

Zinc tin oxide 투명박막트랜지스터의 특성에 미치는 열처리 효과

Thermal treatments effects on the properties of zinc tin oxide transparent thin film transistors

마 대 영[★]

Tae Young Ma[★]

Abstract

ZnO-SnO₂(ZTO) was deposited by RF magnetron sputtering using a ceramic target whose Zn atomic ratio to Sn is 2:1 as a target, and the crystal structure variation with thermal treats was investigated. Transparent thin film transistors (TTFT) were fabricated using the ZTO films as active layers. About 100 nm-thick Si₃N₄ film grown on 100 nm-thick SiO₂ film was adopted as gate dielectrics. The mobility, threshold voltage, I_{on}/I_{off}, and interface trap density were obtained from the transfer characteristics of ZTO TTFTs. The effects of substrate temperature, and post-annealing on the property variation of ZTO TTFT were analyzed.

요 약

Zn와 Sn의 원자비가 2:1인 타겟을 고주파 스퍼터링하여 ZnO-SnO₂(ZTO)박막을 증착하고 열처리에 따른 구조적 특성변화를 조사하였다. 이 ZTO박막을 활성층으로 사용하여 투명박막트랜지스터(TTFT)를 제조하였다. 약 100 nm 두께의 SiO₂위에 100 nm의 Si₃N₄막을 기른 후 TTFT의 게이트 절연막으로 채택하였다. TTFT의 전달 특성을 통해 이동도, 문턱전압, 작동전류-차단전류 비(I_{on}/I_{off}), 계면트랩밀도를 구하였다. 기판 가열 및 후속 열처리가 ZTO TTFT의 특성 변화에 미치는 영향을 분석하였다.

Key words : Transparent thin film transistors, ZnO-SnO₂ films, mobility, interface trap density, annealing

1. 서론

액정 및 발광 다이오드를 화소로 사용하는 디스플레이의 구동소자로는 비정질 또는 다결정 실리콘 박막트랜지스터가 사용되어 왔다[1]. 그러나 대형 고밀도 디스플레이의 발전과 함께 기존의 실리콘 박막트랜지스터를 대체할 소자의 필요성이 대두

되었으며, 그 대안으로 투명박막트랜지스터(TTFT, Transparent Thin Film Transistors) [2]가 연구자들의 관심을 받고 있다. 투명박막트랜지스터는 빛을 차단하지 않기 때문에 디스플레이의 해상도를 높일 수 있다.

투명박막트랜지스터의 활성층으로는 ZnO가 주로 사용되었다[3]. ZnO는 에너지 밴드 갭(~3.4 eV)이

* Dept. of Electrical Engineering & ERI, Gyeongsang National University

★ Corresponding author

E-mail : tyma@gnu.ac.kr, Tel : +82-55-772-1712

Manuscript received April 10, 2019; revised June 4, 2019; Accepted June 4, 2019.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

크고 제조에 사용되는 원료가 저렴하며 화학적으로 안정된 특성을 가지고 있다. 또한 제조공정이 널리 알려져 있으며 공정조건에 따라 전기적 및 광학적 특성을 변화시킬 수 있다는 장점도 보유하고 있다[4]. 그러나 ZnO는 TFT의 속도를 결정짓는 전자의 이동도가 낮다는 단점이 있다. 이것은 wurtzite 구조의 ZnO가 c축 즉, (002) 결정방향으로의 성장성이 강해 입계(grain boundary)가 뚜렷한 다결정 상태로 증착되기 때문이다. ZnO박막의 입계에는 다수의 격자결함이 존재하고 이 결함들로 인해 전자의 이동을 방해하는 전위장벽이 형성된다. 다결정 박막의 입계에 존재하는 전위장벽은 ZnO TFT의 이동도를 제한하는 요인이 된다.

이런 ZnO TFT가 갖는 이동도의 한계를 극복하기 위해 최근에는 ZnO에 인듐(In), 주석(Sn), 갈륨(Ga) 등 원자의 전자분포형태가 $(n-1)d^{10}ns^0$ ($n \geq 4$)인 중금속 양이온을 주입하여 비정질 산화물로 증착하는 연구가 활발히 이루어지고 있다[4]. 중금속 양이온이 포함된 ZnO는 반경이 큰 대칭형 구 모양인 ns 양자궤도의 중첩에 의해 박막의 결정구조에 영향을 받지 않는 전자의 이동경로를 형성하여 비정질임에도 불구하고 높은 전하이동도를 나타낸다.

