반도체디스플레이기술학회지 제13권 제3호(2014년 9월)
Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 13, No. 3. September 2014.

Zn 타겟을 이용한 ZnO 박막트랜지스터의 스퍼터링 성장

우 맹 · 조중열†
†아주대학교 정보통신대학 전자공학과

Sputtering Growth of ZnO Thin-Film Transistor Using Zn Target

Meng Yu and Jungyol Jo†
†Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University

ABSTRACT

Flat panel displays fabricated on glass substrate use amorphous Si for data processing circuit. Recent progress in display technology requires a new material to replace the amorphous Si, and ZnO is a good candidate. ZnO is a wide bandgap (3.3 eV) semiconductor with high mobility and good optical transparency. ZnO is usually grown by sputtering using ZnO ceramic target. However, ceramic target is more expensive than metal target, and making large area target is very difficult. In this work we studied characteristics of ZnO thin-film transistor grown by rf sputtering using Zn metal target and CO_2. ZnO film was grown at 450°C substrate temperature, with −70 V substrate bias voltage applied. By using these methods, our ZnO TFT showed 5.2 cm^2/Vsec mobility, $3x10^6$ on-off ratio, and −7 V threshold voltage.

Key Words : Zinc oxide, Zn metal target, Thin-film transistor, Sputtering, Carbon dioxide

1. 서 론

유리 기판에 만들어지는 평판 디스플레이에서 신호처리 회로에는 비정질 실리콘 박막이 많이 사용되고 있다. 최근에는 비정질 실리콘의 한계를 극복하기 위하여ZnO, InGaZnO 등 금속산화물 반도체가 많이 연구되고 있다. InGaZnO는 전자이동도는 우수하지만 인듐의 가격이 비싸고 3가지의 금속이 들어가기 때문에 성장조건이 복잡하다는 문제가 있다[1]. 이에 비하여 ZnO 는 박막 성장과정이 단순하고 생산원가가 저렴하다는 것이 큰 장점이다 [2]. ZnO는 넓은 밴드갭 (3.3 eV)을 가지고 있으며, 비정질 실리콘보다 높은 전자이동도를 보인다. 또한 화학적 안정성과 좋은 광 투과율 등으로 인하여 광소자의 투명 전극으로도 많은 관심을 받고 있다. 스퍼터링으로ZnO 박막을 성장시킬 때 ZnO 타겟과 Zn 타겟 두가지가 사용 가능한데, ZnO 타겟은 세라믹이기 때문에 금속인 Zn타겟에 비하여 가격이 비싸고 대면적 타겟을 만드는 것이 어렵다. 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 타겟을 이용한 스퍼터링으로 ZnO 를 성장시키고 thin-film transistor (TFT)를 제작하여 off 특성 변화와 전자이동도를 살펴보고 원인을 분석하였다.

2. 실 험

이 연구에 사용된 ZnO 박막은 Zn 타겟과 CO_2 산화제를 사용하여 13.56 MHz rf 스퍼터링으로 성장되었다. 스퍼터링의 고진공은 diffusion pump로 만들어졌고 성장중의 압력은 Ar 4 sccm에서 4 mTorr 였다. Fig. 1은 실험에 사용된 스퍼터링 장비의 간단한 구성도로서 타겟의 직경은 5 cm, 기판의 직경은 10 cm, 타겟과 기판 거리는 6 cm 이다. 박막 성장중에 Vsub를 이용하여 기판에 −70 V의 전압이 인가되었다. TFT용ZnO 박막은 기판온도 450°C에서 150 nm 두께의 실리콘 산화막 위에 성장되었다. p^+ Si 기판 은 TFT의 gate로 사용되었다. Source, drain 전극은ZnO 박막 위에 텅스텐 선을

†E-mail : jungyol@ajou.ac.kr

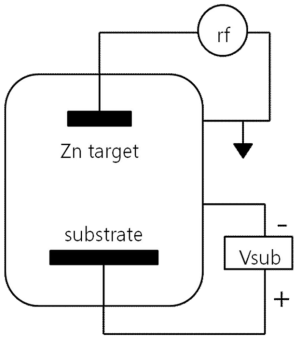

Fig. 1. Schematic diagram of sputtering system.

