

수소화된 산화아연을 이용한 박막 트랜지스터의 제작 및 열처리 효과

이상혁*, 김 원*, 엄현석*, 박진석*
 한양대학교 전자전기제어계측공학과*

Characterization of thin film transistors using hydrogenated ZnO films and effects of thermal annealing

Sang-Hyuk Lee*, Won Kim*, Hyun-Seok Uhm*, Jin-Seok Park*

Dept. of Electronic, Electrical, Control and Instrumentation Engineering, Hanyang University*

Abstract - Effects of thermal annealing on electrical characteristics of thin film transistors (TFTs) using hydrogenated zinc oxide (ZnO:H) films as active channel were extensively investigated. The ZnO:H films were deposited at room temperature by RF sputtering. The device parameters of the ZnO:H-based TFTs, such as threshold voltage (V_{th}), subthreshold swing (S.S.), and on-off current ratio (I_{on}/I_{off}), were characterized in terms of the annealing temperature as well as the gas flow ratio of H_2/Ar .

1. 서 론

현재 LCD(liquid crystal display) 및 OLED(organic light emitting diode)의 구동소자로 사용되고 있는 박막 트랜지스터(thin film transistor, TFT)의 활성층(active layer)은 주로 수소화된 비정질 실리콘(hydrogenated amorphous silicon, a-Si:H) 박막이 가장 널리 사용되고 있다. 그러나, a-Si:H은 구조적 결함에 의해 전자 이동도가 낮고($<1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$), 온도 및 빛에 매우 민감하며, 장시간 구동시 문턱 전압(threshold voltage)의 이동에 따른 특성의 불안정성 등의 단점을 가지고 있다. 상기한 a-Si:H에 비하여 산화아연(zinc oxide, ZnO)은 가시광선 영역에서의 광투과율이 높고, 전자 이동도가 10배 이상 높기 때문에, a-Si:H을 대체할 TFT의 활성층 물질로서 뿐 아니라 특히 투명(transparent) 및 플렉서블(flexible) 디스플레이에 많은 응용이 기대되는 바, 최근에는 이러한 ZnO 및 ZnO 기반의 다양한 박막들에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-4]. ZnO은 다양한 방법에 의하여 박막 증착이 가능하지만, 상용화 측면에서 증착 속도가 높고 장치의 구성이 비교적 간단하고 대면적이 가능한 스퍼터링(sputtering) 방법이 가장 널리 사용되고 있다. ZnO가 TFT의 활성층 재료로 사용하기 위해서는 적절한 비저항이 확보되어야 하는데 일반적으로 스퍼터링에 의해 증착된 ZnO 박막은 비저항이 너무 높다. 이를 해결하기 위하여 Al, Ga 등과 같은 금속 원자의 도핑(doping)에 의해 적절한 전기적 비저항을 확보하려는 연구가 진행되고 있다[5-6]. 또한 수소가 ZnO 박막내에서 n형 도핑 효과를 나타낸다는 연구 결과가 발표됨에 따라서, 수소를 이용하여 ZnO의 전기적 물성을 조절하려는 연구가 진행되고 있다[7].

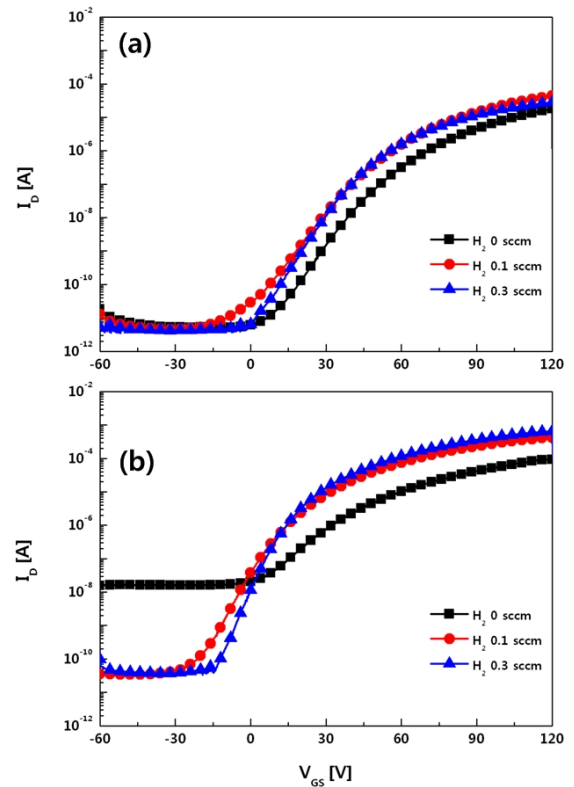
본 연구에서는 스퍼터링(sputtering) 방법을 이용한 ZnO 박막 증착 시 첨가 가스로 수소(H_2) 가스를 사용하여 수소화된 ZnO:H 박막을 제작하고, 수소 가스의 첨가량 및 열처리에 따른 박막의 구조적, 광학적 물성 변화를 분석하였다. 또한, ZnO:H 박막을 활성층으로 사용한 TFT를 제작하고, ZnO:H 박막의 열처리에 따른 소자의 전기적 특성 변화를 체계적으로 분석하였다.

