

ZnO-SnO₂ 투명박막트랜지스터의 특성에 미치는 산소분압 및 후속열처리의 영향

마대영^{1,a}

¹ 경상대학교 전기공학과 및 공학연구원

The Effects of Oxygen Partial Pressure and Post-annealing on the Properties of ZnO-SnO₂ Thin Film Transistors

Tae Young Ma^{1,a}

¹ Department of Electrical Engineering and ERI, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

(Received March 13, 2012; Revised March 21, 2012; Accepted March 21, 2012)

Abstract: Transparent thin film transistors (TTFT) were fabricated using the rf magnetron sputtered ZnO-SnO₂ films as active layers. A ceramic target whose Zn atomic ratio to Sn is 2:1 was employed for the deposition of ZnO-SnO₂ films. To study the post-annealing effects on the properties of TTFT, ZnO-SnO₂ films were annealed at 200°C or 400°C for 5 min before In deposition for source and drain electrodes. Oxygen was added into chamber during sputtering to raise the resistivity of ZnO-SnO₂ films. The effects of oxygen addition on the properties of TTFT were also investigated. 100 nm Si₃N₄ film grown on 100 nm SiO₂ film was used as gate dielectrics. The mobility, I_{on}/I_{off}, interface state density etc. were obtained from the transfer characteristics of ZnO-SnO₂ TTFTs.

Keywords: Transparent thin film transistors, ZnO-SnO₂ films, Rf magnetron sputtering, Mobility, Interface state density

1. 서론

최근 10 cm²/V sec 이상의 높은 이동도를 갖는 ZnO계 TTFT (transparent thin film transistors)에 대한 연구결과 [1,2]가 발표되면서, 고밀도 디스플레이의 발달과 함께 관심을 받아 온, 투명박막트랜지스터 (transparent thin film transistors, TTFT) [3-6]에 대한 연구자들의 기대가 더욱 높아지고 있다.

초기에는 증착공정, 전기적 특성, 광학적 특성 등이 잘 알려져 있는 ZnO가 TTFT의 활성층 (active layer)으로 주로 사용되었다 [7]. 에너지 갭이 자외선 영역(~3.4 eV)에 있는 ZnO는 원료가 저렴하고 화학

적으로 안정되며 공정조건의 변화에 의해 넓은 범위의 저항률을 얻을 수 있다는 장점들을 가지고 있다. 그러나 ZnO의 강한 c축 성장성에 의해 발생하는 막 표면의 거칠기 (roughness) 증가와 뚜렷한 입계 (grain boundary)는 TTFT의 이동도 개선에 있어서 기술적인 한계를 보인다. 따라서 최근에는 ZnO에 인듐 (In), 주석 (Sn), 갈륨 (Ga) 등 원자의 전자분포형태가 (n-1)d¹⁰ns⁰ (n≥4)인 중금속 양이온을 화합시킨 비정질산화물 박막을 활성층으로 하는 TTFT에 대한 연구 [1-6]들이 활발히 이루어지고 있다. 중금속 양이온이 포함된 비정질산화물 박막은 표면이 평탄할 뿐만 아니라 반경이 큰 대칭형 구 모양인 ns 양자궤도의 중첩에 의해 박막의 결정구조에 영향을 받지 않는

a. Corresponding author: tyama@gnu.ac.kr

전자의 이동경로를 형성하여 비정질임에도 불구하고 높은 전하이동도를 나타낸다.

종래에 보고된 [8-10] 고이동도 투명박막트랜지스터는 주로 In이 함유된 ZnO계 박막을 활성층으로 사용하였다. 그러나 투명도전막으로 사용되는 ITO의 주 성분인 In은 그 사용량의 증가와 함께 희소가치가 높아지고 있으며, 고온, 플라즈마 등 반도체 공정환경에 취약한 면을 가지고 있다. 따라서 In을 배제한 재료로 투명박막트랜지스터를 개발하려는 연구가 진행되고 있으며, 그 대표적인 재료가 ZnO와 SnO₂의 화합물 (ZnO-SnO₂)박막이다. ZnO-SnO₂박막은 주로 스퍼터링으로 증착되며 공정조건에 따라 전기적 특성이 큰 차이를 보이는 것으로 알려져 있다 [11]. 본 연구에서는 ZnO-SnO₂ TTFT의 공정 최적화를 위하여 ZnO-SnO₂ 막의 공정조건에 따른 특성변화를 조사하였다. ZnO-SnO₂ 스퍼터링 시 전력, 압력은 선형실험을 통하여 70 W 및 5 mtorr로 고정하였으며, 다만 스퍼터링 시 아르곤에 포함된 산소량과 후속공정인 급속 열처리온도를 변화시켰다. 본 연구를 통해 10 cm²/V sec 이상의 이동도와 10⁷ 이상의 작동전류-차단전류 비(I_{on}/I_{off})를 갖는 ZnO-SnO₂ TTFT를 제조하였다.