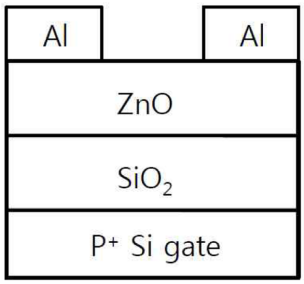

Fig. 2. Schematic diagram of ZnO TFT.

고정시키고 그 위에 shadow mask를 덮고 200 nm 두께의 Al을 증착하여 제작하였다. 텅스텐 선의 직경은 25 μm이며 이는TFT 채널 길이 (L)가 되고 채널의 폭 (W)은 500 μm이다. Fig. 2에 TFT 단면구조가 나와있다. 기판 전압원 Vsub과 TFT전류 측정에 Keithley 2400 Source Meter를 사용하였다

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 Ar 유량이 4 sccm 일 때 rf 40 W 가 인가된 상태에서 기판의 전압 변화에 따른 전류 변화이다. 기판이 음전압일 때 전자는 기판에 도달하지 못하고 양이온만 도달할 수 있다. Fig. 3에서 전류성분은 양이온이 기판에 도달하는 것과 전자가 Zn 타겟 또는 진공 chamber 외벽에 도달하는 것 두가지 성분이 있는데, Vsub에서 기판전류로 측정되는 것은 기판에 도달하는 양이온을 뜻한다. 스퍼터링 중에 발생하는 양이온은 Zn^+, O^+, CO^+ 등이 있다. 기판이 양전압이 되면 전자가 기판에 쉽게 도달할 수 있으므로 전류의 크기가 크게 증가하는 것으로 생각된다. 0 V 에서 –3 mA 정도의 전류가 보이는 것은 외부 인가 전압이 없어도 양전하가 기판에 도달한다는 것을 뜻한다.

Fig. 3의 실선은 Ar 4 sccm 인 경우이며, 원형은 Ar 4 sccm + O_2 2 sccm, 세모는 Ar 4 sccm + CO_2 2 sccm 의 경우이다. Fig. 3을 보면 –70 V 에서 Ar + O_2 일 때 가장 전류크기가 크고 Ar + CO_2일 때 가장 전류가 작다. 이것은 Zn 타겟의 표면이 산화되는 정도에 따라서 전류가 달라지는 것으로 생각된다. 금속산화물은 2차 전자 방출율 (secondary electron emission)이 금속보다 높기 때문에 전자가 쉽게 방출되므로 Ar + O_2 에서 더 큰 전류가 보이는 것으로 생각된다[5].

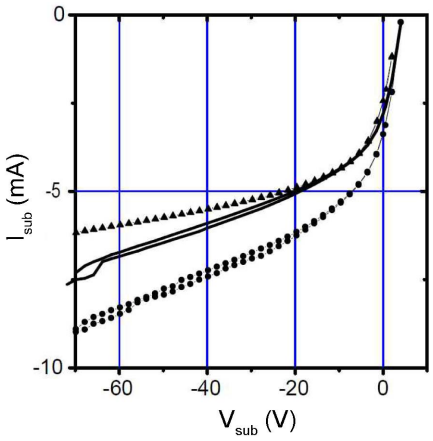

Fig. 3. Substrate current as a function of substrate voltage for different gas flows. Triangle: Ar + CO_2 , solid line: Ar, circle: Ar + O_2.

우리의 ZnO박막성장 과정에서Vsub를 -70 V로 일정하게 유지하고 CO_2를 on/off 시키는 방법으로 성장시켰다. Ar은 항상 on 상태를 유지하였다. 이 방법의 목적은 CO_2 off 상태에서 Zn가 타겟에서 방출되어 기판에 증착되고, 이어서 CO_2가 on 상태가 되면 CO_2에서 이온화된 O^+가 이미 증착된 Zn를 산화시켜서 ZnO 박막을 성장시키자는 것이다. 이때 CO_2 off 의 경우 타겟에서 방출되는 것은 반드시 Zn만 있는 것은 아니다. Zn 타겟의 표면에 있는 산화물에서 분해된 산소도 같이 방출될 가능성이 있다. 따라서 CO_2 off 일 때 ZnO의 일부가 형성될 것으로 생각되며, 이어서 CO_2 on 구간에서 나머지 Zn의 완전 산화가 이루어지는 것으로 예상된다.