2. 실 험

TFT의 활성층으로 사용된 ZnO:H 박막은 RF(radio frequency, 13.56 MHz) 마그네트론(magnetron) 스퍼터링 방법에 의해 유리(corning 1737) 및 저저항($2 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}$) 실리콘 기판위에 증착하였다. ZnO:H 박막의 주요 증착 조건으로서 power는 50 W, 증착시 압력은 5 mTorr, 기판 온도는 상온, Ar 유입량은 30 sccm으로 각각 고정하였고, 수소 가스는 0 - 0.3 sccm 정도의 미세한 범위로 첨가하였다. ZnO:H 박막의 두께는 surface profiler(SLOAN Technology, DEKTAK3)를 이용하여 측정하였다. TFT 소자의 제작을 위하여 열증착(thermally evaporated)된 $\text{SiO}_2(300\text{nm}, \text{Gate Oxide})/n^+-\text{Si}(\text{Gate})$ 기판 위에 ZnO:H 활성층 박막을 50nm 두께로 증착하고, 사진식각(photolithography) 공정에 의해 패턴을 형성하고, Al 전극(200nm, Source/Drain)을 DC 스퍼터링 방식으로 증착시킨 후 lift-off 방법을 수행하였다. 제작된 TFT 소자를 10^{-5} Torr 진공 및 100-500 °C 온도에서 1시간 동안 열처리를 수행한후, 반도체 파라미터 분석기(semiconductor parameter analyzer, Keithley 4200)를 사용하여 전이(transfer) 및 출력(output) 특성을 측정하고, 문턱전압(V_{th}), subthreshold swing(S.S.) 및 전류점비(I_{on}/I_{off}) 등을 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 수소 유량별 ZnO:H TFT의 열처리를 수행하기 전과 후의 전이 특성을 비교한 그림이다. 그림 1의 (a)는 열처리를 수행하기 전의 전이 특성을 나타낸 그림이다. 수소를 첨가하지 않은 경우에 비하여 미량의 수소(0.1 sccm, 0.3 sccm)를 첨가하게 되면 문턱 전압이 음의 방향으로 약 17V 이동하는 것을 확인 할 수 있다. 또한, 수소를 첨가하지 않았을 경우 I_{on}/I_{off} 가 약 9.65×10^5 이었으나, 0.1 sccm 및 0.3 sccm 수소를 첨가하면 on-current가 증가하여 I_{on}/I_{off} 가 크게 증가하였음을 표 1에서 확인할 수 있다.



<그림 1> 열처리 전후 ZnO:H TFT의 전이 특성 변화 (a) 열처리 이전, (b) 300 °C 열처리 후

<표 1> 열처리에 따른 ZnO:H TFT의 전기적 특성 파라미터의 변화 (before: as-fabricated, after: thermal-annealed)

H_2 [sccm]	V_{th} [V]		I_{on}/I_{off}		S.S. [V/decade]	
	before	after	before	after	before	after
0	55.4	33.2	9.65×10^5	5.76×10^3	7.11	9.02
0.1	46.8	20.7	3.48×10^6	9.64×10^6	6.70	4.96
0.3	42.5	20.5	5.70×10^6	1.73×10^7	5.12	4.90

일반적으로 ZnO 구조 내에서 수소 원자는 H로 이온화 하지 않고, H⁺이온 상태로 존재하는 것으로 알려져 있다[7]. 또한, 수소는 ZnO 구조 내에서 다중심 결합(multicenter bonds)을 형성하려는 경향 때문에 산소 공공(oxygen vacancy) 및 Zn-O 결합 사이에 수소가 결합을 형성하게 된다. 따라서 수소 원자가 ZnO 박막에서 shallow donor로 작용하기 때문에, 수소 첨가량의 유량이 증가함에 따라 n형 도핑 효과가 발생하여 박막의 비저항이 낮아지게 된다. ZnO와 같은 산화물 박막을 이용하는 TFT에서 활성층에 요구되는 전기적 비저항의 범위는 약 10³-10⁴Ωcm 정도로 알려져 있다[8]. 즉, 그림 1의 (a)에서 수소가 첨가되지 않은 ZnO 박막을 사용한 TFT의 경우에는 활성층의 비저항이 10⁶Ωcm로 너무 높았던 것에 비하여 수소 가스가 0.3 sccm 이하로 미세한 양을 첨가한 경우에는, 비저항이 활성층으로 사용하기에 적절한 값으로 감소되어 비교적 양호한 TFT 특성을 보인 것으로 사료된다.