종래에는 주로 In이 함유된 ZnO계(ZnO:In) 비정질 박막을 활성층으로 사용하여 TFT를 제조하였다. 그러나 디스플레이 산업의 확장과 함께 투명도전막인 ITO의 사용량이 급격하게 증가하였으며 이에 따라 ITO의 주성분인 In의 회소가치가 증대하고 있다. 이뿐만 아니라 ZnO:In 박막은 고온, 플라즈마 등의 반도체 공정환경에 노출되면 전기적 특성이 열화되는 단점을 갖고 있다[5]. 따라서 TFT의 활성층으로 ZnO:In을 대체할 수 있는 재료 개발의 필요성이 대두되었으며, 대표적으로 ZnO와 SnO₂ 화합물(ZTO)박막이 연구되고 있다[6]. ZTO박막은 주로 스퍼터링으로 증착되며 공정조건에 따라 전기적 특성에 큰 차이가 나타난다. 본 연구에서는 ZTO TFT의 이동도 개선을 목표로 하여 ZTO박막의 열처리 조건에 따른 TFT의 특성 변화를 조사하였다. ZTO박막을 증착할 때의 기판 가열 및 후속 열처리가 TFT의 이동도, 문턱전압 및 I_{on}/I_{off} 등에 미치는 영향을 조사하였다.

II. 실험

N⁺ 실리콘웨이퍼를 습식산화시켜 100 nm 두께의 SiO₂를 기른 후에 그 위에 PECVD로 100 nm 두께의 Si₃N₄막을 증착하였다. 이렇게 게이트 절연막을 형성한 후 그 위에 고주파 스퍼터링(RF magnetron sputtering)으로 ZTO박막을 증착하였다. ZTO박막의 스퍼터링 타겟으로는 ZnO와 SnO₂ 분말을 섞어 소성한 직경 3 인치의 원형 세라믹을 사용하였다. ZTO 타겟의 제조에 사용된 분말의 아연(Zn)과 주석(Sn)의 원자비는 2:1였다. 스퍼터링 전력, 압력 및 시간은 각각 70 W, 5.0 mTorr 및 10분으로 고정하였다. 10분간 스퍼터링한 ZTO막의 두께는 약 60 nm였다. Mass flow meter로 산소와 아르곤의 분압을 조절하였다. 아르곤 및 산소의 유량은 각각 50 및 7 sccm으로 고정하였다. 4가지의 열처리 조건으로 ZTO박막을 제조하였으며 각각의 제조된 박막을 TFT의 활성층으로 사용하였다. 우선 상온 및 기판온도 300 °C에서 ZTO박막을 증착하였으며, 이렇게 증착된 각각의 ZTO박막을 다시 상온 및 400 °C에서 후속 열처리하였다. 열처리를 위해 급속가열장치(ULVAC, MILA-3000)를 사용하였으며 급속열처리시간은 5분 이었다. 열처리한 ZTO박막 위에 스테인레스 마스크를 씌운 후 인듐을 증착하여 소스 및 드레인 전극을 형성하였다. 제조된 TFT의 채널 너비는 0.5 mm, 길이는 0.4 mm였다. Semiconductor parameter analyzer(Keithley)를 사용하여 드레인 전류-드레인 전압(I_D-V_D) 및 드레인 전류-게이트 전압(I_D-V_{GS}) 특성을 측정하고 측정결과로부터 문턱전압(V_T), 이동도(μ), 계면 상태밀도(D_{it})를 구하였다.

III. 결과 및 고찰

그림 1은 본 연구에서 제조한 ZTO TFT의 구조를 나타낸 것이다. TFT 활성층으로 4종류의 열처리 조건으로 제조한 ZTO박막을 사용하였다. 서술의 편의를 위해 ZTO박막의 열처리 조건에 따라 ZTO(T_S, T_A)로 표시한다. 여기서 T_S 및 T_A는 각각 기판 및 후속 열처리 온도를 뜻한다. 이때 상온은 0으로 표시한다.