2. 실험 방법

N⁺ 실리콘웨이퍼를 습식산화 시켜 100 nm 두께의 SiO₂를 기른 후에 PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition)로 Si₃N₄막을 100 nm 두께로 증착하였다. 그 위에 TTFT의 활성층으로 사용하기 위하여 ZnO-SnO₂막을 고주파 스퍼터링 (rf magnetron sputtering)하였다. ZnO-SnO₂막을 증착하기 위해 Zn와 Sn의 원자비가 2:1인 ZnO-SnO₂ 타겟을 Kurt J. Lesker사에 주문·제작하였으며, 스퍼터링 전력, 압력 및 시간은 각각 5 W, 5 mTorr 및 10분으로 고정하였다. 10분 간 스퍼터링한 ZnO-SnO₂막의 두께는 약 60 nm이었다. MFC (mass flow controller)조절을 통해 산소와 아르곤의 분압을 변화시켰다. 아르곤의 유량을 50 sccm으로 고정한 상태에서 아르곤과 산소의 유량 비 (F_{Ox}/F_{Ar})를 5%, 10%, 20%, 30%, 40%로 변화시켰다. 상온에서 사각형 (2 mm × 0.5 mm)의 ZnO-SnO₂막을 스퍼터링한 다음 샘플 별로 각각 200°C, 400°C에서 5분 동안 열처리하였다. 열처리를 위해 급속가열장치 (ULVAC, MILA-3000)를 사용하였다. 열처리한 ZnO-SnO₂막 위에 스테인레스 마스크를

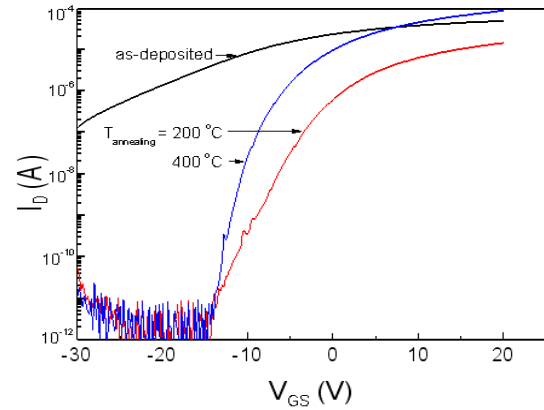


Fig. 1. Transfer characteristics variation of ZnO-SnO₂ TTFTs with annealing temperature.

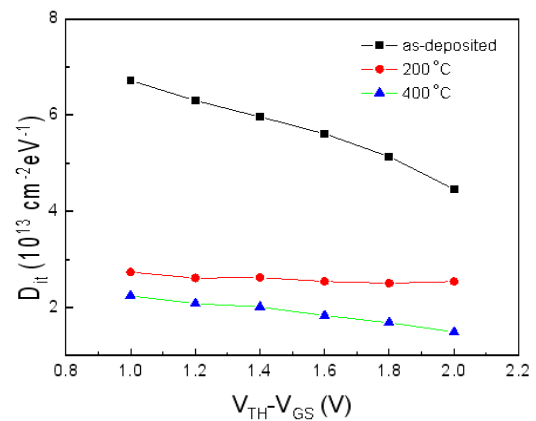


Fig. 2. D_{it} variation of ZnO-SnO₂ TTFTs with annealing temperature.

씌운 후 인듐을 진공증착하여 소스 및 드레인 전극을 만들었다. 제조된 TTFT의 채널 너비는 0.5 mm, 길이는 0.2 및 0.4 mm이었다. Keithley사의 semiconductor parameter analyzer를 사용하여 I_d-V_d 및 I_d-V_g 특성을 측정하고 측정결과로부터 문턱전압 (V_T), 이동도 (μ), 계면상태밀도 (D_{it})를 구하였다. 전달특성의 기울기로부터 μ를 구하였으며 [12], subthreshold slope (SS)로부터 D_{it}를 구하였다 [13].