그림 1의 (b)는 약 300°C로 열처리를 수행한 TFT의 전이 특성을 나타낸 그림이다. 수소를 첨가하지 않은 TFT는 on-current의 상승에 비해서 off-current가 급격히 높아진 결과를 나타내었다. ZnO 박막에 대해 열처리를 수행할 경우 다결정질 구조를 나타내는 것으로 알려져 있는 바[9], 열처리를 수행하지 않은 비정질 상태의 ZnO 박막이 열처리 온도가 상승함에 따라 다결정질 구조를 형성하게 되고, 비저항이 낮아져 전도체의 특성을 보이면서 off-current의 변화가 발생한 것으로 사료된다. ZnO:H 역시 열처리 온도가 상승함에 따라 입자 크기(grain size)가 커지면서 서서히 다결정질 구조를 보이는 것으로 판단된다.

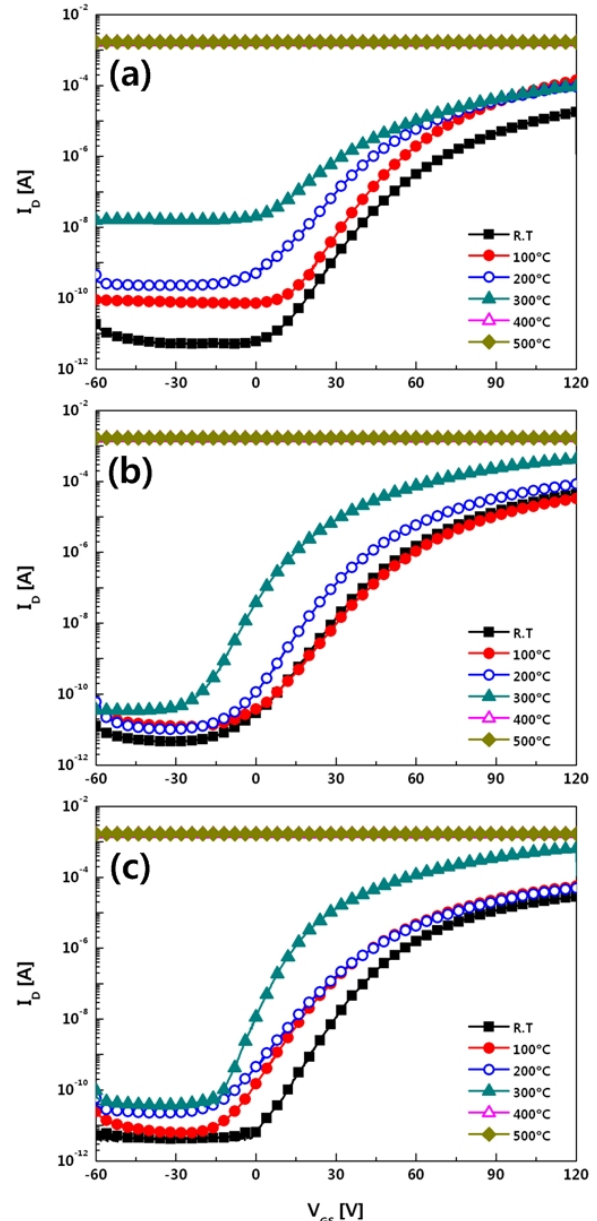
그러나 수소 원자가 Zn 및 O 원자와 결합을 형성하면서 격자 내부에서 relaxation을 일으키게 되고, 상대적으로 온도 변화에 따른 결정 구조의 변화가 적기 때문에 TFT의 특성 변화가 억제된 것으로 사료된다. 수소를 첨가한 TFT는 첨가하지 않은 TFT에 비해 같은 온도에서 전류 접밀비가 더 높은 현상을 나타내었다. 이는 ZnO:H의 경우, 수소 도핑에 의해 박막 표면의 거칠기가 증가하기 때문에 활성층과 절연층 사이의 계면 특성 저하로 인한 TFT의 전기적 특성 저하가 관찰되었다. 하지만, 열처리를 수행함에 따라 ZnO 활성층의 결정 구조 형성으로 인한 활성층과 절연체 사이의 계면 특성 향상과 수소 도핑 효과로 인해 I_{on}/I_{off} 증가가 나타난 것으로 판단된다[8].

