

공정 압력에 따라 제작되어진 비인듐계 SiZnSnO 박막을 이용한 박막트랜지스터의 성능 연구

이상렬^{1,a}

¹ 청주대학교 반도체공학과

Pressure Dependency of Electrical Properties of In-free SiZnSnO Thin Film Transistors

Sang Yeol Lee^{1,a}

¹ Department of Semiconductor Engineering, Cheongju University, Cheongju 360-764, Korea

(Received May 8, 2012; Revised June 19, 2012; Accepted July 13, 2012)

Abstract: The dependency of processing pressure on the electrical performances in amorphous silicon-zinc-tin-oxide thin film transistors (SZTO-TFT) has been investigated. The SZTO channel layers were deposited by using radio frequency (RF) magnetron sputtering method with different partial pressure. The field effect mobility (μ_{FE}) increased and threshold voltage (V_{th}) shifted to negative direction with increasing pressure during deposition processing. As a result, oxygen vacancies generated in SZTO channel layer with increasing partial pressure resulted in negative shift in V_{th} and increase in on-current.

Keywords: a-SZTO, Oxide semiconductor, Pressure dependency, Threshold voltage

1. 서론

산화물 반도체 박막트랜지스터가 최근 5년 간 들어 매우 중요한 산업적 이슈로 주목받고 있다. TFT-LCD나 AMOLED 등과 같은 대형 평판 디스플레이의 산업적 파급효과가 매우 중요시되면서 높은 이동도와 안정성 문제 그리고 비인듐계를 이용한 산화물 박막 트랜지스터 제작 문제는 차세대 반도체 및 디스플레이 산업에 매우 중요한 영향력을 미치는 연구 분야로 손꼽히고 있다. 특히, 산화물 재료에 대한 연구가 오래 전부터 이루어져 왔지만, 최근 들어 비인듐계 산화물 소재를 이용한 트랜지스터 개발 문제는 자원의 고갈과 고가화 문제에 대응하는 매우 중요한 이슈로 부각되고 있다. 기존의 실리콘 (Si)을 기반

으로 한 박막 트랜지스터의 이동도가 $1 \text{ cm}^2/\text{V s}$ 이상을 넘지 못하는 기술적 한계에 도달함에 따라 산화물 반도체, 특히 ZnO를 바탕으로 한 재료의 개발이 활발히 이루어지고 있다. ZnO의 넓은 광학적 밴드 갭 ($>3.5 \text{ eV}$)은 높은 투과율과 도핑 (doping) 물질에 따라 전극 (electrode)부터 인슐레이터 (insulator)까지 차세대 디스플레이에서 요구하는 광범위한 전기 전도성 ($10^{10} \sim 10^{-4} \Omega\text{cm}$)을 만족시키는 특성 때문에 차세대 투명디스플레이 소자로 주목받고 있다. 특히 인듐과 갈륨 (In-Ga)을 합성한 사성분계 (quaternary)계인 a-IGZO (비정질 인듐-갈륨-징크옥사이드)는 박막 트랜지스터 (thin film transistor, TFT)의 채널 (channel)층으로써 많은 연구가 이루어져 그 상업화를 눈앞에 두고 있다. 또한 비인듐계 (In-free) 산화물은 가격 경쟁력측면에서 매우 중요한 의미를 가지

