

ZnO 스퍼터링에서 기판전압의 변화에 의한 성장 조절

Jun Meng* · 최재원* · 전원진* · 조종열*[†]

*[†] 아주대학교 정보통신대학 전자공학과

Control of ZnO Sputtering Growth by Changing Substrate Bias Voltage

Jun Meng*, Jaewon Choi*, Wonjin Jeon* and Jungyol Jo*[†]

*[†] Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University

ABSTRACT

Amorphous Si has been used for data processing circuits in flat panel displays. However, low mobility of the amorphous Si is a limiting factor for the data transmission speed. Metal oxides such as ZnO have been studied to replace the amorphous Si. ZnO is a wide bandgap (3.3 eV) semiconductor with high mobility and good optical transparency. When ZnO is grown by sputtering with O₂ as an oxidizer, there can be many ion species arising from O₂ decomposition. O⁺, O₂⁺, and O⁻ ions are expected to be the most abundant species, and it is not clear which one contributes to the ZnO growth. We applied alternating substrate voltage (0 V and -70 V) during sputtering growth. We studied changes in transistor characteristics induced by the voltage switching. We also compared ZnO grown by dc and rf sputtering. ZnO film was grown at 450°C substrate temperature. ZnO thin-film transistor grown with these methods showed 7.5 cm²/Vsec mobility, 10⁶ on-off ratio, and -2 V threshold voltage.

Key Words : Zinc oxide, Zn metal target, Thin-film transistor, Sputtering, Substrate voltage

1. 서 론

평판 디스플레이(flat panel display)의 신호처리 회로에는 비정질 실리콘 박막이 많이 사용되고 있는데, 최근 비정질 실리콘의 한계를 극복하기 위하여 ZnO, InGaZnO 등 금속산화물 반도체가 많이 연구되고 있다. InGaZnO의 전자 이동도는 우수하지만 인듐의 가격이 비싸고 세가지의 금속이 들어가기 때문에 성장조건이 복잡하다는 문제가 있다 [1]. 이에 비하여 ZnO는 박막 성장과정이 단순하고 생산원가가 저렴하다는 것이 큰 장점이다 [2]. 스퍼터링으로 ZnO 박막을 성장시킬 때 ZnO 세라믹 타겟과 Zn 금속 타겟 두가지가 사용 가능한데, 세라믹 타겟은 금속 타겟에 비하여 가격이 비싸고 대면적 타겟을 만드는 것이 어렵

다. 따라서 Zn 타겟을 이용하여 양질의 ZnO 박막을 성장시킬 수 있으면 대면적 기판의 디스플레이 생산 공정에 아주 중요한 기술이 될 수 있다 [3,4]. 본 연구에서는 Zn 금속 타겟과 산소(O₂)를 이용한 스퍼터링으로 ZnO를 성장시키고 thin-film transistor (TFT)를 제작하여 off 특성 변화와 전자기동도를 분석하였다. 스퍼터링 성장중에 기판에 -70 V 전압을 펄스 형태로 걸어주었다. 기판 전압은 플라즈마 중에서 양이온과 음이온이 기판에 도달하는 것을 조절하기 때문에 ZnO 박막의 트랜지스터 특성이 더 향상될 수 있을 것이다. 기판전압이 TFT 성능을 향상시키는 것은 알려져 있지만, 체계적인 분석을 진행할 필요가 있다 [5]. Ar + O₂를 사용하는 스퍼터링 환경에서 플라즈마에 여러가지 이온이 있는데, 양이온은 Ar⁺, Zn⁺가 있다. 산소는 양이온(O⁺, O₂⁺) 음이온(O⁻) 모두 가능한데 [6-8], 여러가지 이온들이 기판에 도달하는 것을 기판전압으로 조절하여 TFT의 성능 개선을 이루고자 한다.

