

ZnO 박막트랜지스터의 어닐링 조건에 따른 전류 변화

유덕연 · 김형주 · 김준영 · 조종열[†]

[†]아주대학교 정보통신대학 전자공학과

Current Variation in ZnO Thin-Film Transistor under Different Annealing Conditions

Dukyeon Yoo, Hyoungju Kim, Junyeong Kim and Jungyol Jo[†]

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

Abstract

ZnO is a wide bandgap (3.3 eV) semiconductor with high mobility and good optical transparency. However, off-current characteristics of ZnO thin-film transistor (TFT) need improvements. In this work we studied the variation in ZnO TFT current under different annealing conditions. Annealing usually modifies gas adsorption at grain boundaries of ZnO. When oxygen is adsorbed, electron density decreases due to strong electronegativity of the oxygen, and TFT current decreases as a result. Our experiments showed that current increased after vacuum annealing and decreased after air annealing. We explain that the change of off-current is caused by the desorption and adsorption of oxygen at the grain boundaries.

Key Words : Zinc oxide, Thin-film transistor, Sputtering, Annealing, Oxidizer

1. 서 론

ZnO는 넓은 밴드갭 (3.3 eV)을 가지고 있으며, 비정질 실리콘보다 높은 전자이동도를 가지고 있다. 또한 화학적 안정성과 좋은 광 투과율 등으로 인하여 디스플레이 장치의 신호처리 회로와 발광소자의 투명 전극으로 많은 관심을 받고 있다. 생산 원가도 낮다는 장점이 있으나 ZnO thin-film transistor (TFT)는 off 전류와 on/off ratio를 개선할 필요성이 있다[1,2]. 최근의 연구에서 어닐링을 통해 결정구조의 결함을 제거하고, 가스 흡착을 변화시켜서 on/off ratio와 전기적 특성을 변화시키는 연구가 있었다[3,4]. InGaZnO는 박막이 비정질이기 때문에 특성이 균일하며 다결정인 ZnO 보다 더 우수한 TFT 특성을 보인다[5]. 그러나 InGaZnO의 제조방법이 복잡하고 생산원가가 높다는 점이 상용화에 장애가 되고 있다. 본 연구에서는 스퍼터링으로 성장된 ZnO TFT를 진공과 공기 조건에서 300°C ~ 400°C까지 어닐링하여 off 전류 변화와 전기적 특성 변화를 살펴

보고 원인을 분석하였다.

2. 실 험

이 연구에 사용된 ZnO 박막은 rf 스퍼터링으로 성장된 것으로서 자세한 성장조건은 Table 1에 나와있다. 스퍼터링의 고진공은 diffusion pump로 만들어졌고 성장중의 압력은 7 mTorr 였다. 박막성장에는 ZnO 타겟이 사용되었다. 샘플 A, B는 이산화탄소를 산화제로 사용하였고 샘플 C는 산소를 산화제로 사용하였다. ZnO 박막은 150 nm 두께의 실리콘 산화막 위에 성장된 것이며, p⁺ Si 기판을 gate로 사용하였다. ZnO 박막 위에 텅스텐 선을 고정시키고 그 위에 shadow mask를 덮고 200 nm 두께의 Al을 증착하여 source와 drain 전극을 제작하였다. 텅스텐 선의 직경은 25 μm이며 이는 TFT 채널 길이 (L)가 되고 채널의 폭 (W)은 500 μm이다. Fig. 1에 단면구조가 나와있다. 진공 어닐링은 furnace에서 mechanical pump를 사용하여 36 mTorr 압력에서 300°C 또는 400°C 조건에서 30분간 진행하였다. 또한 공기 중에서도 각각의 온도로 30분간 어닐링

[†]E-mail : jungyol@ajou.ac.kr

Table 1. Growth conditions of ZnO thin-films.

