

InGaZnO 기반의 박막형 능동소자 제작을 위한 고품위 Ga:ZnO/Ag/Ga:ZnO 투명전극의 Source/Drain 특성 평가

*최광혁¹, #김한기¹

*Kwang-Hyuk Choi¹ and #Han-Ki Kim¹(imdlhkkim@khu.ac.kr)

¹경희대학교 정보전자 신소재 공학과

Key words : Oxide Thin Film Transistor, Indium Zinc Gallium Oxide, Oxide Semiconductors, Source/Drain Contacts

1. 서론

비정질 *a*-InGaZnO (*a*-IGZO) 기반의 능동소자(TFT)는 빠른 field effect mobility, 낮은 subthreshold swing (S.S), 저온 공정, 가시광선에서의 높은 광투과율 등의 특성으로 인해 차세대 투명 디스플레이 산업에 그 중요성이 날이 갈수록 증대되고 있다. 한편 투명능동소자(Transparent Thin Film Transistor:TTFT) 구현을 위한 핵심 기술로써 우수한 전기적 특성의 source/drain (S/D) 형성기술이 필수적이며, 이는 S/D의 전기적 특성이 *a*-IGZO 산화물 트랜지스터의 구동에 절대적인 영향을 주기 때문이다[6]. 때문에 이러한 전기적 특성의 확보를 위한 S/D의 물질로써 낮은 비저항의 Ti/Pt, Mo, Al, Ti/Au 등의 S/D 집합이 일반적으로 적용되고 있으나 금속 S/D 전극 물질의 불투명한 특성으로 인해 투명 디스플레이 구현의 문제점으로 대두되고 있다. 금속 S/D 전극의 광학적 투과성 문제 해결책으로 Indium Tin Oxide(ITO) 또는 Indium Zinc Oxide(IZO) 등으로 대표되는 산화물 기반 투명전극(Transparent Conducting Oxide:TCO)이 대두되고 있지만, 우수한 광투과성에도 불구하고 이러한 TCO들 역시 금속보다 상대적으로 높은 비저항을 갖는다는 또 다른 문제점을 지니고 있다[1314]. 우수한 전기전도성과 가시광선 영역에서의 높은 광투과율 두가지 특성을 모두 만족시킬 수 있는 방법으로 본 연구그룹에서는 Ag 금속에 삽입된 ITO/Ag/ITO, IZO/Ag/IZO, Ga:ZnO(GZO)/Ag/GZO, AZO/Ag/AZO 및 Zn, Sn 도핑된 In₂O₃ (IZTO)/Ag/IZTO 적층구조를 통한 유기발광소자(OLEDs) 및 유기태양전지로(OPVs)의 그 가능성을 보인바 있다[20]. Ag 금속이 삽입된 적층구조의 산화물 전극은 상온에서 성막되었음에도 비저항 값이 5.53×10^{-5} ohm-cm, 그리고 가시광선에서의 투과율 특성이 87.2 % 정도로 우수한 특성을 나타내었으며, 이러한 전기적 광학적 특성은 상층과 하층 사이에 삽입된 Ag 금속에서 산화물 전극으로의 전자의 제공 그리고 광학적 anti-reflection 효과에 의한 결과로 확보될 수 있다[19]. 본 연구에서는 최근 indium 물질이 배제된 저가의 산화물 전극으로써 GaZnO(GZO) 물질을 이용하여 단층구조의 GZO S/D, 그리고 Ag 금속이 삽입된 적층 구조의 GZO/Ag/GZO S/D를 적용함으로써 디바이스에서의 전기적 특성을 확인하여 그 적용 가능성을 타진하였다.