[†]E-mail: jungyol@ajou.ac.kr

2. 실험

이 연구에 사용된 ZnO 박막은 Zn 타겟과 O₂ 산화제를 사용하여 450 V dc 스퍼터링 또는 13.56 MHz rf 스퍼터링으로 성장되었다. 스퍼터링의 고진공은 diffusion pump로 만들어졌고 성장중의 압력은 Ar 4 sccm에서 4 mTorr였다. Fig 1은 실험에 사용된 스퍼터링 장비의 간단한 구성도로서 타겟의 직경은 5 cm, 기판의 직경은 10 cm, 타겟과 기판 거리는 6 cm이다. 박막 성장중에 기판전압 V_{sub}을 이용하여 기판에 -70 V의 전압이 스위칭 형태로 인가되었다. ZnO 박막은 기판온도 450°C에서 150 nm 두께의 실리콘 산화막 위에 성장되었고, p⁺ Si 기판은 TFT의 gate로 사용되었다.

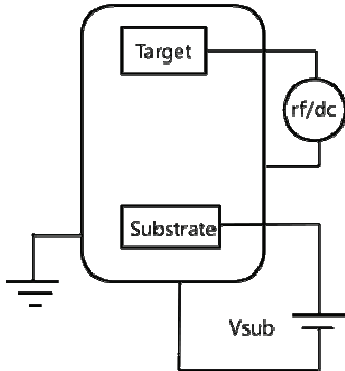


Fig. 1. Schematic diagram of sputtering system.

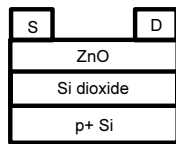
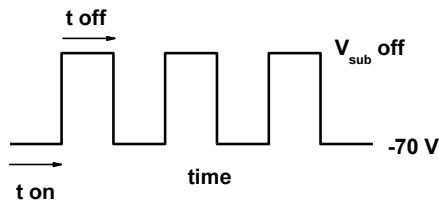


Fig. 2. Substrate voltage during growth, and schematic diagram of ZnO TFT. t_{on} = t_{off} = 30 sec.

Source, drain 전극은 ZnO 박막 위에 텅스텐 선을 고정시키고 그 위에 shadow mask를 덮고 Al을 증착하여 제작하였

다. 텅스텐 선의 직경은 25 μm이며 이는 TFT 채널 길이(L)가 되고 채널의 폭(W)은 500 μm이다. Fig. 2에 박막 성장시 인가된 기판 전압과 TFT 단면구조가 나와있다. TFT전류 측정은 Keithley 2400 Source Meter를 사용하였다

3. 결과 및 고찰

Fig 3은 스퍼터링 중에 기판전압의 변화에 따른 전류를 측정 한 것으로 Ar 유량이 4 sccm 일 때와 4.5 sccm일 때를 비교하고 있다(rf40W).

기판이 음전압일 때 전자는 기판에 도달하지 못하므로 전류로 측정되는 것은 기판에 도달하는 양이온을 뜻한다. 스퍼터링 중에 발생하는 양이온은 Zn⁺, O⁺ 등이 있다. 기판이 양전압이 되면 전자가 기판에 쉽게 도달할 수 있으므로 전류의 크기가 크게 증가하는 것으로 생각된다. 음이온 O⁻도 양전압에서 전류에 기여할 것으로 생각되지만, 전자가 더 큰 기여를 할 것으로 생각된다. Fig 3의 실선은 Ar 4 sccm인 경우이며, 세모는 Ar 4.5 sccm의 경우로서 Ar의 유량이 증가할수록 양전압, 음전압 모두에서 전류의 크기가 증가하고 있다. 이것은 Ar유량의 증가가 전자, 음이온, 양이온의 증가를 유발하기 때문인 것으로 보인다.

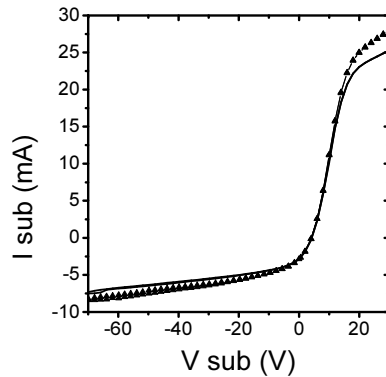


Fig. 3. Substrate current as a function of substrate voltage for different gas flows. Triangle: Ar 4.5 sccm, solid line: Ar 4 sccm.