a. Corresponding author: sylee@cju.ac.kr

고 있다. 비정질 산화물 트랜지스터는 박막트랜지스터의 다양한 공정 조건에 따른 전기적 특성 변화와 그에 따른 트랜지스터 특성에 미치는 영향이 매우 민감하여 신중한 고찰이 필요하다. 하지만, 비인듐계 산화물 트랜지스터와 박막 트랜지스터 공정조건에 따른 성능분석에 대한 연구는 다소 부족한 실정이다. 산화물 박막 트랜지스터 (thin film transistor, TFT)는 높은 이동도와 비정질이라 저온공정의 가능성, 뛰어난 전기적 특성 (전계 효과 이동도 등)을 가지고 있다. 특히, 산화물 반도체의 넓은 밴드갭과 저온 공정 특성은 연성 AM-OLED (active matrix organic light emitting diode)와 같은 차세대 디스플레이 구현을 가능하게 해줄 것으로 예상하고 있다. 하지만 ZnO 기반의 박막 트랜지스터는 대면적 시, 전기적 특성의 불균일, 가스의 흡착과 탈착으로 인한 불안정성, 박막 표면의 거칠기와 같은 임도경계 (grain boundaries)와 관련된 문제를 가지고 있다. 최근에는 여러 연구 그룹에서 갈륨 (gallium), 하프늄 (hafnium), 자르코늄 (zirconium), 실리콘 (silicon)을 도핑하여 산화아연물 트랜지스터의 전기적 특성 및 안정성을 향상시킬 수 있다고 보고되어지고 있다 [1-5].

본 연구에서는 1 wt% 실리콘이 도핑된 실리콘-아연-주석-산소 (SiZnSnO, SZTO) 타겟을 사용하여 RF-magnetron sputtering 방법으로 비정질 SZTO 박막을 증착하였다. 실리콘 1 wt.%가 도핑된 SZTO 박막을 증착하고 포토리소그래피를 이용하여 박막트랜지스터를 제작하였다. 그리고 공정압력의 변화에 따른 SZTO 박막의 문턱전압 및 전계효과이동도를 분석하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서는 스퍼터링 타겟을 이용하여 RF 스퍼터링 공정방식 SZTO 박막을 p 타입 실리콘 기판에 (200 nm-SiO₂ / p-Si) 증착하였다. 스퍼터링 타겟으로는 1 wt.%의 실리콘이 도핑된 직경 2인치의 디스크 타입 SZTO 타겟을 사용하였다. 가스 분위기는 아르곤 (95 sccm)과 산소 (5 sccm)로 혼합된 가스를 사용하였고, 기판온도는 상온 (RT)에서 증착을 수행하였다. RF 파워에 70 W를 사용하였다. 트랜지스터 구조는 bottom-gate structure를 적용하였다. 채널 형성을 하기 위해 포토 리소그래피 방법과 에칭공정이 이루어졌다. 소스와 드레인 전극 형성은 전자빔 증착법

(electron beam evaporation)과 열 증착법 (thermal evaporation)을 사용하여 티타늄 (10 nm)와 골드 (50 nm)를 증착하였으며 lift-off 방식으로 전극 패턴을 형성하였다. 게이트 전극은 통상적인 방식의 고준위 도핑된 p-Si기판을 사용하였다. 위와 같은 방법으로 제작된 a-SZTO 박막 트랜지스터의 안정성과 전극과의 접촉 특성을 향상시키기 위해 1시간 동안 질소 분위기에서 후열처리를 실시하였다.

마지막으로, 외부 환경으로부터 채널층에 유입되는 가스의 흡착과 탈착을 막고 채널층을 보호하기 위하여 PMMA (polymethyl-mechacrylate)를 사용하여 보호층을 형성하였다. a-SZTO 박막 트랜지스터의 채널 길이는 50 μm , 그리고 전극의 폭은 250 μm 이며, 이에 대한 트랜지스터의 전기적 특성은 semiconductor parameter analyzer를 이용하여 상온에서 측정하였고 실리콘 1 wt.%가 도핑된 SZTO 박막을 이용하여 박막트랜지스터를 제작하였다. 이 때 공정압력 효과를 체계적으로 관찰하고 분석하기 위하여 각각 공정압력을 3 mtorr, 4 mtorr 그리고 5 mtorr에서 수행하였다. 박막의 두께는 약 30 nm를 유지하였다.