2. 실험방법

GZO(100 nm) 단일층과 GZO(35 nm)/Ag(14 nm)/GZO (35 nm) 적층 구조의 산화물 전극을 dual target DC magnetron sputtering system (RSP 5004, SNTTEK) 을 이용하여 상온에서 성막하였으며 그 특성을 최적화하였다. GZO 투명전극 및 삽입된 금속 Ag의 성막 균일도를 확보하기 위해 sputter system에서의 substrate rotation을 10 rpm으로 설정하였으며, GZO와 Ag 적층 시 계면에서의 외부영향을 최소화하기 위해 기판으로의 온도를 가열 없이 in-situ 공정을 통하여 적층 구조의 GZO/Ag/GZO S/D 전극을 성막하였다. 성막에 적용된 target 물질은 GZO(3wt% Ga doped ZnO) 및 Ag(99.999%: DASOM RMS)을 사용하였으며, 공정 중의 DC power 및 유입가스를 100 W, Ar 20 sccm으로 일정하게 유지시켜 성막공정을 진행하였다. 단일 구조의 GZO 및 적층 구조의 GZO/Ag/GZO 에서의 두께를 정밀하게 형성하기 위해, GZO

와 Ag 각각의 두께 조절은 실측정된 성막율을 근거로하여 각각의 공정 시간 조절에 의해 결정되었다. 적층 구조의 GZO/Ag/GZO 성막은 glass 기판 위 35 nm 두께의 GZO를 우선적으로 성막한 후 14 nm 두께의 Ag를 성막하고 마지막으로 하부에 성막된 GZO 성막 조건 및 두께가 동일하게 상부의 GZO 층을 성막하였다. GZO 단일 구조와 GZO/Ag/GZO 적층 구조의 TFT 디바이스 적용과 S/D 특성 비교를 위해 p-type silicon substrate를 gate로 이용한 *a*-IGZO TFT를 제작하였다. 50 nm 두께의 IGZO(In₂O₃:Ga₂O₃:ZnO=1:1:1 mol %) 산화물 반도체는 동일한 sputter system에서 RF power 100 W, Ar/O₂ 분압비 20/0.4 sccm, 공정 압력 2 mTorr에서 성막되었다.

단일층 구조의 GZO 와 적층 구조의 GZO/Ag/GZO 전극의 두께 측정은 thickness profilometer(Surfcorder ET-3000, Kosaka Lab.)이용하였으며, 성막 된 두 S/D 전극의 전기적, 광학적, 구조적 특성은 Hall measurement (HL5500PC, Accent Optical Technology), UV/visible spectrometer (Agilent 8453, Agilent), X-ray diffraction 을 이용하여 분석하였다. 또한 GZO, GZO/Ag/GZO S/D 전극이 적용된 TFT 소자의 구조 및 전기적 특성을 field emission scanning electron microscope (FESEM: LEO SUPRA 55, GENESIS 2000, Carl Zeiss, EDAX), X-ray photoelectron spectroscopy (K-Alpha, Thermo Electron) depth profiling 그리고 semiconductor parameter analyzer(HP 4156C)를 이용하여 관찰하였다.

3. 결과

표 1 은 단일층 GZO 전극과 적층 구조의 GZO/Ag/GZO S/D 전극의 Hall effect measurement 결과를 나타내고 있다. 금속 Ag 층이 없는 단일 구조의 GZO 전극은 적층 구조의 GZO/Ag/GZO 전극 보다 높은 비저항 값을 나타내고 있는데 이는 Ag에 의한 carrier 제공이 없이 GZO 단일막 자체의 낮은 carrier 농도에 의한 것으로서 일반적으로 알려진 GZO에서의 Ga 도핑에 의한 carrier activation에너지가 높기 때문에 상온공정을 통해 성막된 단일 구조의 GZO에서의 carrier 생성이 어렵기 때문이다 [21]. 반면 적층 구조의 GZO/Ag/GZO 전극의 경우 매우 낮은 면저항 값인 3.948 ohm/square 와 비저항 값 3.316×10^{-5} ohm-cm 나타내고 있는데, 이는 Ga 도판트에 의한 영향 없이 상층과 하층 GZO 사이 삽입된 Ag의 carrier의 영향에 의한 영향으로 해석될 수 있다. [22]. GZO/Ag/GZO 전극의 최종두께, 공정 온도, 면저항 및 비저항 등을 고려해 볼 경우 이는 *a*-IGZO TFT S/D 적용하기에 적합하다는 것을 알 수 있다.

표 1. 단일 구조의 GZO 전극과 적층 구조의 GZO/Ag/GZO 전극의 Hall measurement 측정결과 및 figure of merit value.

