

RF Power에 따른 Amorphous-InGaZnO 박막의 특성 변화

The Characteristic Changes of Amorphous-InGaZnO Thin Film according to RF Power

김상훈^{1,a}, 박용현², 김홍배³
(Sang-Hun Kim^{1,a}, Yong-Heon Park², and Hong-Bae Kim³)

Abstract

We have studied the optical and electrical properties of a-IGZO thin films on the n-type semiconductor fabricated by RF magnetron sputtering method. The ceramic target was used in which In₂O₃, Ga₂O₃ and ZnO powder were mixed with 1:1:2 mol% ratio and furnished. The RF power was set at 25 W, 50 W, 75 W and 100 W as a variable process condition. The transmittance of the films in the visible range was above 80%, and it was 92% in the case of 25 W power. AFM analysis showed that the roughness increased as increasing RF power, and XRD showed amorphous structure of the films without any peak. The films are electrically characterized by high mobility above 10 cm²/V • s at low RF power, high carrier concentration and low resistivity. It is required to study further finding the optimal process condition such as lowering the RF power, prolonging the deposition ratio and qualification analysis.

Key Words : Amorphous InGaZnO (a-IGZO), RF magnetron sputtering, RF power, Transparent thin film transistor(TTFT)

1. 서론

최근의 전자 재료는 Si 기반의 결정형으로부터 다양한 물질의 박막형으로 급속히 변화하고 있다. 터치스크린을 적용한 핸드폰 시장도 투명 박막 트랜지스터(TTFT)를 기반으로 발전하고, LCD (liquid crystal display)를 중심으로 하는 디스플레이 시장도 빠른 응답 시간, 고해상도의 방향으로 발전하고 있으며, 현재의 전자 산업을 주도하는 중요 분야이다. 디스플레이 모드에 상관없이 요구되는 핵심요소로서 단위 화소의 제조에 필수적인 TFT기술은 MOSFET 형태로 주로 사용이 되고 있다[1].

지금까지 TFT backplane에 사용된 물질로는 수산화된 비정질 실리콘(a-Si:H)과 저온 폴리 실리콘(low temperature poly -Si)이 대표적이다[2]. 이들은 비교적 공정이 간단하고, 낮은 단가, 대면적 디스플레이 제조에 용이하였지만 고속 동작을 요구하는 디스플레이를 개발하기엔 이동도(mobility)가 1 cm²/Vs이하로 낮아서 TFT 소자의 이동도와 장기 신뢰성 확보 등에 이들의 적용은 문제가 있다[3].

이런 문제점을 극복하기 위한 대안으로 산화물 반도체(oxide semiconductor)가 큰 관심을 얻고 있다. 이들은 이동도가 기존의 물질보다 높아 디스플레이 구동 회로에 유리하고 저온 공정이 가능하다. 또한 3 eV 이상의 높은 밴드갭(band-gap)을 가지고 있어서, 투명한 막 제작과 낮은 누설 전류로 인하여 화소 설계 시 이점을 가지고 있다[4]. 현재 다양한 재료들이 TFT 채널 층 적용을 목적으로 연구되고 있으며, 특히, ZnO[5], ZGO[6], IZO[7], SnO₂[8], IGZO[9] 등이 투명 산화물 반도체의 n-type

1. 청주대학교 전자공학과
(충북 청주시 상당구 내덕2동)
2. 공군사관학교 물리학과
3. 청주대학교 전자정보공학부
a. Corresponding Author : rainyng11@naver.com
접수일자 : 2010. 3. 3
1차 심사 : 2010. 3. 17
심사완료 : 2010. 3. 22

채널 층으로 검토되어 왔다. 그 중 가장 많은 연구가 이루어진 ZnO 기반의 박막 트랜지스터는 전자 이동도와 switching 속도에서 우수한 특성을 보이거나, 비정질의 경우 안정성이 떨어지는 것으로 보고되고 있다.

