질이 플라스틱인 경우에는 150°C 이하에서, 유리기판의 경우에는 250°C 이하에서 모든 공정이 이루어 져야 한다. 하지만 비정질 IGZO를 300°C 이상의 온도에서 후열처리 하였을 때, 전하이동도 값이 향상된다는 것이 보고되었으며,[7] 300°C 이하 온도에서의 열처리에 따른 성능 변화 결과는 보고된 바 없다.

비정질 반도체 재료의 전하이동도는 비정질 상태의 구조적 혼란에 의한 tail state의 영향을 받는다.[8] 그리고 이러한 tail state는 광학적 흡수 스펙트럼을 통해 absorption tail을 분석함으로써 알 수 있다. 본 연구에서는 증착 공정 변수와 후열처리 조건이 전하이동도와 absorption tail에 미치는 영향을 조사하여 전하이동도와 tail state간의

†Corresponding author : Chan Park
E-mail : pchan@snu.ac.kr
Tel : +82-2-880-9324 Fax : +82-2-884-1413

Table 1. Table of Deposition Conditions and Results of Hall Measurement of IGZO Films

Sample Name	Pressure (mTorr)	Laser energy density (J/cm^2)	Post annealing	Carrier concentration ($/cm^3$)	Mobility (cm^2/Vs)
LE1	10	0.8	×	-2.80E+18	2
LE2	10	2	×	-2.00E+18	4
LE4	10	4	×	-5.00E+18	10
LE6	10	6	×	-4.40E+18	12
LE4A	10	4	○	-1.87E+18	18

상관관계를 분석하였다.

2. 실험 방법

인듐, 갈륨, 아연의 원자 비를 1:1:1로 가지는 $InGaZnO_4$ (IGZO)를 고상반응법으로 합성하였다. 합성된 IGZO 분말을 타겟으로 제작하여 pulsed laser deposition(PLD)법으로 fused silica 기판 위에 박막으로 제조하였다. 10 mTorr 산소 분위기에서 기판을 가열하지 않고 레이저의 에너지 밀도를 달리하면서 다양한 전하 이동도를 가지는 IGZO 박막을 증착하였다. 비정질 IGZO 박막의 경우 전하농도가 증가할수록 전하이동도가 증가하는 결과가 이미 보고된 바가 있다.[1,9] 본 실험에서는 전하농도의 변화를 최소화하고, 전하이동도와 광학적 특성간의 상관관계를 조사하기 위하여 증착 시의 산소 분압과 동일한 분위기에서 후열처리를 진행하였다.

후열처리 공정은 온도 150°C에서 30분간 진행하였다. 증착한 IGZO박막과 후열처리한 IGZO 박막의 결정성을 X-ray 회절(XRD; X'pert pro)장비를 이용하여 확인하였다.

박막의 파단면을 FESEM(SUPRA 55VP)으로 관찰하여, 비정질 IGZO 박막은 200~270 nm 정도의 두께를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 증착된 박막의 홀효과를 van der Pauw 법을 이용하여 측정하고, 전하이동도를 계산하였다 (HMS-3000). 홀효과 측정은 상온에서 0.5T의 자장을 사용하였다. UV-VIS 분광기(CARY 5E, Varian)을 이용하여, 비정질 IGZO 박막의 광투과도와 파장에 따른 흡수계수의 변화를 측정하여, absorption tail을 분석하였다.