3. 결과 및 고찰

3.1 ZnO-SnO₂ TTFT에 미치는 열처리 영향

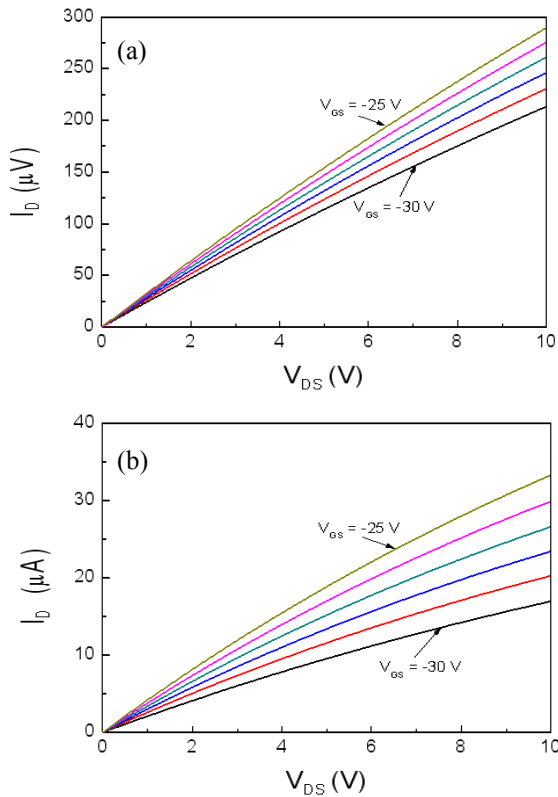


Fig. 3. Output characteristics of ZnO-SnO₂ TTFTs sputtered at F_{Ox}/F_{Ar} of: (a) 5% and (b) 10%.

열처리하지 않은 ZnO-SnO₂막을 활성층으로 제작한 TTFT는 누설전류가 커서 게이트전압에 의한 전계효과가 미약했다. TTFT를 디스플레이의 스위칭 소자로 사용하려면 I_{on}/I_{off}가 10⁶ 이상이 되어야 한다. 따라서 as-deposited ZnO-SnO₂ TTFT의 전계효과를 높이는 방안의 하나로 열처리를 생각했으며, 유리를 기판으로 사용하는 경우를 대비하여 열처리 온도는 400°C 이하로 제한하였다. 스퍼터링한 ZnO-SnO₂막은 400°C 열처리 후에도 비정질 상태를 유지한다 [11]. 그러나 열처리는 막에 존재하는 스트레스를 완화시킴으로써 게이트절연층과 활성층 사이의 계면 특성을 향상시킬 가능성이 있다. 먼저 ZnO-SnO₂막을 70 W로 10분 간 스퍼터링한 후 200°C 및 400°C에서 5분 씩 열처리하였다. 이때 챔버압력은 5 mtorr이었으며, F_{Ox}/F_{Ar}은 30%였다. 열처리한 ZnO-SnO₂막 위에 인듐으로 소스 및 드레인 전극을 입혔다. 그림 1은 ZnO-SnO₂ TTFT의 열처리온도에 따른 I_D-V_{GS} 특성을 나타낸 것이다. 200°C 열처리에 의해 전달특성이 향상되었으

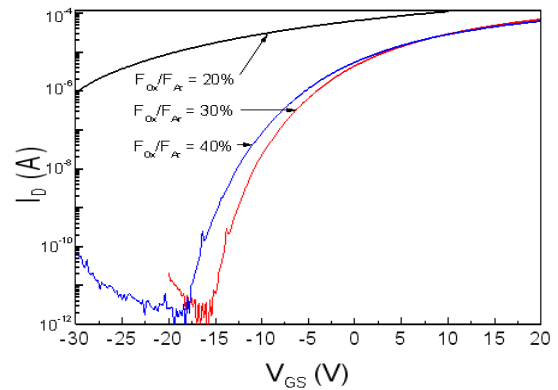


Fig. 4. Transfer characteristics of ZnO-SnO₂ TTFTs sputtered at F_{Ox}/F_{Ar} of 20%, 30% and 40%.

며, 400°C 열처리하는 TTFT의 I_{on}/I_{off} 뿐만 아니라 SS도 크게 증가시킴을 알 수 있다. 그림 2에 TTFT의 전달특성으로부터 구한 D_{it}를 나타내었다. 열처리에 의해 D_{it}가 감소하는 것을 확인하였다.

3.2 산소분압에 따른 ZnO-SnO₂ TTFT의 특성 변화

순수 아르곤만 방전시켜서 스퍼터링한 ZnO-SnO₂막은 반도체로서는 저항률이 너무 낮다. 일반적으로 ZnO-SnO₂막은 n-type 반도체의 특성을 갖는데, 이것은 ZnO-SnO₂막에 존재하는 산소 빈자리에 의해 자유전자가 생성되기 때문이다. 따라서 ZnO-SnO₂막을 TTFT의 활성층으로 사용하기 위해서는 산소 빈자리를 감소시켜 막의 저항률을 높여야만 한다. 스퍼터링의 경우, 아르곤에 산소를 첨가하여 방전시키면 증착되는 막의 산소 빈자리를 줄일 수 있다. 그러나 과잉으로 공급된 산소는 오히려 TTFT의 특성을 악화시킬 가능성이 있다. 본 연구에서는 아르곤 유량을 50 sccm으로 고정시키고 산소유량을 변화시키면서 ZnO-SnO₂를 스퍼터링하였다.