현재 주목받는 a-IGZO는 비정질임에도 이동도가 $10 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 정도로 a-Si(a-Si:H) 박막 트랜지스터에 비하여 높은 이동도를 가지고 있다[10]. Si와 같은 공유 결합 반도체는 방향성이 높은 sp³ 오비탈 구조를 가지고 있어서 비정질 상태가 되면, 이동도의 저하가 급진전되지만, 이온 결합을 가진 산화물 반도체인 경우 금속 양이온들이 등방성의 s오비탈로 크게 중첩되어 있어서 비정질에서도 이동도가 크며 민감하게 변하지 않는다[11]. 이로 인하여 통상적인 박막 성장 조건에서도 비정질 구조로 제작이 가능하다[12]. 이와 같이 a-IGZO는 균일성이 높고, 좋은 이동도로 인하여 디스플레이 backplane 소재로 많은 연구가 이루어지고 있다[13].

본 논문에서는 RF 마그네트론 스퍼터링 방법을 이용하여 진공 증착한 a-IGZO 박막에 대하여, 스퍼터링 공정의 RF 출력이 박막의 물성에 미치는 구조적, 광학적, 전기적 특성 변화를 살펴보았다.

2. 실험

유리 기판위에 RF 마그네트론 스퍼터를 이용하여 비정질 IGZO 박막을 증착하였다. 증착 시료는 In₂O₃, Ga₂O₃, ZnO 분말을 각각 1:1:2 mol%의 조성비로 혼합하여 소결시킨 타겟을 사용하였다. 증착시킬 기판으로는 30 mm × 30 mm 크기의 Corning 1737 유리를 사용하였다. 기판 표면의 오염을 제거하기 위하여 탈 이온수(DI water)를 넣은 초음파 세척기로 세척하였고, acetone에 5분, methanol에 5분, 증류수에 5분씩 담가놓은 다음에 질소 가스를 이용하여 건조시켰다. 건조 후에 즉시 기판을 챔버 내의 substrate holder에 장착한 후, mechanical pump와 turbo pump를 가동하여 챔버 내부의 공기를 배기시켰다. 초기 압력을 2.0×10^{-6} Torr까지 배기한 후에 MFC(mass flow controller)로 고순도의 Ar 가스를 50 sccm으로 주입하며, 밸브를 조절하여 압력을 2.0×10^{-2} Torr로 유지시켰다. 기판 온도는 실온으로 고정하였으며, 13.56 MHz의 RF 출력으로 플라즈마를 형성하고, 10분간 pre-스퍼터링하여 타겟의 오염을 제거하였으며, 25 W, 50 W, 75 W, 100 W로 출력 조건을 바꾸면서 스퍼터링하여 박막을 증착하였다. 두께를 조절하기

위하여 각각의 증착 시간을 조절하며 여러 개의 박막들을 제작하였다.

증착된 IGZO 박막의 n형 반도체로서의 활용을 위하여, 구조적, 광학적, 전기적 특성 변화를 관찰하였다. 박막의 상태와 실제 두께의 측정을 위하여 필드 방출형 주사전자현미경(FE-SEM; S-4800, Hitachi)으로 단면을 촬영하였다. X선 회절 분석기(XRD(x-ray diffraction), Rigaku, smartlab)를 이용하여 증착된 박막의 결정성을 확인하였으며, 박막의 표면 거칠기는 원자현미경(AFM(atomic force microscope): PSIA, XE-150)으로 기록하였다. IGZO 박막의 화학적 조성비는 X선 광전자 분광기(XPS(x-ray photoelectron spectroscopy): Physical Electronics, PHI 5800)를 이용하여 분석하였다. 광 투과도는 UV-VIS(ultraviolet-visible spectroscopy) 분광기(chameleon-XR)를 사용하여 투과 스펙트럼으로 측정하였고, 이로부터 박막의 투과 특성 및 광학적 밴드갭(optical band gap)을 조사하였다. 그리고 전기적 특성은 홀 측정기(hall effect measurement system: HL5500)를 이용하여 기록하였다.

