논문 2011-48SD-6-1

Co-sputtered HfO_2-Al_2O_3을 게이트 절연막으로 적용한 IZO 기반 Oxide-TFT 소자의 성능 향상

(Enhanced Device Performance of IZO-based oxide-TFTs with Co-sputtered HfO_2-Al_2O_3 Gate Dielectrics)

손 희 근*, 양 정 일*, 조 동 규*, 우 상 현*, 이 동 희*, 이 문 석**

(Heegeon Son, Jungil Yang, Dongkyu Cho, Sanghyun Woo, Donghee Lee, and Moonsuk Yi)

요 약

투명 산화물 반도체 (Transparent Oxide-TFT)를 활성층과 소스/드레인, 게이트 전극층으로 동시에 사용한 비결정 indium zinc oxide (a-IZO), 절연층으로 co-sputtered HfO_2-Al_2O_3 (HfAlO)을 적용하여 실온에서 RF-magnetron 스퍼터 공정에 의해 제작하였다. TFT의 게이트 절연막으로써 HfO_2 는 그 높은 유전상수 (>20)에도 불구하고 미세결정구조와 작은 에너지 밴드 갭 (5.31eV) 으로 부터 기인한 거친 계면특성, 높은 누설전류의 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는, 어떠한 추가적인 열처리 공정 없이 co-sputtering에 의해 HfO_2와 Al_2O_3를 동시에 증착함으로써 구조적, 전기적 특성이 TFT 의 절연막으로 더욱 적합하게 향상되어진 HfO_2 박막의 변화를 x-ray diffraction (XRD), atomic force microscopy (AFM) and spectroscopic ellipsometer (SE)를 통해 분석하였다. XRD 분석은 기존 HfO_2 의 미세결정 구조가 Al_2O_3와의 co-sputter에 의해 비결정 구조로 변한 것을 확인 시켜 주었고, AFM 분석을 통해 HfO_2 의 표면 거칠기를 비교할 수 있는 RMS 값이 2.979 nm 인 것에 반해 HfAlO의 경우 0.490 nm로 향상된 것을 확인하였다. 또한 SE 분석을 통해 HfO_2 의 에너지 밴드 갭 5.17 eV 이 HfAlO 의 에너지 밴드 갭 5.42 eV 로 향상 되어진 것을 알 수 있었다. 자유 전자 농도와 그에 따른 비저항도를 적절하게 조절한 활성층/전극층 으로써의 IZO 물질과 게이트 절연층으로써 co-sputtered HfAlO를 적용하여 제작한 Oxide-TFT 의 전기적 특성은 이동도 10cm^2/V·s 이상, 문턱전압 2 V 이하, 전류점멸비 10^5 이상, 최대 전류량 2 mA 이상을 보여주었다.

Abstract

A transparent oxide thin film transistors (Transparent Oxide-TFT) have been fabricated by RF magnetron sputtering at room temperature using amorphous indium zinc oxide (a-IZO) as both of active channel and source/drain, gate electrodes and co-sputtered HfO_2-Al_2O_3 (HfAlO) as gate dielectric. In spite of its high dielectric constant (>20), HfO_2 has some drawbacks including high leakage current and rough surface morphologies originated from small energy band gap (5.31eV) and microcrystalline structure. In this work, the incorporation of Al_2O_3 into HfO_2 was obtained by co-sputtering of HfO_2 and Al_2O_3 without any intentional substrate heating and its structural and electrical properties were investigated by x-ray diffraction (XRD), atomic force microscopy (AFM) and spectroscopic ellipsometer (SE) analyses. The XRD studies confirmed that the microcrystalline structures of HfO_2 were transformed to amorphous structures of HfAlO. By AFM analysis, HfAlO films (0.490nm) were considerably smoother than HfO_2 films (2.979nm) due to their amorphous structure. The energy band gap (E_g) deduced by spectroscopic ellipsometer was increased from 5.17eV (HfO_2) to 5.42eV (HfAlO). The electrical performances of TFTs which are made of well-controlled active/electrode IZO materials and co-sputtered HfAlO dielectric material, exhibited a field effect mobility of more than 10cm^2/V·s, a threshold voltage of ~2 V, an $I_{on/off}$ ratio of >10^5, and a max on-current of >2 mA.