3. 결과 및 고찰

제작되어진 비정질 SZTO 박막은 X-ray 회절법 (XRD) 분석을 통해 특정 피크가 관찰되지 않은 비정질 박막임을 각각 보여주었다. 제작되어진 SZTO박막 트랜지스터의 특성을 고찰하기 위하여 그림 1은 5.1 V의 드레인 전압 (drain voltage)에서 전기적 특성인 transfer curve를 공정압력 변화에 따라 나타낸 것이다. 공정압력 변화에 따라 트랜지스터의 성능변화가 매우 확연히 관찰되었으며 특히, 특성곡선에서 모든 경우 비슷한 낮은 off전류가 관찰되었다. 이것은 In이 포함된 다른 산화물 박막의 경우보다 비인듐계에서 상대적으로 적은 산소공공이 존재함을 의미하며 특히나 실리콘을 이용하여 더욱이 산소공공을 억제하여 매우 낮은 off 전류를 달성하였음을 알 수 있다. 공정압력에 따른 IV transfer curve 특성을 그림 1의 (d)에 전체적으로 같이 그려 비교 분석하였다. 그림 1의 (d)에서 보여지듯이 공정압력이 증가함에 따라 문턱전압 (V_{th})이 5.3 V에서 1.4 V로 체계적으로 감소하고 있음을 명확하게 관찰할 수 있었다. 공정압력이 증가할수록 캐리어의 이동도 (μ_{FE})는 4.431 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 에서 13.293 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 로 증가하였고 문턱전압 (V_{th})은

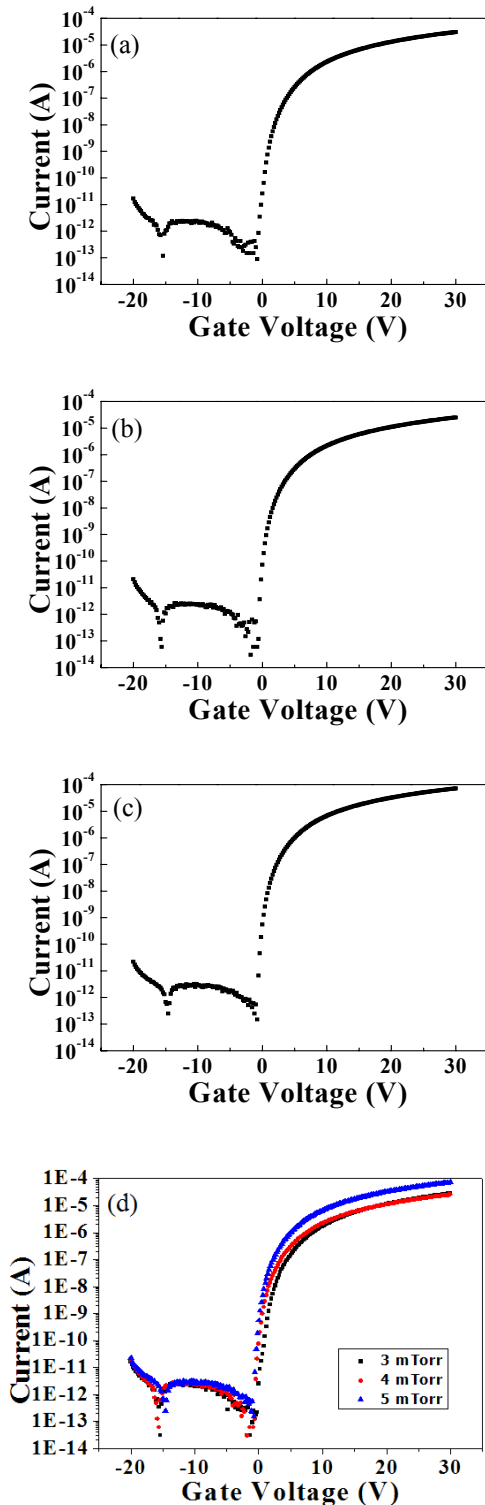


Fig. 1. Transfer curve of a-SZTO TFTs as a function of deposition pressure (a) 3 mTorr (b) 4 mTorr and (c) 5 mTorr and (d) all 3, 4, and 5 mTorr.