ZnO-SnO₂ TTFT는 공핍모드의 동작특성을 나타내었다. F_{Ox}/F_{Ar}= 5%, 10% 및 20%에서 스퍼터링한 ZnO-SnO₂는 저항률이 낮아 TTFT의 게이트 전압(V_G)을 -30 V까지 낮춰도 차단 영역이 나타나지 않았다. 그림 3에 F_{Ox}/F_{Ar}= 5% 및 10%에서 증착한 ZnO-SnO₂ TTFT의 출력특성(I_D-V_{DS})을 나타내었다. V_G= -30 V에서도 채널에 많은 전류가 흐르며, 게이트 전압에 의한 전계효과가 미약함을 확인하였다. 그

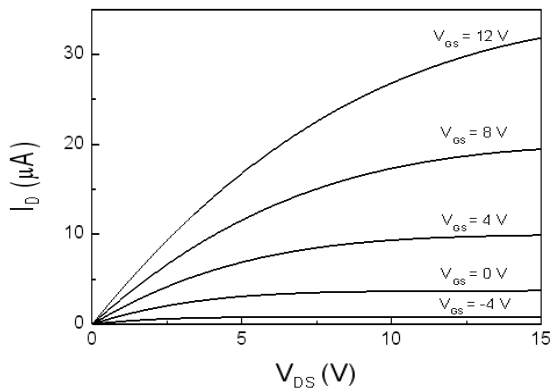


Fig. 5. I_D vs V_{DS} curve of ZnO-SnO₂ TTFTs sputtered at F_{Ox}/F_{Ar} of 30%.

Table 1. Characteristics of ZnO-SnO₂ TTFTs as a function of F_{Ox}/F_{Ar} .

F_{Ox}/F_{Ar} (%)	L (mm)	μ (cm ² /V sec)	I_{on}/I_{off}	D_{it} (cm ⁻² eV ⁻¹)	V_T (V)	SS (V/decade)
20	0.2	5	100	1×10^{13}	un- defined	
	0.4	6	100	1×10^{13}	un- defined	
30	0.2	10.7	$<10^7$	8×10^{12}	-11	1.2
	0.4	10	$<10^7$	6×10^{12}	-4	1.2
40	0.2	8	$<10^7$	8×10^{12}	-10	1.0
	0.4	8.6	$<10^7$	7×10^{12}	-8	0.86

림 4는 가스 유량비 (F_{Ox}/F_{Ar})에 따른 ZnO-SnO₂ TTFT의 전달특성을 나타낸 것이다. F_{Ox}/F_{Ar} = 30%에서 증착한 ZnO-SnO₂ TTFT의 경우에는 게이트 전압 -15 V 이하에서 수 pA 정도의 누설전류만 관측되는 차단특성을 나타내었다. F_{Ox}/F_{Ar} = 40%에서 증착한 ZnO-SnO₂ TTFT는 F_{Ox}/F_{Ar} = 30%의 경우와 비교하여 큰 차이를 나타내지 않았으며, 이동도는 오히려 10~20% 정도 감소하였다. 표 1에 F_{Ox}/F_{Ar} 변화에 따른 ZnO-SnO₂ TTFT의 μ , I_{on}/I_{off} , D_{it} , V_T , SS를 요약하였다. 측정 결과로 볼 때 F_{Ox}/F_{Ar} = 30% 이상의 산소 주입은 ZnO-SnO₂ TTFT의 특성에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. F_{Ox}/F_{Ar} = 30%로 증착한 ZnO-SnO₂막을 활성층으로 사용하여 μ = 10 cm²/V sec, I_{on}/I_{off} $\geq 10^7$ 의 스위칭 소자로써 양호한 TTFT