Keywords : Oxide TFT, IZO, HfO2, HfAlO, Transparent TFT

* 학생회원, ** 정회원, 부산대학교
(School of Electrical Engineering, Pusan National University)
접수일자: 2010년12월29일, 수정완료일: 2011년6월1일

Ⅰ. 서 론

최근 전통적인 Si 기반 TFT에 비해 두드러진 전기

적 특성을 가지는 산화물 반도체 (Semiconductor Oxides)를 적용한 투명 박막 트랜지스터 (Transparent-TFT)가 많은 관심을 받고 있다. 특히 ZnO, ZTO, IZO, IGZO와 같은 ZnO 기반 산화물 반도체는 높은 전자의 이동도 (>10 $cm^2/V \cdot s$), 가시영역에서의 투명성, 소자 안정성에서 좋은 재료적 특성을 가지는데, 이 들을 적용하여 제작한 Oxide-TFT 는 대면적 소자에 적용 가능한 전통적인 물리적 증착방식, 즉 실온의 스퍼터 공정에서도 좋은 특성을 유지한다.[1~5] 이에 이들 산화물 반도체의 Disply 혹은 여타 광소자로 적용하리라는 가능성이 이제는 점차 현실화 되고 있는 시점인 것이다.

대부분 산화물 박막트랜지스터의 게이트 절연막으로 쓰이는 SiO_2, Si_3N_4 는 다른 고유전 절연체에 비해 낮은 유전상수를 가져 그에 따른 소자의 전력소비도 더 많다.[6~7] 이에 비해 고유전 절연체를 게이트 절연막으로 적용한 산화물 박막트랜지스터의 경우 더 얇은 절연 박막의 두께에서도 낮은 구동전압을 가져 소비전력을 줄여줄 뿐 아니라 다른 산화물 반도체와 마찬가지로 상온의 스퍼터 공정으로 증착이 가능해 Oxide-TFT의 투명성과 유연 기판 적용 특성을 유지시킬 수 있다.[8~9]

현재 다양한 분야에서 활발히 연구되고 있는 hafnium oxide (HfO_2) 는 첫째, 높은 유전 상수 (>20), 둘째, 양의 band off-set을 만들어 주는 ZnO 기반 반도체보다 넓은 에너지 갭 (>5 eV) 셋째, 가시영역에서의 투명한 재료적 특성으로 다른 고유전 절연체 중에서도 Oxide-TFT의 게이트 절연막으로 가장 주목받는 물질이다.[10~11] 한편 최근 연구에 따르면 HfO_2를 Al_2O_3와 함께 Co-sputtering 으로 동시에 증착할 경우, 기존 HfO_2의 결정구조를 비결정 구조로 바꿀 수 있을 뿐 아니라 기존 HfO_2의 에너지 밴드 갭 또한 더 커질 수 있다고 하였는데[12~13], 이를 Oxide-TFT의 게이트 절연막으로 적용 시 소자의 성능을 향상 시킬 수 있을 거라 기대된다.

본 연구에서는 Co-sputtered HfO_2-Al_2O_3 (이하 HfAlO) 절연막을 제작하여 HfO_2에 비해 향상되어진 물질의 구조적, 전기적 특성 변화를 몇 가지 분석을 통해 수행한 후, 이를 산소 유량만을 달리해 반도체층, 소스/드레인, 게이트 전극층으로 동시에 사용된 IZO 기반 Oxide-TFT의 게이트 절연막으로 적용, T-TFT 소자의 전기적 특성 변화를 분석하였다.