Samples	ρ [ohm-cm]	μ [$\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$]	N [cm^{-3}]	Figure of merit [Ohm ⁻¹]
GZO	9.06×10^{-2}	1.57	4.400×10^{19}	1.658×10^{-5}
GZO/Ag/GZO	3.316×10^{-5}	17.2	1.092×10^{22}	5.372×10^{-2}

그림 1 은 단일 구조의 GZO 전극과 적층 구조의 GZO/Ag/GZO 전극의 광투과율 측정 결과이다. GZO/Ag/GZO 전극의 경우 투과성이 없는 금속 Ag 층의 삽입에도 500 nm 파장대에서 단일층 GZO 보다 높은 투과

성을 나타내고 있다. 이는 GZO상부층과 하부층 사이에 Ag층의 적절한 두께 설정에 의한 것으로써, 이때 발생하는 anti-reflection에 의한 투과율 보상이 이루어 지기 때문이다[20]. 550 nm 파장에서 Ag 삽입층의 최적화 두께인 14 nm 설정을 통해 GZO/Ag/GZO 전극의 광투과율 85.64 % 를 확보할 수 있었으며, 가시광선 영역에서의 이러한 높은 광투과율은 TTFT 에서의 S/D 적용에 적합한 광학적 특성을 나타낸다는 것을 의미한다. 단일층 구조의 GZO 전극과 적층구조의 GZO/Ag/GZO 전극의 전기적특성과 광학적 특성을 이용한 figure of merit (T^{10}/R_{sh}) value를 계산한 결과치를 표 1 에 나타내었다. 투과율 결과를 통하여 예상할 수 있듯이 낮은 면저항 값과 높은 광투과율로 인해 단일층 GZO 전극 보다 높은 수치를 나타내는 것을 확인할 수 있다

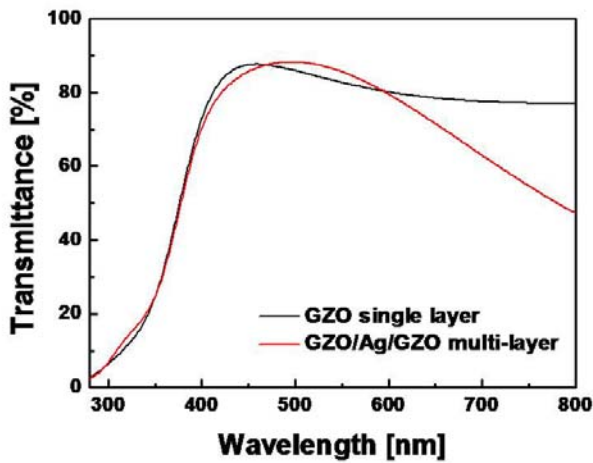


그림 1. 단일층 구조의 GZO 전극과 적층 구조의 GZO/Ag/GZO 전극의 UV/Vis spectrometer 측정결과.

최적화된 GZO전극의 Ag 금속 삽입에 따른 TFT S/D전극 적용가능성 및 그 특성을 분석을 위해 IGZO 산화물 반도체 기반TFT를 제작하였다. 그림 2(a)와 2(b)는 단일층 GZO 전극과 적층 구조의 GZO/Ag/GZO 전극을 S/D으로 적용한 IGZO TFT의 transfer curve 의 전기적 특성을 나타내고 있다. Hall measurement 결과를 통해 예상할 수 있듯이 GZO/Ag/GZO를 S/D로 적용한 IGZO TFT의 on/off current가 GZO를 S/D으로 적용한 IGZO TFT 보다 높게 나타났다. 이는 S/D 전극에서의 저항의 차이에 기인한다는 것을 알 수 있으며 결과를 통하여서 10^4 이상의 current 차이를 나타내는 것을 확인할 수 있다.