개스가 Ar + O₂ 일 때 전류크기는 여러가지 요인에 의해서 결정된다. Zn 타겟의 표면이 산소로 산화되면 금속산화물의 2차 전자 방출율 (secondary electron emission)이 금속보다 높기 때문에 전자가 쉽게 방출되므로 Ar + O₂에서 더 큰 전류가 보일 수 있다 [9]. 한편 타겟의 표면산화가 너무 많이 진행되면 전류의 흐름이 어렵게 되어 전류크기가 감소하게 된다.

TFT 제작을 위한 ZnO 박막성장에서는 -70 V 전압을 on/off 시키는 방법을 사용하였다. Ar 과 O₂ 유량은 dc와 rf의 경우 다르게 설정되었다.

rf 스퍼터링의 경우 유량은 각각 Ar 4 sccm, O₂ 0.5 sccm을 사용하였다. dc 스퍼터링의 경우는 낮은 압력에서 플라즈마가 불안정해지고, 박막의 TFT 특성이 나빠기 때문에 Ar 5 sccm, O₂ 3 sccm을 사용하였다. dc 스퍼터링에서 낮은 O₂ 유량으로 성장된 TFT는 turn-off가 되지 않고 metallic 특성을 보였다. ZnO는 박막성장후에 어닐과정을 거치는데, 어닐 과정은 mechanical pump로 진공을 유지하면서 CO₂ + H₂ 분위기에서 450°C, 10분간 어닐하였다. CO₂와 H₂의 유량은 각각 5 sccm이고 어닐 과정에서의 압력은 120 mTorr였다. 이때 수소를 사용하는 목적은 산화 반응이 완결되지 않은 ZnO의 Zn를 수소, 탄소와 결합시켜서 제거하기 위한 것이다. 어닐 과정을 거치기 전에는 전류는 크지만 off 특성이 나쁘다. 어닐 과정을 거치면서 off 특성을 악화시키는 결합이 제거된 것으로 생각된다.

Fig. 4는 dc와 rf 스퍼터링으로 성장시킨 TFT의 전압전류 특성이다. rf로 성장된 sample B가 dc 스퍼터링으로 성장된 sample A 보다 더 좋은 TFT 특성을 보인다. Fig. 4는 V_{DS} = 10 V에서 gate-source 전압 변화에 의한 drain 전류 변화를 측정한 것이다.

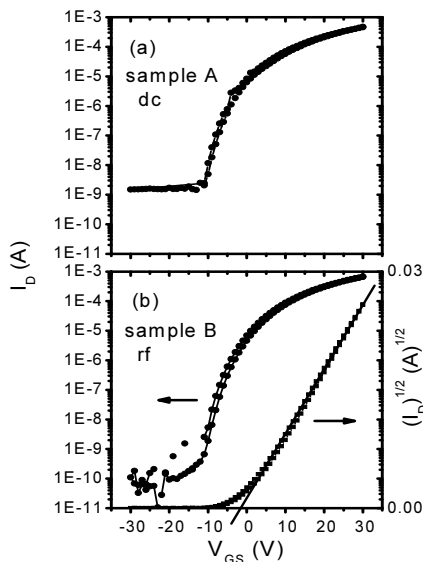


Fig. 4. Current characteristics of (a) Samples A and (b) B, as a function of gate voltages. Sample A was grown by dc sputtering, and sample B was grown by rf sputtering. L= 25 μ m, W= 500 μ m.

Fig. 5는 sample A, B에서 측정된 전류로 drain-source 전압 변화에 의한 drain 전류 변화이다. 앞의 그림에서와 마찬가지로 rf 스퍼터링으로 성장된 sample B가 더 좋은 특성을 보인다. Fig. 4와 5의 결과에서 sample B의 전하이동도는 7.5 cm²/Vsec, on-off ratio는 10⁶, 문턱전압은 -2 V로 계산되었다.

우리의 실험에서 산소를 산화제로 사용했는데, 산소 분자(O₂)는 산소간의 이중결합(O=O) 때문에 분리되지 않은 상태로 ZnO 내부의 O 자리를 대신 차지하여 결합을 만드는 경우가 많다고 알려져 있다 [10]. 우리의 실험결과를 기판전압 스위칭이 어떤 과정을 거쳐서 TFT 특성 향상에 기여하는 것으로 나타났다. 기판전압에 의한 영향은 더 자세한 추가 연구가 필요하다.