그림 2는 열처리 온도에 따른 TFT의 전이 특성을 나타낸 그림이다. 그림 2의 (a)는 수소를 첨가하지 않은 TFT의 전이 특성을 나타내었다. 열처리 온도가 증가함에 따라 off-current가 급격히 상승하고, 이에 따라 TFT의 전류 접밀비가 낮아지면서 S.S(Subthreshold Swing)가 증가하는 현상을 보였다. 특히, 400°C 이상에서는 TFT의 특성을 보이지 않고 전도체의 특성을 보였다. 이는 400°C 이상에서는 ZnO 박막이 거의 완전한 다결정질 구조를 형성하면서 박막의 비저항이 급격히 낮아지게 되는데, 비저항이 낮아짐에 따라 활성층이 전도체 역할을 하게 되면서 전류가 활성층 표면을 따라 흐르게 되고, 활성층과 절연층 사이의 계면에서 채널이 형성되지 않아 TFT의 특성이 사라지게 된다. 그림 2의 (b)는 수소를 0.1 sccm 첨가한 TFT의 전이 특성을 나타낸 그래프이다. 수소를 첨가하지 않은 샘플과 달리 수소를 첨가한 TFT는 표 1에 나타나 있듯이 300°C 이하에서 off-current가 급격히 상승하지 않고, 전류 접밀비가 커지고, S.S가 낮아지면서 TFT의 특성이 개선되는 모습을 확인할 수 있었다. 하지만 400°C 이상의 온도에서는 전도체 특성을 보이게 된다. 이는 온도가 증가함에 따라 ZnO:H 구조 내에서 수소의 결합이 깨지면서 ZnO의 특성이 나타나는 현상을 확인할 수 있는데, 400°C 이상에서는 광투과율이 급격히 높아지면서 대부분의 수소 결합이 파괴되고, ZnO와 같은 특성을 보이는 것으로 사료된다[10]. 또한, 400°C 이상의 온도에서 XRD peak이 34°에서 34.5°로 이동하는 현상을 확인하였다. 일반적으로 스퍼터링을 통해 증착된 ZnO는 C축 성장을 하는 다결정질 물질로 34.6°에서 (002) peak을 보이는 물질로 알려져 있는바, 400°C 이상의 열처리에서는 ZnO:H 박막이 ZnO 박막과 유사한 결정 구조를 형성하는 것으로 판단된다[11]. 그림 2의 (c) 역시 (b)와 유사한 특성을 보이는 것을 확인할 수 있다. 300°C까지는 on-current 상승에 비해 off-current 상승이 억제되는 현상을 보이고, 400°C 이상에서는 ZnO TFT와 동일한 특성을 보였다. 하지만 수소 도핑 효과로 인해 V_{th}, I_{on}/I_{off}, S.S와 같은 전기적 특성이 수소를 0.1 sccm 첨가한 TFT에 비해 더 향상된 특성을 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 투명 박막 TFT의 활성층으로서 ZnO 박막의 응용이 이상적인 전기적 특성 범위를 얻기 위한 방법으로 스퍼터링 방법에 의한 수소화된 ZnO 박막을 사용하였다. ZnO 박막 증착시 수소 첨가로 인한 구조적 파괴를 향상 시키기 위한 방법으로 열처리를 수행할 경우, ZnO:H 박막의 구조적, 광학적 변화를 분석하였고, TFT의 전기적 특성을 관찰하였다.

열처리를 수행함에 따라 ZnO:H 박막의 구조적, 광학적 특성이 향상되는 현상을 관찰 하였는데, 이는 ZnO:H 박막의 수소 결합이 끊어지고, 다결정질을 나타내면서 보여지는 현상이라 사료된다. TFT의 전기적 특성은 수소를 첨가한 TFT가 수소를 첨가하지 않은 TFT에 비해 열처리에 대한 저항력이 강한 것으로 나타났으며, 300°C까지는 ZnO:H TFT의 전기적 특성이 향상되는 결과를 관찰할 수 있었다.



<그림 2> 열처리 온도에 따른 ZnO:H TFT의 전이특성 변화
(a) H₂=0 sccm, (b) H₂=0.1 sccm, (c) H₂=0.3 sccm

[참 고 문 헌]

- [1] R. L. Hoffman, et. al., Appl. Phys. Lett., 82, 733, 2003
- [2] P. F. Garcia, et. al., Appl. Phys. Lett., 82, 1117, 2003
- [3] E. M. C. Fortunato, et. al., Adv. Mater., 17, 590, 2005
- [4] C. Y. Lee, et. al., Semicond. Sci. Technol., 25, 105008, 2010
- [5] K. Jang, et. al., Thin Solid Films, 518, 2808, 2010
- [6] W. J. Park, et. al., Appl. Phys. Lett., 93, 08350, 2008
- [7] C. G. Van De Walle, Phys. Rev. Lett., 85, 1012, 2000
- [8] J. H. Na, et. al., Appl. Phys. Lett., 93, 063501, 2008
- [9] Z. B. Fang, et. al., Appl. Surf. Sci., 241, 303, 2005
- [10] K. Ip, et. al., Appl. Phys. Lett., 82, 3, 2003
- [11] K. Ogata, et. al., J. Cryst. Growth, 214/215, 312, 2000