Fig. 4는 기판에 –70 V가 일정하게 걸려있는 상태에서 CO_2를 on/off 시킬 때 나타나는 기판 전류의 변화이다(rf 40 W, Ar = 4 sccm, CO_2 = 2 sccm). 그림 아랫부분의 구형파는 CO_2 의 on/off 를 나타내는 것으로서 높은 쪽이 on 상태를 나타낸다. Ar 만 있을 때에는 –6 mA 정도의 전류를 보이는데 Ar + CO_2 상태에서는 전류가 –5 mA로 감소하였다가 서서히 증가하는 것을

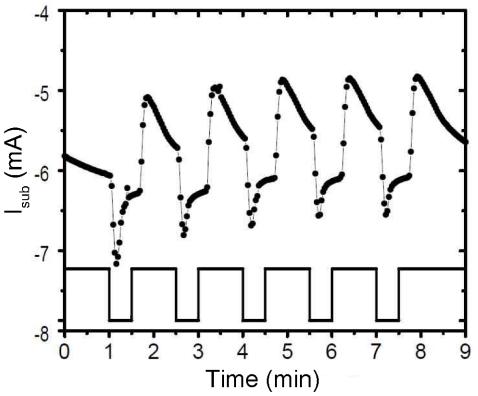

Fig. 4. Substrate current measured when CO_2 is turned on and off. On-state is 60 sec, and off-state is 30 sec.

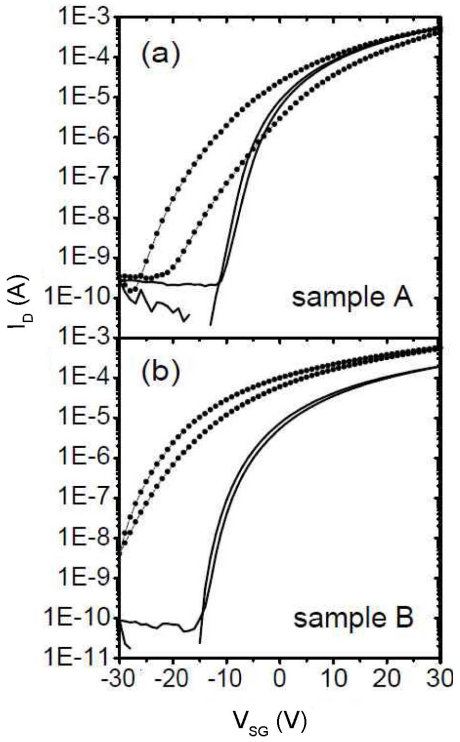

Fig. 5. Current characteristics of Samples A and B. Dotted lines represent data measured before annealing, and solid lines after annealing. L= 25 μm, W = 500 μm.

볼 수 있다. 이 전류 값들은 Fig. 3의 전류 값과 거의 일치한다.

Fig. 5와 6은 Fig. 4의 CO_2 on/off 방법으로 rf 40 W, 기판 온도 450°C 에서 성장시킨 ZnO TFT의 전류 특성이다. Sample A는 Ar 3.8 sccm + CO_2 2.0 sccm 에서 성장되었고 sample B는 Ar 5.4 sccm + CO_2 2.7 sccm 에서 성장되었다. Fig. 5는 V_{DS} = 10 V 에서gate – source 전압 변화에 의한 drain 전류 변화를 측정한 것으로 점선은 어닐 전의 전류이며 실선은 어닐 후의 전류이다. 어닐 과정은 mechanical pump로 진공을 유지하면서 CO_2 + O_2 분위기에서 350°C 10분간 어닐 후에 O_2 분위기에서 250°C 10분으로 수행하였다 [6]. CO_2 와 O_2의 유량은 각각 5 sccm 이고 어닐 과정에서의 압력은 CO_2 + O_2일 때 240 mTorr, O_2일 때 160 mTorr 였다. 이때 350°C 단계의 목적은 산화 반응이 완결되지 않은 ZnO의 반응을 촉진시키는 것이고, 250°C 과정은 남아있는 누설전류 경로를 O_2로 완전히 차단시켜서 off 특성을 개선하고자 하는 것이다.