3. 결과 및 고찰

RF 출력의 증가는 증착물을 증가시키므로 같은 두께의 박막을 얻기 위해서는 증착시간을 조절해야 한다. 편차는 있지만 시간을 조절하여 200 nm에서 400 nm까지의 다양한 박막을 증착하였다. 플라즈마 이온 에너지에 따라 스퍼터링한 타겟의 파편들이 기판에 증착되면서 박막으로 안정되는 과정의 차이에 따라 박막의 물성 변화가 발생된다.

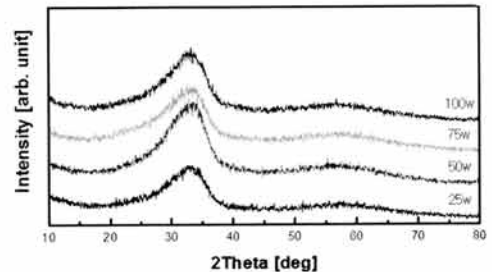


그림 1. 25, 50, 75, 100 W의 RF파위에 따라 증착된 비정질-IGZO 필름의 XRD 패턴.

Fig. 1. XRD patterns of the a-IGZO films deposited by RF magnetron sputtering with RF power 25, 50, 75 and 100 W.

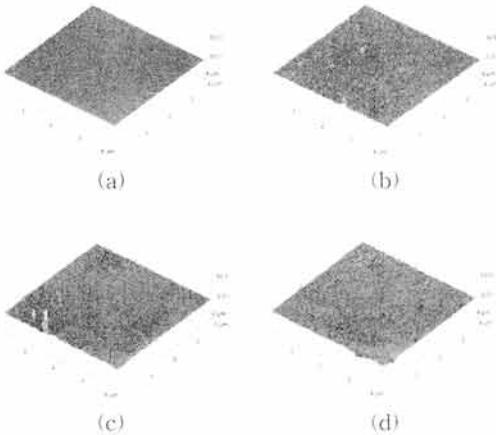


그림 2. RF power에 따른 비정질 IGZO막의 RMS 거칠기와 AFM이미지 (a) 25 W, (b) 50 W, (c) 75 W, (d) 100 W.

Fig. 2. RMS roughness of a-IGZO thin films as a function of RF power, and their AFM images. (a) 25 W, (b) 50 W, (c) 75 W, (d) 100 W.

그림 1은 네 가지 RF 출력으로 증착한 박막들에 대한 X-선의 회절 강도의 비정질 특성을 보여 준다. y축의 강도는 모두 비슷하였고, 모양을 비교하기 위하여 25 W부터 100 W까지 위쪽부터 순서대로 기록하였다. 75 W의 출력에서 약간의 강도 변화를 보이지만 대체로 유사한 비정질 특성을 나타내고 있음을 확인하였다.

그림 2는 RF 파워에 따른 a-IGZO 박막의 표면 형상을 나타낸 AFM 사진이다. 그림을 통하여 결정립들이 조밀하게 성장함을 확인할 수 있었으며 거칠기는 최소 0.17 nm에서 최대 1.26 nm 까지 측정 되었으나 대다수 박막들이 평균 0.6 nm 정도의 거칠기를 갖는 것으로 확인이 되었다.

그림 3은 RF 파워에 따른 a-IGZO 박막의 광학적 특성을 나타낸다. UV-VIS 분광광도계를 사용하여 250 nm~1000 nm 영역에서의 투과율을 보여 주고 있으며, 400 nm~800 nm의 범위에서 80%~92% 까지의 투과율을 나타내고 있다. 가장 높은 투과율을 보인 박막은 RF 출력이 25 W인 경우로서 60분 동안 0.6 Å/s의 증착률로 증착하였으며, 그림 4는 FE-SEM 단면사진으로 박막의 두께가 208 nm임을 나타낸다. 이 경우 400 nm~800 nm의 범위에서 92%의 높은 평균 투과율의 분광특성

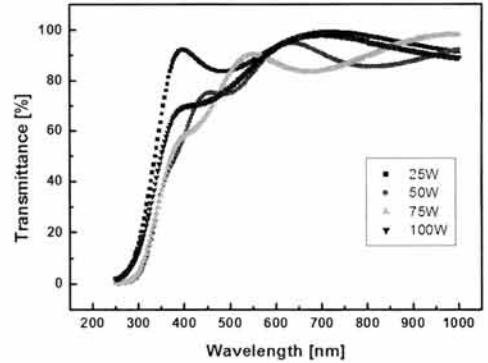


그림 3. 다른 RF 파워에 따라 증착된 비정질 IGZO 광학 투과율.