Sample name	Ar flow (sccm)	Oxidizer flow (sccm)	Growth temp. (°C)	Rf power (W)
A	10	2.3 CO ₂	450	60
B	10	4.0 CO ₂	550	80
C	15	4.0 O ₂	300	100

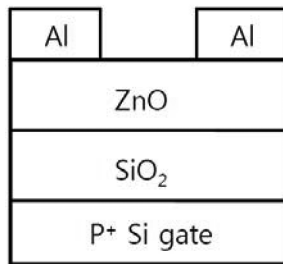


Fig. 1. Schematic diagram of ZnO TFT.

을 진행하였다. 전류 측정에 사용된 장비는 Keithley 2400 Source Meter이다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2(a)는 샘플 A에서 어닐링 전과 진공에서 300°C, 400°C 온도에서 30분 어닐링한 후의 전류 특성을 측정한 것이다. 어닐링 온도가 높을수록 전류도 증가함을 볼 수 있다. 이것은 진공 어닐링에 의해 ZnO의 결정립 경계면 (grain boundary, GB)에 흡착되어있던 산소가 빠져나가며 전류의 증가로 이어지는 것으로 보인다. 초기에 GB에 붙어있던 산소는 자유전자를 감소시키므로 TFT의 전류를 감소시키는 것으로 생각된다. 그러나 진공 어닐링으로 산소가 빠져나가면 박막의 자유전자가 증가하고 turn-off도 어려워지는 것으로 생각된다.

Fig. 2(b)는 2(a)에서 진공 어닐링한 TFT를 공기 중에서 30분간 300°C와 400°C에서 어닐링한 측정 결과이다. 진공 어닐링에서 증가하였던 전류가 다시 감소한 것을 볼 수 있다. 이는 공기중의 산소가 어닐링 과정에서 ZnO의 GB에 다시 흡착되어 자유전자를 감소시키고, 전류를 감소시킨 것으로 보인다. 공기 어닐링 후에 +30 V에서의 전류도 대폭 감소하였는데 이것도 산소 흡착에 의한 전자 감소로 생각된다.

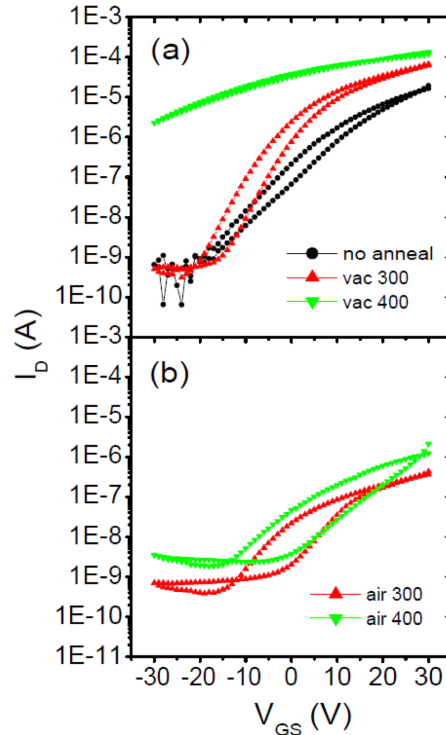


Fig. 2. Current characteristics of Sample A after (a) vacuum annealing (300°C, 400°C) and (b) air annealing (300°C, 400°C). $V_{DS} = 10$ V.

Fig. 2의 실험 결과는 수분 (H₂O) 흡착과도 관련이 있다. 일반적으로 ZnO에 수분이 흡착되면 산소와는 반대로 donor의 역할을 한다고 알려져 있으며 전류의 증가가 예상된다[3]. 우리의 실험결과에서는 진공 어닐링으로 흡착된 개스를 감소시킬 때 전류가 증가한다. 만약 수분이 진공 어닐링으로 감소했다면 전류도 감소해야 하기 때문에 우리의 실험결과와는 반대이다. 우리의 실험에서는 수분보다 산소가 더 중요한 역할을 하는 것으로 생각된다.