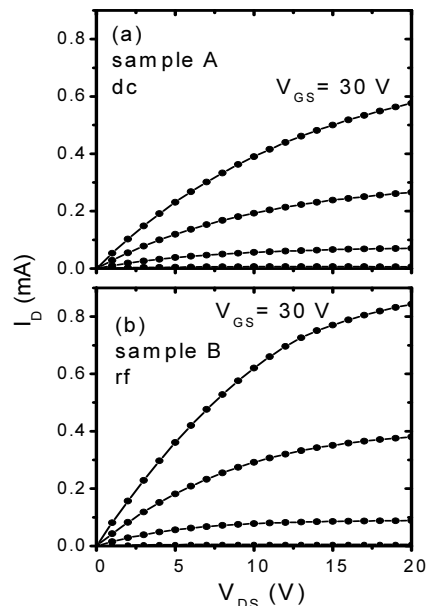


Fig. 5. Current characteristics of (a) sample A and (b) sample B, as a function of drain-source voltages.

4. 결 론

본 연구는 ZnO 박막 스퍼터링 성장시에 기판에 전압을 걸어서 TFT 특성 변화를 조사하였다. Zn 금속 타겟과 산소를 이용하여 dc와 rf 스퍼터링을 수행하였다. 실험결과 두가지 성장방식 모두에서 기판전압 스위칭이 양질의 ZnO 박막을 성장시킬 수 있다는 것을 보였다. 스퍼터링에서 기판전압으로 박막 성장에 필요한 이온 공급을 조절할 수 있다는 것을 보였다.

참고문헌

1. Nomura, K., Ohta, H., Takagi, A., Kamiya, T., Hirano, M., and Hosono, H., "Room-temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors," *Nature*, Vol. 432, pp. 488-492, 2004.
2. Jo, J., Seo, O., Choi, H., and Lee, B., "Enhancement-mode ZnO thin-film transistor grown by metalorganic chemical vapor deposition," *Appl. Phys. Express*, Vol. 1(4), Article ID 041202, 2008.
3. Yu, M. and Jo, J., "Sputtering growth of ZnO thin-film transistor using Zn target," *J. Semicon. Displ. Tech.*, Vol. 13(3), pp. 35-38, 2014.
4. Takayanagi, S., Yanagitani, T., and Matsukawa, M., "Effect of metal mode and oxide mode on unusual c -axis parallel oriented ZnO film growth on Al/glass substrate in a reactive magnetron sputtering of Zn target," *J. Cryst. Growth* Vol. 363, pp. 22-24, 2013.
5. Kim J., Meng J., Lee D., Yu M., Yoo D., Kang D., and Jo J., "ZnO Thin-film transistor grown by rf sputtering using carbon dioxide and substrate bias modulation," *J. Nanomater.* Vol. 2014, Article ID 709018, 2014.
6. Jia J., Torigoshi Y., and Shigesato Y., "In situ analyses on negative ions in the indium-gallium-zinc oxide sputtering process," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 103(1), Article ID 013501, 2013.
7. Gudmundsson J. T., Kouznetsov I. G., Patel K. K., and Liberman M. A., "Electronegativity of low-pressure high density oxygen discharges," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 34, pp. 1100-1109, 2001.
8. Ishikawa T., Hayashi D., Sasaki K., and Kadota K., "Determination of negative ion density with optical emission spectroscopy in oxygen afterglow plasmas," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 72(19), pp. 2391-2393, 1998.
9. Abe Y., Shinya K., Chiba Y., Kawamura M., and Sasaki K., "Time-dependent variation of the target mode in reactive sputtering of Al-O₂ system," *Vacuum*, Vol. 84(12), pp. 1365-1367, 2010.
10. Erhart, P., Klein, A., and Albe, K., "First-principles study on the structure and stability of oxygen related point defects in zinc oxide," *Phys. Rev. B*, Vol. 72, Article ID 085213, 2005.

접수일: 2017년 6월 21일, 심사일: 2017년 6월 24일,
 게재확정일: 2017년 6월 26일