Fig. 3. Optical transmittance of a-IGZO grown at different RF power.

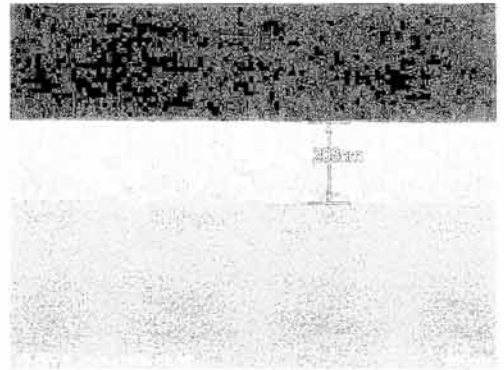


그림 4. 25 W에 증착된 비정질 IGZO막의 SEM 형상.

Fig. 4. SEM image of a-IGZO thin films deposited on 25 W.

을 보였으며, 기준파장인 550 nm에서는 88%의 투과율을 보였다. 그림 3에서 보는 바와 같이 400 nm 영역의 높은 에너지대에서 큰 투과율을 갖는 특성이 전체적인 평균 투과율을 증가시키고 있다. 50 W, 75 W, 100 W일 때 증착한 유사 두께의 박막들이 81% 정도의 투과율을 보인 것과 비교할 때, 이 박막처럼 작은 증착률로 서서히 박막을 제작하는 것이 투과율을 좋게 하는 것으로 판단한다. 이는 RF 출력이 낮은 경우 비정질 IGZO박막의 에너지 밴드갭이 RF 출력이 높은 경우보다 큰 것을 의미한다.

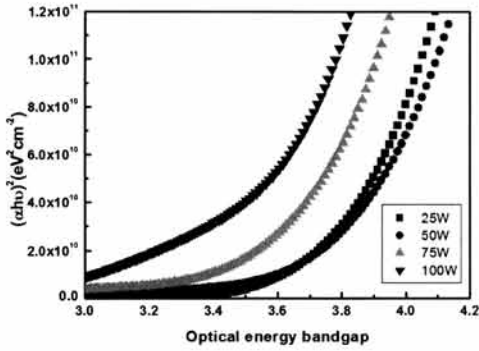


그림 5. RF 마그네트론 스퍼터링에 의해 증착된 비정질 IGZO 막의 밴드갭.
 Fig. 5. Band-gap image of a-IGZO films deposited by RF magnetron sputtering.

그림 5는 식 (1)에 나타낸 것과 같이 흡수 계수 α 를 이용하여 에너지 밴드갭을 계산한 결과이다[14].

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

여기서, A 의 값은 상수이며 $h\nu$ 는 광자에너지이다. 또한 α 는 박막의 흡수 계수로, 투과율 T 와 박막 두께 d 를 이용한 식 (2)를 통한 관계식으로 계산될 수 있다.

$$T = \exp(-\alpha d) \quad (2)$$

이때 비정질 박막의 밴드갭은 흡수 계수가 0에 근접하는 경우로 그림 5의 그래프에서 선형적인 구간에 대하여 최소자승법으로 근사한 직선식을 이용하여 $(\alpha h\nu)^2 = 0$ 인 지점의 광자에너지로 계산된다.