Fig. 3의 (a)와 (b)는 샘플 B에서의 진공 어닐링과 공기 어닐링 결과이다. Fig. 2에서는 하나의 소자를 먼저 진공 어닐링한 후에 공기 어닐링을 했는데 Fig. 3에서는 같은 박막에서 2개의 소자를 만들어 하나는 300°C 진공 어닐링과 공기 어닐링을 하고, 다른 하나는 400°C 진공 어닐링과 공기 어닐링을 수행하였다. 앞선 경우들과 마찬가지로 진공 어닐링 후에는 산소의 탈출로 인해 전류가 올라간 것으로 보인다. 300°C에서는 산소 탈출과 흡착이 다소 약한 것처럼 보이지만 400°C에서는 그 차이가 뚜렷하게 보이고 있다. Fig. 4(b)에

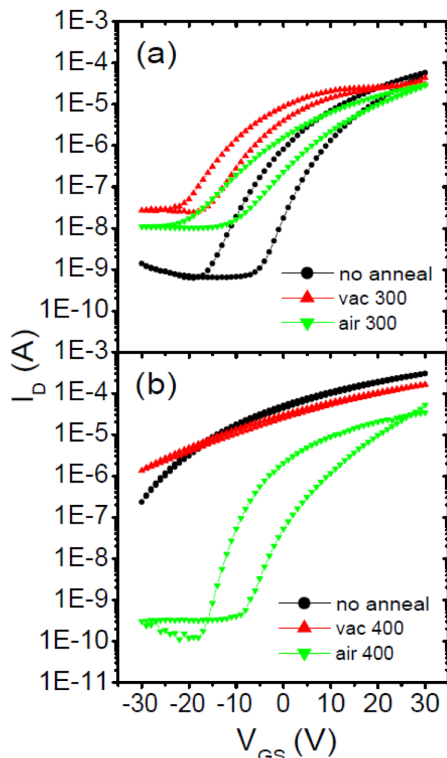


Fig. 3. Current characteristics of Sample C after 300°C and 400°C annealing. (a) in vacuum, and (b) in air.

사용된 소자는 (a)와 다르게 어닐링 전의 off 전류가 10^{-7} A 정도로 (a)보다 높은 것을 볼 수 있다. 이는 같은 샘플 B 내부에서도 위치에 따라서 성장조건이 조금씩 달라서 생기는 편차 때문이다.

샘플 B는 550°C에서 성장된 박막인데, 일반적으로 높은 온도에서 성장된 박막이 더 치밀한 결정구조를 가지는 것으로 생각되지만 이 실험 결과에서는 450°C와 550°C 성장온도가 큰 차이를 보이지 않고 있다.

Fig. 4의 샘플 C는 지금까지의 결과와는 다른 특성을 보이고 있다. Fig. 4(a)의 진공 어닐링에서는 300°C에서 전류가 급격히 증가한 뒤 400°C에서 전류가 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 공기 어닐링 후에는 off 전류가 거의 변하지 않는 것을 볼 수 있다. Table 1에 보인 것처럼 이 소자는 산화제로 이산화탄소 대신에 산소를 사용하였다. 300°C에서 전류가 증가하는 것은 앞에서의 실험 결과와 같지만, 진공 400°C에서 전류가 감소한다는 점은 앞의 결과와 틀린 점이다. 이 결과는 산소 성장 박막의 경우 400°C 진공 어닐링으로 GB에서 떨어져 나가는 산소의 숫자가 많지 않다는 것을 의미한다.