를 제조할 수 있었다. D_{it} 는 6×10^{12} cm⁻² eV⁻¹으로 F_{Ox}/F_{Ar} 에 관계없이 비슷하였다. 이 결과로부터 게이트 절연층과 반도체 층 사이의 계면특성은 주로 게이트 절연막에 의해 결정되는 것으로 판단하였다. 채널 길이 (L)는 0.2 mm와 0.4 mm였다. V_T 의 이동 외에는 채널길이에 따른 TTFT 특성의 일관성있는 변화는 나타나지 않았다. L이 감소함에 따라 V_T 가 음의 방향으로 이동하였다. 채널에 따른 V_T 의 이동은 측정상의 문제로 이해하고 있다. 공핍모드로 동작하는 TTFT의 경우 MOSFET에 비해 출력특성에서 활성영역이 명확하게 정의되지 않는다. 즉 활성영역에서도 드레인 전압의 증가에 따라 드레인 전류가 지속적으로 증가한다. 따라서 전달특성으로부터 V_T 를 구할 때, 인가하는 드레인 전압에 따라 V_T 가 달라질 수 있다. 이런 현상은 L이 짧아지면 더욱 두드러지게 나타난다. 본 실험에서는 L에 관계없이 드레인 전압을 15 V로 고정하고 전달특성을 측정하였다. 고정시킨 드레인 전압이 L에 따른 V_T 이동의 원인 중 하나로 사료된다. 그림 4에 F_{Ox}/F_{Ar} = 30%에서 증착한 ZnO-SnO₂ TTFT의 I_D - V_{DS} 특성곡선을 나타내었다.

4. 결론

ZnO-SnO₂막이 활성층인 TTFT를 제작하였다. 100 nm 두께의 습식산화된 SiO₂ 위에 PECVD로 100 nm의 Si₃N₄막을 기른 후 TTFT의 게이트 절연막으로 사용하였다. ZnO-SnO₂막은 Zn와 Sn의 원자비가 2:1인 ZnO-SnO₂ 타겟을 rf magnetron sputtering하여 증착하였다. 소스 및 드레인 전극을 입히기 전에 ZnO-SnO₂막을 200°C 및 400°C에서 5분 간 열처리하였다. 400°C 열처리에 의해 TTFT의 μ 와 I_{on}/I_{off} 가 큰 폭으로 증가하였다. 산소유량에 따른 ZnO-SnO₂ TTFT의 특성변화를 조사하였다. F_{Ox}/F_{Ar} = 30%에서 증착된 ZnO-SnO₂막을 활성층으로 사용하여 μ = 10 cm²/V sec, I_{on}/I_{off} $\geq 10^7$ 의 우수한 TTFT를 제조하였다. F_{Ox}/F_{Ar} = 40%에서 증착한 ZnO-SnO₂ TTFT는 F_{Ox}/F_{Ar} = 30%의 경우와 비교하여 큰 차이를 나타내지 않았다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2010-0007697).

REFERENCES

- [1] H. Q. Chiang, J. F. Wager, R. L. Hoffman, J. Jeong, and D. A. Keszler, *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 013503 (2005).
- [2] S. H. Bang, S. J. Lee, J. H. Park, S. Y. Park, Y. B. Ko, C. H. Choi, H. J. Chang, H. H. Park, and H. T. Jeon, *Thin Solid Films*, **519**, 8109 (2011).
- [3] D. C. Paine, B. Yaglioglu, Z. Beiley, and S. H. Lee, *Thin Solid Films*, **516**, 5894 (2008).
- [4] Y. J. Cho, J. H. Shin, S. M. Bobade, Y. B. Kim, and D. K. Choi, *Thin Solid Films*, **517**, 4115 (2009).
- [5] Z. Yuan, X. Zhu, X. Wang, X. Cai, B. Zhang, D. Qiu, and H. Wu, *Thin Solis Films*, **519**, 3254 (2011).
- [6] A. Dey, D. R. Allee, and L. T. Clark, *Solid State Electron*, **62**, 19 (2011).
- [7] K. Nomura, H. Ohta, K. Ueda, T. Kamiya, M. Hirano, and H. Hosono, *Science*, **300**, 1269 (2003).
- [8] J. S. Park, K. S. Kim, Y. G. Park, Y. G. Mo, H. D. Kim, and J. K. Jeong, *Adv. Mater.*, **21**, 329 (2009).
- [9] A. Suresh and J. F. Mutha, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 033502 (2008).
- [10] D. H. Cho, S. H. Yang, C. W. Byun, M. K. Ryu, S. H. Ko Park, C. S. Hwang, S. M. Yoon, and H. Y. Chu, *IEEE Electron Device Lett.*, **31**, 48 (2009).
- [11] K. C. Park and T. Y. Ma, *J. KIEEME*, **24**, 641 (2011).
- [12] D. K. Schroder, *Semiconductor Material and Device Characterization* (A Wiley-Interscience publication, 1990) p. 231.
- [13] D. K. Schroder, *Semiconductor Material and Device Characterization* (A Wiley-Interscience publication, 1990) p. 285.