그림 5를 보면 선형적인 부분은 전체적으로 3.2 eV 이상에 있음을 나타내며, RF 출력이 증가함에 따라, 광학적인 밴드갭은 감소함(25 W : 3.64 eV, 50 W : 3.59 eV, 75 W : 3.42 eV, 100 W : 3.21 eV)을 보이고 있다. 이는 RF 출력이 증가할수록 박막으로부터의 산소이탈 현상이 증가하고, 박막 내의 산소원자 빈자리(oxygen vacancy)의 밀도가 높아짐을 XPS 분석에서 확인하였고, 이는 점차 광학적 반사가 증가하는 급속성으로 거동함에 따라 밴드갭이 감소한다[15]는 발표와 일치하는 결과를 보인다.

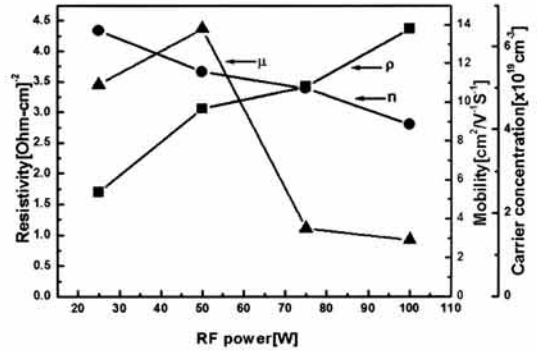


그림 6. RF 파워에 따라 증착한 비정질 IGZO 막의 비저항, 이동도, 전하의 농도 관계.
 Fig. 6. Relationship of conductivity, mobility and carrier concentration as a function of RF power in a-IGZO thin films.

증착된 a-IGZO 박막의 전기적 특성을 평가하기 위해 상온에서 hall 효과를 측정하였으며, 그 결과를 그림 6에 나타내었다.

이동도는 25 W와 50 W에서 $10 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 이상의 큰 값을 보이다가, 75 W와 100 W에서 급격히 감소하여 $3 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 의 값을 갖는다. RF 출력이 크면, 플라즈마 에너지가 크고, 이것이 증착되는 박막의 물성에 영향을 주어, 이동도를 감소시킨다. 전기 비저항과 전하의 농도는 RF 출력의 증가와 함께 증가함을 볼 수 있었다. 이와 같은 결과는 그림 3의 투과도와 같은 결과로 작은 증착물로 서서히 박막을 제작하는 것이 a-IGZO 박막 증착의 중요한 공정 조건임을 알 수 있다. XPS 실험 결과에서 RF 출력에 의한 증착물에 따른 IGZO 박막 내의 산소 결핍이 에너지 밴드갭 및 전기적 특성에 미치는 상관관계는 IGZO 박막의 성분별 조성비에 따라 뚜렷한 경향성을 보이지 않았지만, 산소 성분이 증가하는 동안 갈륨 성분이 감소하는 현상을 확인하였다.

4. 결론

실험에서 측정되는 바와 같이 a-IGZO 박막은 디스플레이의 backplane 소재로의 활용에 우수한 특성을 보였다. RF 마그네트론 스퍼터링으로 증착한 a-IGZO 박막의 n-형 반도체 활용 특성과 관련된 구조적, 광학적, 전기적 특성 변화를 살펴본다. 실험에서 측정된 바와 같이 IGZO 박막은 비

정질 특성을 띄고 있으며, 가시광선 영역에서 높은 광투과성을 보였다. RF 출력이 낮아서 증착률이 적은 경우 92%의 높은 광투과도 및 큰 밴드갭을 보였으며, 또한 이동도가 $10 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 이상이고, n형 반도체 특성을 갖는 것을 확인하였다. IGZO박막의 형성과정에서 증착률에 따른 비정질 구조의 성장을 박막의 광학적, 전기적 특성을 결정하는 주요 공정 변수가 됨을 확인하였으며, 계속되는 연구에서 공정 압력 및 기판 온도에 대한 최적의 공정 조건들을 수립하고, 추가적인 실험과 분석을 통하여 화학적 조성비 및 산소 원자의 미세 구조가 IGZO박막의 광학적, 전기적 특성에 미치는 영향에 대하여 지속적으로 연구를 진행할 예정이다.