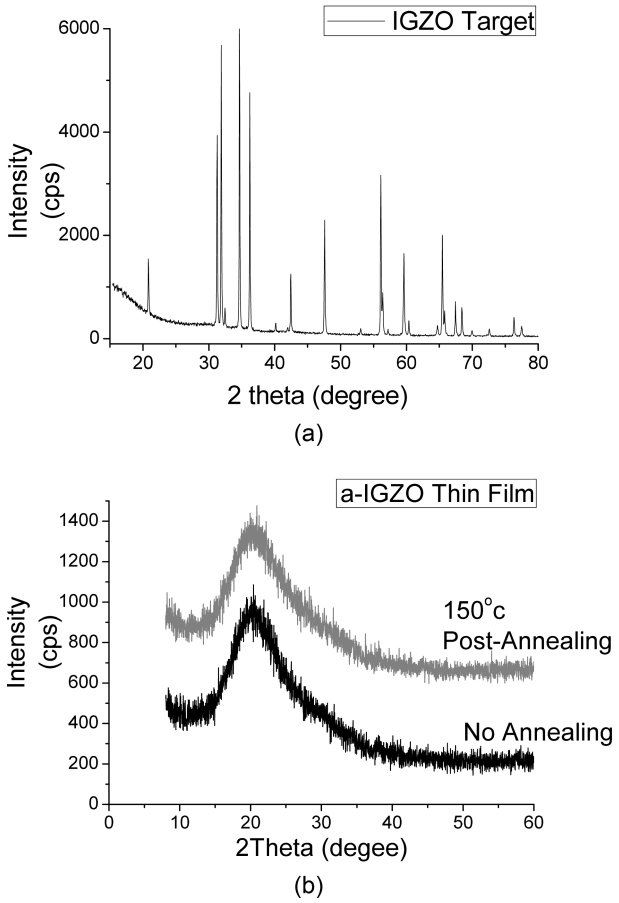

Fig. 1. X-ray diffraction pattern of (a) IGZO target and (b) a-IGZO film deposited on fused silica substrate at room temperature. $CuK_{\alpha 1}$ radiation was used.

3. 결과 및 고찰

Table 1은 비정질 IGZO 박막들의 증착조건과 그에 따른 홀효과 측정 결과를 나타낸 표이다. 10 mTorr 산소분위기에서 증착한 박막은 레이저 에너지 밀도와 관계없이 $10^{18}/cm^3$ 정도의 전하농도를 가졌으며 10 mTorr 산소분위기, 150°C, 30분 후열처리 후에도 비슷한 $10^{18}/cm^3$ 정도의 전하농도를 가지는 것을 확인하였다. 후열처리하기 전 LE4 샘플보다 후열처리한 후 LE4A 샘플의 경우 10 cm^2/Vs에서 18 cm^2/Vs로 전하이동도가 상승하였다. 열처리 공정을 거치지 않은 샘플들의 경우(LE1, LE2, LE4, LE6), 레이저의 에너지 밀도 값이 상승함에 따라 전하이동도가 상승하였다.

각 샘플들의 결정성을 확인하기 위하여 XRD 분석을 이용하였으며, 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1 (a)은 증착 시 사용된 결정질 IGZO 타겟의 XRD 패턴이며 Fig. 1 (b)는 PLD법으로 상온에서 증착한 박막과 150도에서 후열처리를 거친 박막의 XRD 패턴이다. Fig. 1 (a)의 XRD

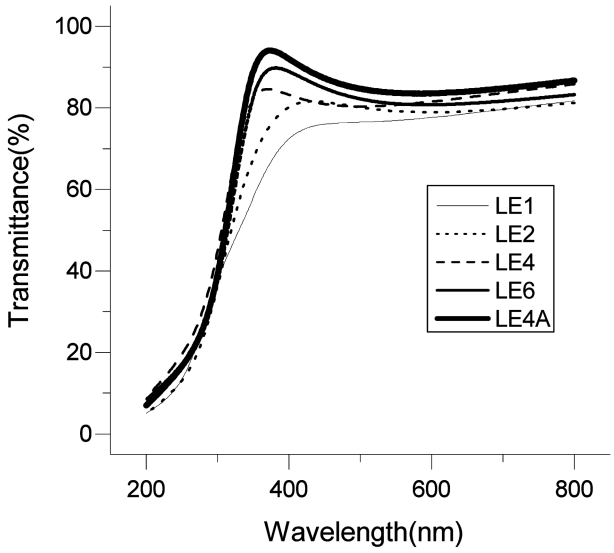

Fig. 2. The optical transmission spectrum of the films.

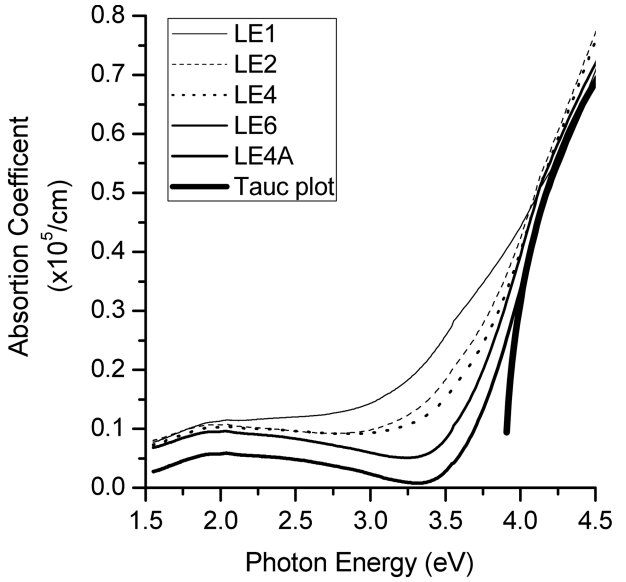

Fig. 3. The optical absorption of the films.