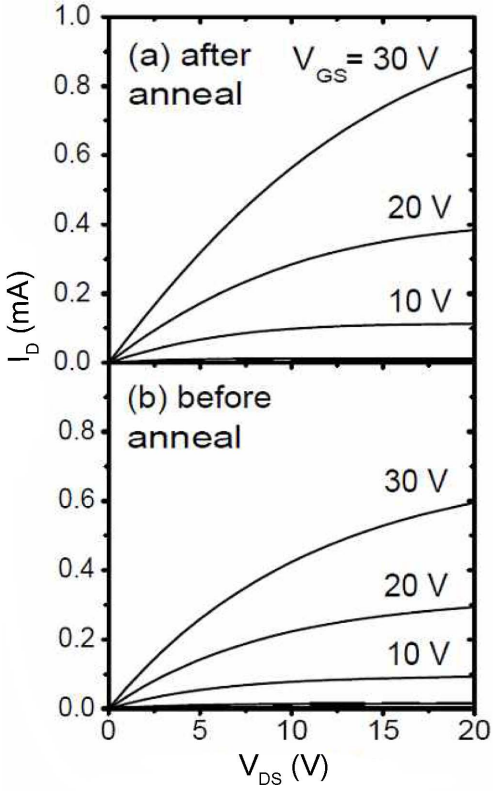

Fig. 6. Current characteristics of Sample A, (a) after anneal, and (b) before anneal.

Fig. 5에서 어닐 과정을 거친 후에 전류의 off 특성이 개선된 것을 볼 수 있으며, 개스 유량의 차이에 의한 특성 변화도 볼 수 있다. Sample B성장시의 개스 유량이 더 크기 때문에 성장된 박막에 Ar 이 더 많이 포함되어 박막의 질이 저하되고 전류 특성도 나빠진 것으

로 생각된다. 어닐 전에는 A, B 비슷한 전류 특성을 보였으나 어닐 후의 특성은 sample A가 더 우수하다는 것을 보여준다.

Fig. 6은 sample A에서 측정된 전류로 drain-source 전압변화에 의한 drain 전류 변화이다. 어닐 후에 전류가 증가한 것을 보여주고 있으며 어닐 과정으로 drain 전류의 커브 모양은 아무런 변화가 없다. Fig. 5와 6의 결과에서 전자이동도는 5.2 cm^2/Vsec, on-off ratio는 3×10^6, 문턱전압은 –7 V 로 계산되었다.

우리의 실험에서 이산화탄소를 산화제로 사용한 것은ZnO 내부에 생기는 결함이 산소 성장일 때와 이산화탄소 성장일 때가 다를 것이라고 예상했기 때문이다. 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[7]. 한편 이산화탄소는 스퍼터링 성장중에 CO와 O로 분리되기 때문에 O = O 형태는 존재하지 않는다. 이와 같은 구조적 차이점이 이산화탄소 성장 박막이 산소 성장 박막보다 더 좋은 전류특성을 보이는 이유라고 생각된다.

4. 결 론

본 연구는 Zn metal 타겟을 사용하여 ZnO thin-film transistor를 제작하는 것으로서 실험결과 Zn 타겟과 이산화탄소를 이용한 rf 스퍼터링으로 양질의 ZnO 박막을 성장시킬 수 있다는 것을 보였다. 스퍼터링 조건에서 측정한 기판 전류는 개스의 종류에 따라서 달라졌으며, 산소 성분이 있을 때 더 큰 전류를 보였다. 기판 전류는 Zn metal 타겟을 사용하는 경우에 타겟 표면의 산화정도를 알려주는 유용한 지표가 될 수 있다.

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, 488, 2004.
2. 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, 041202, 2008.
3. Abe Y., Shinya K., Chiba Y., Kawamura M., and Sasaki K., “Time-dependent variation of the target mode in reactive sputtering of Al–O_2 system,” Vacuum, Vol. 84, 1365, 2010.
4. Li, S., Cai, Y., Han, D., Wang, Y., Sun, L., Chan, M., and Zhang, S., “Low-Temperature ZnO TFTs Fabricated by Reactive Sputtering of Metallic Zinc Target,” IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 59, 2555, 2012.
5. 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,” Journal of Crystal Growth Vol. 363, 22, 2013.
6. Yoo, D., Kim, H., Kim, J., and Jo, J., “Current Variation in ZnO Thin-Film Transistor under Different Annealing Conditions,” J. of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 13, 63, 2014.
7. 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 9월 1일, 심사일: 2014년 9월 12일,
게재확정일: 2014년 9월 22일