참고 문헌

- [1] D.-H. Kim, J.-K. Kang, K.-J. Yang, Y. S. Do, S.-J. Sung, D.-H. Son, and B.-D. Choi, "Technological status and prospect of oxide thin film transistors", KIC News, Vol. 11, No. 5, p. 1, 2008.
- [2] R. L. Hoffman, B. J. Norris, and J. F. Wager, "ZnO-based transparent thin-film transistors", Appl. Phys. Lett., Vol. 82, No. 5, p. 733, 2003.
- [3] J. F. Wager, "Transparent electronics", Science, Vol. 300, No. 5623, p. 1245, 2003.
- [4] H. Kumomi, K. Nomura, T. Kamiya, and H. Hosono, "Amorphous oxide channel TFTs", Thin Solid Films, Vol. 516, No. 7, p. 1516, 2008.
- [5] E. Fortunato, P. Barquinha, A. Pimentel, A. Goncalves, A. Marques, L. Pereira, and R. Martins, "Recent advances in ZnO transparent thin film transistors", Thin Solid Films, Vol. 487, No. 1-2, p. 205, 2005.
- [6] R. Martins, P. Barquinha, A. Pimentel, L. Pereira, E. Fortunato, D. Kang, I. Song, C. Kim, J. Park, and Y. Park, "Electron transport in single and multicomponent n-type oxide semiconductors", Thin Solid Films, Vol. 516, No. 7, p. 1322, 2008.
- [7] Y. L. Wang, F. Ren, W. Lim, D. P. Norton, S. J. Peaton, I. I. Kravchenko, and J. M. Zavada, "Improved long-term thermal stability of InGaN/GaN multiple quantum well light-emitting diodes using TiB₂- and Ir-based p-Ohmic contacts", Appl. Phys. Lett., Vol. 90, No. 24, p. 242103, 2007.
- [8] R. E. Presley, C. L. Munsee, C.-H. Park, D. Hong, J. F. Wager, and D. A. Keszler, "Tin oxide transparent thin-film transistors", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 37, p. 2810, 2004.
- [9] T. Iwasaki, H. Itagaki, T. Den, H. Kumomi, K. Nomura, T. Kamiya, and H. Hosono, "Combinatorial approach to thin-film transistors using multicomponent semiconductor channels: An application to amorphous oxide semiconductors in In-Ga-Zn-O system", Appl. Phys. Lett., Vol. 90, p. 242114, 2007.
- [10] N. Itagaki, T. Iwasaki, H. Kumomi, T. Den, K. Nomura, T. Kamiya, and H. Hosono, "Zn-In-O based thin-film transistors: Compositional dependence", Phys. Stat. Sol., Vol. 205, No. 8, p. 1915, 2008.
- [11] H. Hosono, "Ionic amorphous oxide semiconductors: Material design, carrier transport, and device application", Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 352, No. 9-20, p. 851, 2006.
- [12] A. Suresh, P. Gollakota, P. Wellenius, A. Dhawan, and J. F. Muth, "Transparent, high mobility InGaZnO thin films deposited by PLD", Thin Solid Films, Vol. 516, No. 7, p. 1326, 2008.
- [13] M. Ito, C. Miyazaki, M. Ishizaki, M. Kon, N. Ikeda, T. Okubo, R. Matsubara, K. Hatta, Y. Ugajin, and N. Sekine, "Application of amorphous oxide TFT to electrophoretic display", Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 354, No. 19-25, p. 2777, 2008.
- [14] Chen, X., Guan, W., Fang, G., and Zhao, X. Z., "Influence of substrate temperature and post-treatment on the properties of ZnO:Al thin films prepared by pulsed laser deposition", Appl. Surf. Sci., Vol. 252, No. 5, p. 1561, 2005.
- [15] E. Terzini, P. Thiakan, and C. Minarini, "Properties of ITO thin films deposited by RF magnetron sputtering at elevated substrate temperature", Mater. Sci. Eng. Vol. B77, p. 110, 2000.