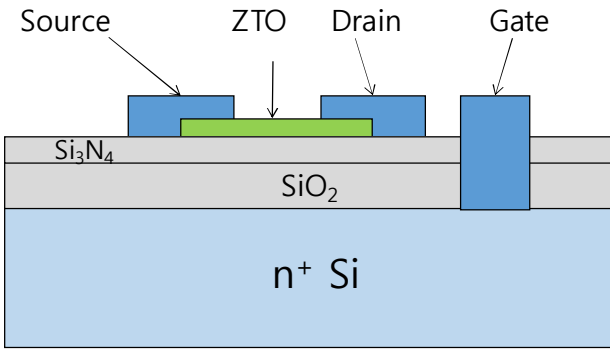


Fig. 1. Schematic diagram of ZTO TTFT.
그림 1. ZTO TTFT의 단면도

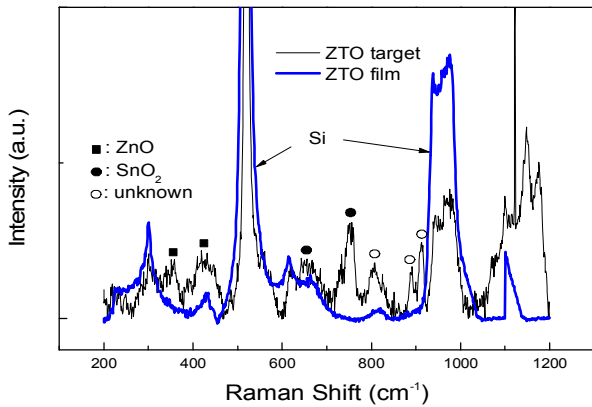


Fig. 2. Raman spectra of ZTO target and film.
그림 2. ZTO 타겟 및 박막의 Raman 스펙트라

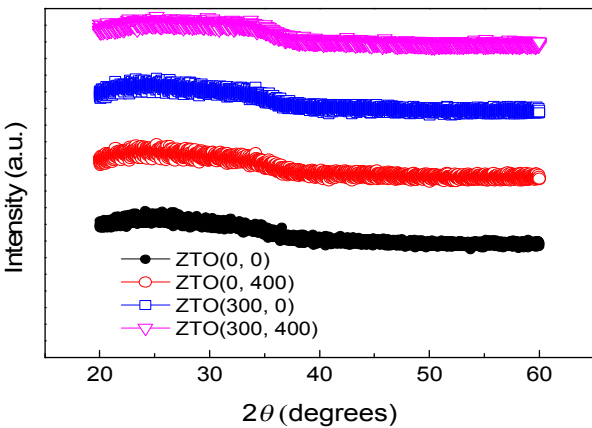


Fig. 3. XRD patterns of ZTO films.
그림 3. ZTO박막의 XRD 패턴

그림 3은 4종류의 조건으로 증착된 ZTO박막의 XRD 패턴을 나타낸 것이다. 제조된 ZTO박막은 기관가열 및 후속 열처리에 관계없이 비정질 상태를 유지하였다. 열처리온도를 달리한 ZTO박막을 활성층으로 사용하여 TTFT를 제조하였으며 본 논문에서는 각각을 TTFT(T_s , T_A)로 표기한다. 제

조한 모든 TTFT가 전형적인 트랜지스터 출력특성을 나타내었다. 그림 4에 TTFT(0, 400)의 I_D - V_{DS} 특성을 대표로 나타내었다. TTFT를 액정 디스플레이의 구동소자로 사용하려면, 이동도 및 I_{on}/I_{off} 가 각각 $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 및 10^6 보다 커야 한다.

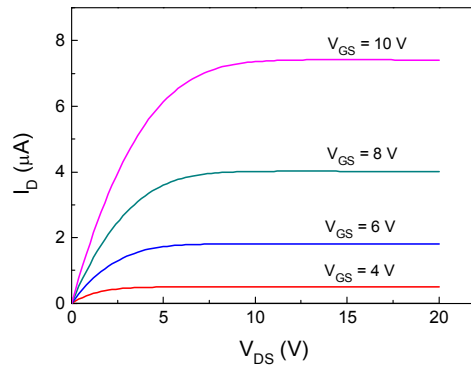


Fig. 4. I_D - V_{DS} characteristics of TTFT(0, 400).
그림 4. TTFT(0, 400)의 I_D - V_{DS} 특성

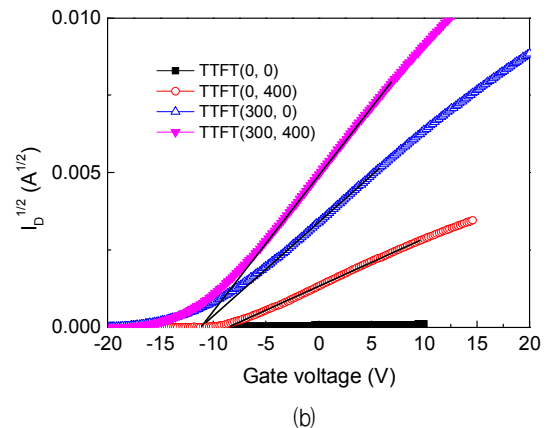
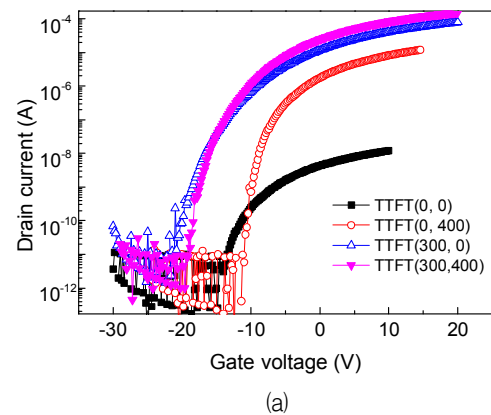