패턴은 타겟이 순수 다결정의 $InGaZnO_4$으로 합성되었음을 보여준다. Fig. 1 (b)의 박막의 XRD 패턴에서는 결정질 peak이 관찰되지 않았으며 열처리 후에도 비정질 상이 유지되었음을 보여준다.

Fig. 2는 비정질 IGZO 박막의 파장에 따른 광학적 투과도의 변화를 나타내고 있다. 산소 10 mTorr에서 증착한 박막(LE4)과 같은 분압에서 열처리한 박막(LE4A)의 경우 모두 가시광선 영역에서 80% 이상의 광투과도를 보였으며, 후열처리 공정을 거치면서 박막의 광투과도가 상승하였다는 것을 확인할 수 있다. 특히 300 nm~400 nm 부근의 파장에서 광투과도가 크게 상승하였다.

10 mTorr에서 레이저 에너지 밀도를 달리하며 증착한 박막(L1, L2, L4, L6)의 경우에도 레이저 에너지 밀도 값의 변화와 관계 없이 모든 샘플이 가시광선 영역에서 80% 이상의 광투과도를 나타내었다. 레이저 에너지의 밀도가 증가할수록 광투과도가 상승하였으며, 300 nm~ 400 nm 부근의 파장에서 광투과도가 크게 상승하였다.

Fig. 3은 측정한 광투과도를 바탕으로 흡수계수를 계산한 결과이다. 흡수계수는 Beer-Lambert법($I=I_0e^{-\alpha x}$, I: 박막을 투과한 광에너지, I_0: 입사한 광에너지, α: 흡수계수, x: 박막의 두께)을 이용하여 계산하였다. 또한 absorption tail을 정의하기 위해 흡수계수 그래프에 Tauc plot을 추가하였다. 비정질 반도체의 기초 흡수단 부근에서의 흡수계수 스펙트럼은 일반적으로 Tauc 영역과 Urbach 영역으로 나뉜다. Tauc 영역은 가전자대와 전도대 간의 광학적인 천이 현상에 기인하는 것으로 다음과 같은 식을 따른다.

$$\alpha(E) = B\sqrt{(E-E_{Tauc})}/E$$

α는 흡수계수, B는 상수, E_{Tauc}는 Tauc gap으로 비정질 재료의 광학적 밴드갭에 해당하는 특정 에너지이다. 비정질 반도체 재료 내에서 tail state가 존재하면 absorption tail에 의한 천이가 발생하여 Tauc gap 에너지 보다 낮은 에너지를 가지는 광자의 흡수계수가 증가한다. 이러한 absorption tail에 의한 천이로 광흡수가 증가하는 영역을 Urbach 영역이라 하며, 이 영역의 흡수계수를 비교함으로써 비정질 반도체 내의 absorption tail의 양을 예측할 수 있다. 비정질 산화물 반도체 IGZO에서 tail state는 2.0 eV에서 3.7 eV 에너지 영역대의 흡수계수를 높이는 것으로 발표가 되었다.[7] Fig. 3에서와 같이 산소 10 mTorr에서 증착한 박막 LE4와 같은 분위기에서 후열처리한 LE4A의 광자 에너지에 따른 흡수계수의 변화를 나타내었다. 후열처리 후 2.0 Ev~4.0 eV 광자 에너지 영역대의 흡수계수가 감소하였으며, 전하이동도는 상승하였다. 열처리를 거치지 않고 조사하는 레이저 에너지 밀도를 0.8 J/cm^2 (LE1), 2 J/cm^2 (LE2), 4 J/cm^2 (LE4), 6 J/cm^2 (LE6)로 변화시켰을 때의 비정질 IGZO 박막 들도 레이저 에너지 밀도가 상승함에 따라 2.0 Ev~4.0 eV 광자 에너지 영역대의 흡수계수가 감소하였다. 후열처리를 거친 박막과 높은 레이저 레이저 에너지 밀도에서 증착한 박막들은 높은 전하이동도를 가지며 비정질 박막에서 낮은 흡수계수의 값을 보였다.

이러한 흡수계수의 변화는 비정질 박막의 absorption tail의 변화에 기인한 것으로, absorption tail은 비정질 박막에서 전하의 이동도를 감소시키는 원인이다. 증착 공정 시에 높은 레이저 에너지 밀도와 증착 공정 후에 150°C에서 이루어지는 후열처리 공정은 박막 내의 absorption tail을 감소시켜 전하이동도를 상승시킨다. 위의 결과들을 바탕으로 비정질 IGZO 박막 내에서의 absorption tail이 전하이동도의 값을 결정하는 중요한 요인임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 tail state가 비정질 IGZO 박막의 전기적, 광학적 특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 증착 시의 레이저 밀도변화와 후열처리 공정에 따른 전하이동도와 광흡수계수의 변화를 분석하였다.