두 전극을 이용한 IGZO TFT 에서의 saturation mobility 를 확인하기 위해 아래의 식을 이용하여 계산하였다

$$\mu_{sat} = \frac{2m^2}{W \cdot C_g \cdot L}$$

계산을 통하여 GZO/Ag/GZO S/D 전극을 이용한 a-IGZO TFT 의 경우 $10.2 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 의 saturation mobility를 나타내었으며, 반면 단일층의 GZO를 이용한 a-IGZO TFT의 saturation mobility는 $0.4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 의 낮은 수치를 나타내었다. 또한 current on/off ratio에서도 Ag의 삽입에 의해 $\sim 10^9$ 의 우수한 스위칭 특성을 나타낼 수 있음을 나타내었다.

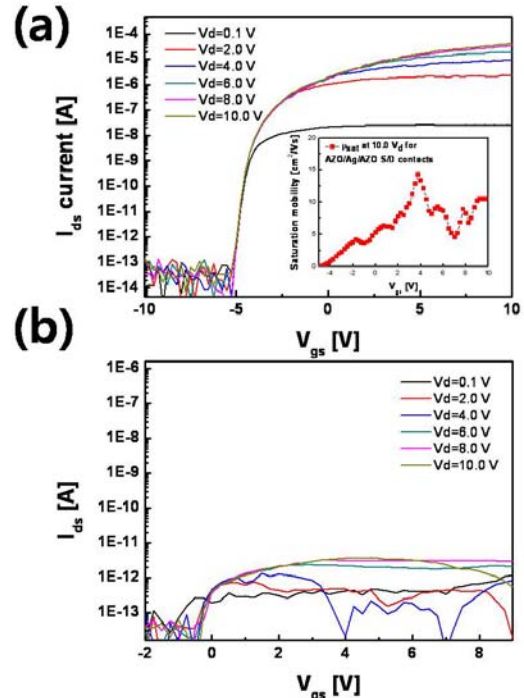


그림 2. 단일층 GZO (a) 전극과 적층 구조의 GZO/Ag/GZO (b)전극을 S/D 으로 적용한 IGZO TFT 의 transfer curve.

4. 결론

실험을 통해 단일층의 GZO 전극과 적층구조의 GZO/Ag/GZO 전극의 전기적, 광학적, 구조적 특성을 확인 하였으며 이를 a-IGZO TFT에 S/D으로 적용함으로써 소자로의 영향을 확인하였다. 최적화된 Ag층의 삽입으로 인해 85 % 이상의 광투과율을 확보함과 동시에 $3.316 \times 10^5 \text{ ohm-cm}$ 의 낮은 비저항 값의 GZO/Ag/GZO 전극을 형성할 수 있었으며, a-IGZO TFT S/D 적용을 통해 $10.2 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, I_{on}/I_{off} ratio $\sim 10^9$ 의 우수한 소자 특성을 확보할 수 있었다. 결과를 통해 GZO 전극에서의 Ag 삽입층은 낮은 비저항과 높은 광투과성을 가능하게 할 뿐아니라 고품위 TTFT 소자에서의 전기적 특성에 영향을 줄 수 있는 핵심적인 요소임을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. J. Park, C. Kim, S. Kim, I. Song, S. Kim, D. Kang, H. Lim, H. Yin, R. Jung, E. Lee, J. Lee, K. -W. Kwon and Y. Park "Source/drain series resistance effects in amorphous gallium indium zinc oxide thin film transistors" IEEE Trans. Electron Devices Lett. **29**, 879, 2008.
2. H. Q. Chiang, B. R. McFarlane, D. Hong, R. E. Presley and J. F. Wager "Processing effects of the stability of amorphous indium gallium zinc oxide thin film transistors" J. Non-Crystalline Solids **354**, 2826, 2008
3. J. H. Jeong, H. W. Yang, J. -S. Park, J. K. Jeong, Y. -G., Kim H D, J. Song and C. S. Hwang "Origin of subthreshold swing improvement in amorphous indium gallium zinc oxide transistors" Electrochem. Solid-State Lett. **11**, H157, 2008
4. K. -H. Choi, H. -J. Nam, J. -A. Jeong, S. -W. Cho, H. -K. Kim, J. -W. Kang, D. -G. Kim and W. -J. Cho "Highly flexible and transparent InZnSnOx/Ag/InZnSnOx multilayer electrode for flexible organic light emitting diodes" Appl. Phys. Lett. **92**, 223302, 2008