Fig. 5. (a) I_D vs V_{GS} , and (b) $\sqrt{I_D}$ vs V_{GS} .
그림 5. (a) I_D 대 V_{GS} 및 (b) $\sqrt{I_D}$ 대 V_{GS}

상온에서 증착한 ZTO박막을 활성층으로 사용하여 제작한 TTFT(0, 0)는 낮은 이동도와 I_{on}/I_{off} 를 보였다. ZTO박막의 이동도를 높이는 방안으로는

열처리를 생각할 수 있다. 열처리 공정은 기판 가열 및 후속 열처리로 나눌 수 있다. 기판 가열은 게이트 절연층과 활성층의 계면특성을 향상시키며, 후속 열처리는 박막의 결함을 감소시켜 ZTO TTFT의 이동도 및 I_{on}/I_{off} 를 높일 것으로 기대된다. 본 실험에서는 유리를 기판으로 사용하는 경우를 대비하여 기판온도는 300 °C 그리고 열처리 온도는 400 °C로 제한하였다. 그림 5는 ZTO TTFT의 열처리 조건에 따른 I_D-V_{GS} 특성을 나타낸 것이다. 열처리한 ZTO박막으로 제작한 TTFT는 모두 10^7 이상의 I_{on}/I_{off} 를 나타내었다. 그러나 기판 온도 300 °C에서 증착한 ZTO박막을 활성층으로 사용한 TTFT(300, 0)의 경우, 상온에서 증착한 ZTO에 비해 문턱전압(V_T) 이하에서 흐르는 누설전류가 10 배 정도 증가하였다. 이것은 기판에 가열된 열에 의해 ZTO박막에 존재하는 Zn가 게이트 절연층으로 침투하고, 이에 따라 게이트 누설전류가 증가하기 때문이라고 생각된다. Zn의 절연막 침투 현상은 다른 논문에서 보고[7]된 바 있다. 트랜지스터의 이동도는 구하는 방법에 따라 유효 이동도(effective mobility), 전계효과 이동도(field-effect mobility) 및 포화 이동도(saturation mobility)로 구분된다[8]. 유효 이동도는 낮은 드레인 전압 영역의 드레인 컨덕턴스($\Delta I_D/\Delta V_{DS}$)를 이용하여 구하며, 전계효과 이동도는 선형영역의 전달 컨덕턴스($\Delta I_D/\Delta V_{GS}$)로부터 구한다. 포화 이동도는 활성영역의 I_D-V_{GS} 관계로부터 구하며 가장 널리 사용되는 방식이다. 본 논문에서는 포화 이동도를 사용한다. 활성영역에서 I_D 는 V_{GS} 와 아래의 관계를 갖는다[8].

$$\sqrt{I_D} = \frac{Z\mu C_{ox}}{2L}(V_{GS} - V_T) \quad (1)$$

여기에서 Z 및 L 은 각각 채널의 너비 및 길이이고, C_{ox} 는 게이트 절연층의 단위면적 당 커패시턴스이다. 식 (1)에 의하면, 트랜지스터의 활성영역에서 $\sqrt{I_D}$ 는 V_{GS} 에 비례한다. 따라서 5(b)의 선형영역에서 직선을 그은 다음, 직선의 기울기 및 x축 절편을 구하여 이동도 및 문턱전압을 얻을 수 있다. TTFT의 전달특성으로부터 계면 트랩 밀도(interface trap density, D_{it})를 구하였다. D_{it} 는 subthreshold swing($\Delta \log I_D/\Delta V_{GS}$, S)와 아래의 관계를 갖는다[8].

$$D_{it} = \frac{1}{q} \left[\left(\frac{q}{2.3kTS} - 1 \right) C_{ox} - C_B \right] \quad (2)$$

여기서 k 는 볼츠만 상수, T 는 절대온도 그리고 C_B 는 ZTO박막 공핍영역의 단위면적 당 커패시턴스이다. 본 실험에서 활성층으로 사용한 ZTO박막은 낮은 전자농도에 의해 C_B 가 무시할 수 있을 정도로 작다. 표 1에 ZTO TTFT의 특성을 요약하여 나타내었다.