Table 1. Electrical performance of a-SZTO thin film transistor depending on different partial pressure.

deposition pressure (mtorr)	$V_{th}(V)$	μ_{FE} ($cm^2/V \cdot s$)	S.S (V/dec)	I_{on-off} ratio
3	5.3	4.431	1.4	5.1×10^7
4	2.0	5.908	0.44	8.4×10^8
5	1.4	13.293	0.27	4.8×10^8

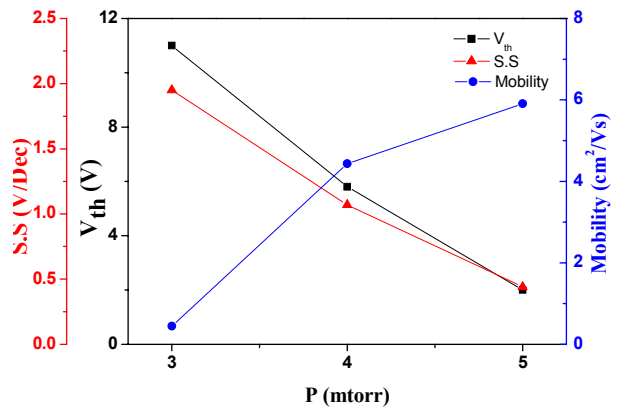


Fig. 2. Relationship between processing pressure and various parameters of a-SZTO TFTs.

5.3 V에서 1.4 V로 감소하였다. 이것은 스퍼터링 공정에 있어 플라즈마를 발생시키는 아르곤을 포함한 가스의 압력이 높아지면 상대적으로 낮은 압력일 경우보다 충돌횟수가 증가하고 이로 인해 높은 에너지 입자에 의해 결합되어 있는 산소 원자의 결합이 상대적으로 쉽게 끊어졌기 때문에 비정질 SZTO 박막에서 줄어든 산소원자의 비율만큼 전류의 흐름에 기여하는 산소공공 (oxygen vacancy)을 형성하게 되었다는 것을 의미한다 [6].

표 1은 공정압력변화에 따른 a-SZTO 트랜지스터의 전기적인 특성 변화를 나타낸 것이다.

박막을 증착할 경우 S.S값은 채널층과 게이트 절연막 사이의 인터페이스에 민감하게 연관되는데 바로 공정압력의 변화는 게이트 절연막 상 증착하는 채널의 초기 형성단계의 변화를 유도하여 S.S값의 차이를 가져올 수밖에 없다고 예측되어진다. 본 실험에서의 결과는 예측 거동과 일치하는 경향을 보이면서 공정

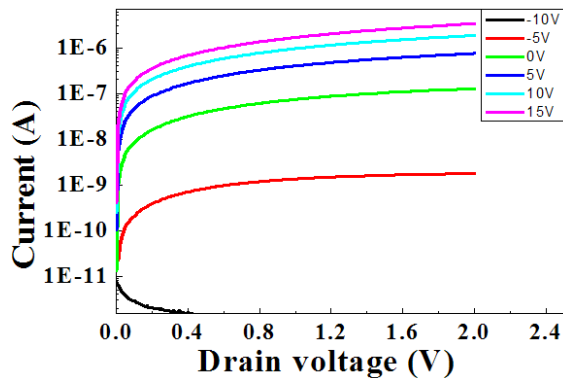


Fig. 3. Output curve of a-SZTO TFTs.

압력의 증가 즉, 충돌횟수의 증가로 인한 상대적 고 에너지로 인해 인터페이스에 안정적 특성을 유도하여 S.S값이 낮은 매우 우수한 소자 특성을 보임을 알게 되었다.

그림 2에는 a-SZTO 트랜지스터의 성능과 공정압력과의 관계를 종합적으로 나타내었다.