레이저 밀도변화에 따른 전기적, 광학적 특성변화를 분석하기 위하여, 10 mTorr 산소분위기, 상온에서 fused silica 기판에 비정질 IGZO 박막을 다양한 레이저 에너지 밀도 조건에서 PLD법으로 성장하였다. 전기적 특성의 경우 레이저 에너지 밀도가 증가할수록 전하이동도가 상승하였다. 가시광선 영역에서 80% 이상의 광투과도를 보였으며 전하이동도가 높을수록 투과도가 상승하였다. 흡수계수를 이용하여 tail state을 분석한 결과 absorption tail이 작을수록 전하이동도가 큰 값을 보였다.

후열처리가 전기적, 광학적 특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 10 mTorr 산소분위기, 150도에서 비정질 IGZO 박막을 열처리하였다. 후열처리 공정은 비정질 IGZO 박막의 전하이동도를 상승시켰으며, 이는 현재의 디스플레이 공정 상에서 저온 열처리를 통한 TFT의 성능 향상 공정의 개발이 가능한 온도범위이다. 후열처리의 결과 가시광선 영역의 광투과도가 상승하였며, absorption tail은 감소하였다.

비정질 IGZO 박막은 n-type의 산화물 반도체로 전자의 전도에 conduction band 부근의 tail state가 큰 영향을 끼친다. 높은 전하이동도 특성의 비정질 IGZO 박막의 경우, 흡수계수가 낮은 값을 보인다. 이는 absorption tail이 감소함에 따라 흡수계수가 감소하고 conduction band 부근의 tail state가 감소하였기 때문이다. 결론적으로 비정질 IGZO 박막에서 높은 에너지 밀도나 열처리 공정은 conduction band 부근의 tail state를 감소시켜, 전하이동도를 상승시키는 중요한 요소이다. 열처리를 거치지 않은 박막과 150°C 후열처리를 거친 박막의 측정된 가장 높은 전하이동도는 각각 12 cm^2/Vs와 18 cm^2/Vs이었다.

Acknowledgment

이 논문은 2008년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2008-314-D00174).

REFERENCES

1. K. Nomura, H. Ohta, A. Takagi, T. Kamiya, M. Hirano, and H. Hosono, "Room-temperature Fabrication of Transparent Flexible Thin-film Transistors Using Amorphous Oxide Semiconductors," *Nature*, **432** 488-92 (2004).
2. E. Fortunato, P. Barquinha, A. Pimentel, L. Pereira, G. Goncalves, and R. Martins, "Amorphous IZO TTFTs with Saturation Mobilities Exceeding 100 cm^2/Vs," *Phys. Status Solidi*, **1** R34-8 (2007).
3. H. Q. Chiang, J. F. Wager, R. L. Hoffman, J. Jeong, and D. A. Keszler, "High Mobility Transparent Thin-film Transistors with Amorphous Zinc Tin Oxide Channel Layer," *Appl. Phys. Lett.*, **86** 013503 (2005).
4. H.-H. Hsieh and C.-C. Wu, "Amorphous ZnO Transparent Thin-film Transistors Fabricated by Fully Lithographic and Etching Processes," *Appl. Phys. Lett.*, **91** 013502 (2007).
5. Y.-L. Wang, F. Ren, W. Lim, D. P. Norton, S. J. Pearton, I. I. Kravchenko, and J. M. Zavada, "Room Temperature Deposited Indium Zinc Oxide Thin Film Transistors," *Appl. Phys. Lett.*, **90** 232103 (2007).
6. H. Hosono, "Ionic Amorphous Oxide Semiconductors: Material Design, Carrier Transport, and Device Application," *J. Non-Cryst. Solids*, **352** 851-58 (2006).
7. H. Hosono, K. Nomura, Y. Ogo, T. Uruga, and T. Kamiya, "Factors Controlling Electron Transport Properties in Transparent Amorphous Oxide Semiconductors," *J. Non-Cryst. Solids*, **354** 2796-800 (2008).
8. R. A. Street, Technology and Application of Amorphous Silicon, Springer, Berlin, 2000.
9. A.Takagi, K.Nomura, H.Ohta, H.Yanagi, T.Kamiya, M.Hirano, and H.Hosono, "Growth of Epitaxial ZnO Thin Films on Lattice-matched Buffer Layer: Application of $InGaO_3(ZnO)_6$ Single-crystalline Thin Film," *Thin Solid Films*, **486** 28-32 (2005).