Table 1. Summary of the properties of ZTO TTFTs.

표 1. ZTO TTFT의 특성 요약

	μ (cm ² /Vs)	VT (V)	$\frac{I_{on}}{I_{off}}$	Dit (cm ⁻²)
TTFT(0,0)	x	x	x	x
TTFT(0,400)	8.2	-8	10^7	8.2×10^{12}
TTFT(300,0)	10.2	-10	10^8	7.4×10^{12}
TTFT(300,400)	18.6	-11	10^8	5.4×10^{12}

TTFT(0, 0)는 게이트 전압에 의한 전계효과가 미미하여 의미있는 값을 구할 수 없었다. 표 1에서 알 수 있듯이 기판 가열은 게이트 절연층과 ZTO박막 사이의 D_{it} 를 감소시켜 TTFT의 이동도를 증가시키며, 후속 열처리는 ZTO박막의 결함을 감소시켜 이동도를 증가시키는 것으로 사료된다. ZTO TTFT의 문턱전압이 매우 큰 음의 값을 갖는 것은 게이트 절연층으로 증착된 Si₃N₄막에 존재하는 Si⁺, Zn⁺와 같은 양전하 때문으로 생각된다. 이동도가 높은 ZTO TTFT를 제조하기 위해서는 기판가열과 함께 후속 열처리도 진행되어야 한다.

IV. 결론

약 100 nm 두께로 습식산화시킨 실리콘 웨이퍼 위에 PECVD로 100 nm의 Si₃N₄막을 길렀다. 그런 다음 ZTO박막을 활성층으로 증착하여 TTFT를 제조하였다. 증착된 ZTO박막을 4가지 조건으로 열처리하였다. ZTO박막을 증착할 때의 기판온도는 상온 또는 300 °C였으며, 증착된 ZTO박막을 다시 상온 또는 400 °C에서 열처리하였다. 열처리에 의해 TTFT의 이동도가 급격히 증가하였다. 기판 가열은 게이트 절연층과 ZTO박막 사이의 D_{it} 를 감소시키며, 후속 열처리는 ZTO박막의 결함을 감소시

키는 것으로 사료된다. 기판온도 300 °C에서 증착한 ZTO박막을 400 °C에서 열처리하여 18.6 cm²/Vs의 높은 이동도를 갖는 TTFT를 제조하였다.

References

- [1] Shuichi Uchikoga, and Nobuki Ibaraki, "Low temperature poly-Si TFT-LCD by excimer laser anneal," *Thin Solid Films*, vol.383, pp.19-24, 2001. DOI: 10.1016/S0040-6090(00)01644-8
- [2] Mu Hee Choi, and Tae Young Ma, "Influence of indium doping on the properties of zinc tin oxide films and its application to transparent thin film transistors," *Thin Solid Films*, vol.550, pp.654-659, 2014. DOI: 10.1016/j.tsf.2013.10.182
- [3] E. Fortunato, P. Barquinha, A. Pimentel, A. Gonçalves, and R. MartinsRecent, "advances in ZnO transparent thin film transistors," *Thin Solid Films*, vol.487, pp.205-211, 2005. DOI: 10.1016/j.tsf.2005.01.066
- [4] Kachirayil J. Saji, Y. P. Venkata Subbaiah, Kun Tian, and Ashutosh Tiwari, "P-type SnO thin films and SnO/ZnO heterostructures for all-oxide electronic and optoelectronic device applications," *Thin Solid Films*, vol.605, pp.193-201, 2016. DOI: 10.1016/j.tsf.2005.01.066
- [5] L. Chabane, N. Zebbar, M. Kechouane, M. S. Aida, and M. Trari, "Al-doped and in-doped ZnO thin films in heterojunctions with silicon," *Thin Solid Films*, vol.605, pp.57-63, 2016. DOI: 10.1016/j.tsf.2015.10.063
- [6] Mu Hee Choi, Tae Young Ma, "Influence of indium doping on the properties of zinc tin oxide films and its application to transparent thin film transistors," *Thin Solid Films*, vol.550, pp.654-659, 2014. DOI: 10.1016/j.tsf.2013.10.182
- [7] C. N. Cha, M. H. Choi, and T. Y. Ma "Effects of substrates on the Istructural properties of ZnO films deposited by rf magnetron sputtering," *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol.15, pp.240-243, 2012.
- [8] D. K. Schroder, *Semiconductor material and device characterization*, Wiley, 1990.

BIOGRAPHY

Tae-young Ma (Member)



1980 : BS degree in Electronic Engineering, Kyungpook National University.

1985 : PhD degree in Kyungpook National University.

1987~present : Professor, Gyeongsang National University