결론적으로 문턱전압, 캐리어 이동도, 문턱전압 이하에서의 기울기 (subthreshold swing)를 고려하여 최적화된 공정압력은 5 mTorr 라고 판단하였다. 그 이유는 500°C 후열처리를 진행한 산화물 박막트랜지스터인 경우 5 mTorr 박막 공정 시에 캐리어 이동도는 $13.293 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 문턱전압 이하에서의 기울기는 0.27 V/dec로 매우 우수한 특성을 보임을 알 수 있다.

그림 3에 a-SZTO 박막트랜지스터의 output curve를 보였다. 결과적으로 a-SZTO 박막트랜지스터에서 우수한 output 특성이 게이트 전압에 따라 도출됨을 알 수 있었다.

4. 결론

비인듐계 산화물 트랜지스터는 매우 중요하다. 본 연구에서는 RF magnetron sputtering을 이용하여 실리콘이 도핑된 SZTO 박막을 제작하였다. 실험으로 다양한 공정압력 변화에 따른 비정질 SZTO 박막 트랜지스터의 산소공공에 의한 전기적 특성변화를 관찰하였다. 비인듐계 산화물박막으로 실리콘을 이용하여

산소공공형성을 억제하여 매우 낮은 off전류를 달성하였으며 그 중에서도 디바이스의 on 특성에 영향을 주는 문턱전압 값의 변화를 관찰하여, 공정압력이 증가할수록 채널층에 결합되어 있는 산소원자를 끊어 자유전자 역할을 하는 산소공공이 증가함을 알 수 있었다. 채널의 전도성이 높아진다는 것을 문턱전압 값이 음의 방향으로 이동하는 경향과 on전류의 증가로 일관성 있게 체계적으로 확인하였다. 따라서, 안정적인 특성의 비정질 SZTO 박막 트랜지스터를 구현하기 위해서는 공정압력이 중요한 공정변수 중의 하나임을 확인하였다. 비인듐계 산화물박막 트랜지스터 연구는 반도체와 디스플레이 분야에서 매우 중요한 이슈이며 향후 산소와 반응을 억제시키는 방향으로 박막 공정의 개선과 후 열처리에 따른 박막의 특성 변화 등의 세밀한 연구를 통해 디스플레이 산업 분야에 a-SZTO 트랜지스터가 매우 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] K. Nomura, H. Ohta, A. Takagi, T. Kamiya, M. Hirano, and H. Hosono, *Nature*, **432**, 488 (2004).
- [2] J. Y. Kwon, J. S. Jung, K. S. Son, K. H. Lee, J. S. Park, T. S. Kim, J. S. Park, R. Choi, J. K. Jeong, B. W. Koo, and S. Y. Lee, *J. Electrochem. Soc.*, **158**, H433 (2011).
- [3] J. S. Park, T. S. Kim, K. S. Son, K. H. Lee, W. J. Maeng, H. S. Kim, E. S. Kim, K. B. Park, J. B. Seon, W. Choi, M. K. Ryu, and S. Y. Lee, *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 262109 (2010).
- [4] S. Y. Lee, Y. W. Song, and S. P. Chang, *J. KIEEME*, **21**, 3 (2008).
- [5] J. K. Jeong, *Information Display*, **10**, 42 (2009)
- [6] W. F. Wu and B. S. Chiou. *Thin Solid Films*, **247**, 201 (1994).
- [7] E. Ziegler, A. Heirich, H. Oppermann, and G. Stover, *Phys. Stat. Sol.*, **A66**, 635 (1981).
- [8] J. S. Park, J. K. Jeong, Y. G. Mo, H. D. Kim, and C. J. Kim, *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 033513 (2008)
- [9] J. K. Jeong, H. W. Yang, J. H. Jeong, Y. G. Mo, and H. D. Kim, *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 123508 (2008).
- [10] E. C. Chong, K. C. Jo, and S. Y. Lee, *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 152102 (2010).