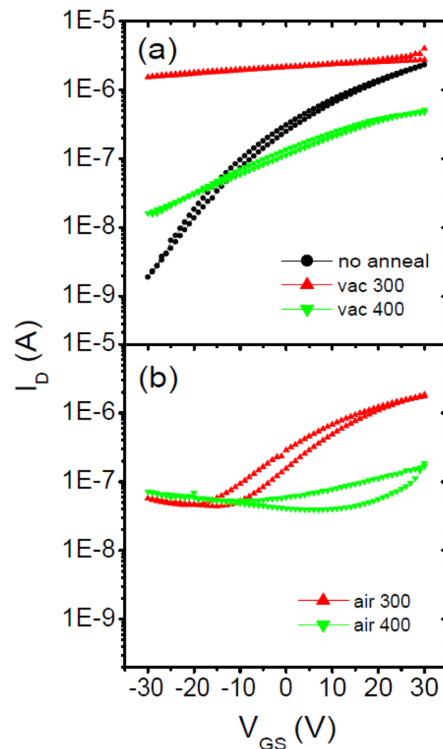


Fig. 4. Current characteristics of Sample C after (a) vacuum annealing, and (b) air annealing.

Fig. 4의 결과는 ZnO 내부에 생기는 결함이 산소 성장일 때와 이산화탄소 성장일 때가 다르다는 것을 보여주고 있다. 산소 분자 (O_2)는 산소간의 이중결합 ($O=O$) 때문에 분리되지 않은 상태로 ZnO 내부의 O 자리를 대신 차지하여 결함을 만드는 경우가 많다고 알려져 있다[6]. 한편 이산화탄소는 스퍼터링 성장중에 CO와 O로 분리되기 때문에 $O=O$ 형태는 존재하지 않는다. 이와 같은 구조적 차이점이 우리의 실험결과에서 나타난 산소 성장 박막과 이산화탄소 성장 박막의 전류특성 차이의 원인이라고 생각된다.

4. 결 론

우리의 실험 결과 ZnO TFT에서 300°C - 400°C 구간의 어닐링으로 전류 특성에 많은 변화가 일어난다는 것을 보였다. 진공 어닐링 후의 전류 증가는 ZnO에 흡착된 산소가 제거된 것으로 설명된다. 공기 어닐링 후의 전류 감소는 산소가 다시 흡착되면서 자유전자를 감소시킨 것으로 생각된다. 공기 어닐링에서 질소도 영향을 끼칠 수 있지만 300°C - 400°C 구간에서는 산소

만 중요한 역할을 하는 것으로 생각된다. 그리고 이 온도 구간에서는 수분의 흡착도 큰 영향을 끼치지 않은 것으로 설명된다. 우리의 실험결과에서 이산화탄소로 성장된 박막과 산소로 성장된 박막은 어닐링 특성에서 큰 차이를 보이는데 이것은 박막의 내부에 존재하는 결함의 종류가 다르기 때문인 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Jo, J., Seo, O., Choi, H., and Lee, B., "Enhancement-mode ZnO thin-film transistor grown by metalorganic chemical vapor deposition," *Applied Physics Express*, Vol. 1, p. 041202, 2008.
2. Adamopoulos, G., Bashir, A., Thomas, S., Gillin, W.P., Georgakopoulos, Shkunov, M., Baklar, M.A., Stingelin, N., Maher, R.C., and Cohen, L.F., "Spray-Deposited Li-Doped ZnO Transistors with Electron Mobility Exceeding 50 cm²/Vs," *Advanced Materials*, Vol. 22, 4764, 2010.
3. Jo, J., Choi, H., Yun, J., Kim, H., Seo, O., and Lee, B., "Improvement of on/off ratio in ZnO thin-film transistor by using growth interruptions during metalorganic chemical vapor deposition," *Thin Solid Films*, Vol. 517, 6337, 2009.
4. Chu, M.C., Meena, J.S., Liu, P.T., Shieh, H.D., You, H.C., Tu, Y.W., Chang, F.C., and Ko, F.H., "Oxygen Plasma Functioning of Charge Carrier Density in Zinc Oxide Thin-Film Transistors," *Applied Physics Express*, Vol. 6, 076501, 2013.
5. 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, 488, 2004.
6. 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, 085213, 2005.

접수일: 2014년 2월 25일, 심사일: 2014년 3월 12일,
 게재확정일: 2014년 3월 20일