Ⅱ. 실험 방법

본 연구를 위해 제작된 완전히 투명한 TFT 는 별도의 의도적인 열처리 공정 없이 ITO (Indium Tin Oxide)가 코팅된 유리기판 위에 RF-magnetron sputtering에 의해서만 절연층, 반도체층, 전극층의 각 박막이 증착 되어졌다. 먼저 불필요한 면저항을 최소화하기 위해 전통적인 photo-lithography 공정을 통해 ITO의 원하는 패턴을 형성하였고, 이후 절연층과 반도체층, 소스/드레인, 게이트 전극층이 순차적으로 스퍼터 증착되어졌는데 이 때 반도체층과 소스/드레인, 게이트 전극층은 모두 이원성분계 amorphous In_2O_3-ZnO (a-IZO) 물질로 이루어 졌다. 이는 같은 스퍼터 타겟을 이용해 다른 모든 공정 조건은 같게 유지한 체 산소유량 만을 달리해 a-IZO의 자유캐리어 농도를 조절, 비저항도를 달리해 증착한 것인데 여기서 타겟-기판거리, RF-power, 공정진공도는 각각 6 cm, 50 W, 1 mTorr 로 동일하며 소스/드레인, 게이트 전극층에 대해서는 Ar 가스만을 20 SCCM을 사용한 반면, 반도체층에 대해서는 Ar 가스 20 SCCM을 가해 주면서 O_2 가스 0.8 SCCM을 함께 사용하였다. 측정된 소스/드레인, 게이트 전극층의 a-IZO의 자유 전자 농도는 약 $10^{20}/cm^3$ 이상, 비저항도 10^{-3} $\Omega \cdot$ cm 이하 이고 반도체층 a-IZO의 자유 전자 농도는 약 $10^{18}/cm^3$, 비저항도 1~5 $\Omega \cdot$ cm 였다.

게이트 절연막으로 쓰인 HfO_2 는 구조적, 전기적 특성 변화를 분석하기 위해 세 가지 조건으로 달리해 각각 증착되어졌다. 먼저 HfO_2 sputtering 증착 시 Ar 가스만을 20 SCCM을 가해줘 절연박막을 증착하였고, 다음으로 Ar 가스 뿐 아니라 O_2 가스를 0.1 SCCM 가해줘 HfO_2 절연막을 증착하였으며 마지막으로 Co-sputtered HfO_2-Al_2O_3 절연막을 증착하였는데, 이 때 HfO_2 타겟의 RF-power 는 75 W, Al_2O_3 타겟의 RF-power 는 50 W, Ar, O_2 가스 유량비는 20 : 0.2 SCCM을 사용하였다. 모든 TFT 각 층의 박막은 shadow-mask를 이용하여 선택적, 그리고 순차적으로 스퍼터 공정에 의해 증착 되어졌으며 제작된 Oxide-TFT의 모식도를 그림 1에 나타내었다.

제작된 HfO_2와 Co-sputtered HfO_2-Al_2O_3 박막의 구조적, 전기적 특성 변화 분석을 위해 XRD (X-ray diffraction), AFM (Atomic force microscopy), SE (Spectroscopic ellipsometer) 분석이 수행 되어졌으며,

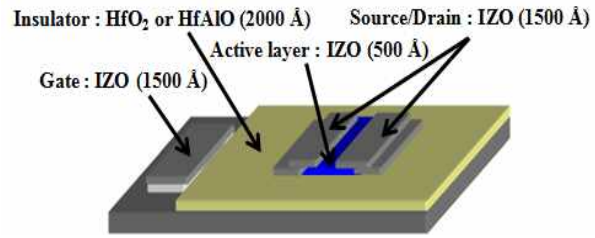


그림 1. 본 연구에 사용되어진 Oxide-TFT 의 구조
Fig. 1. Schematic of Oxide-TFT used in this study.

이 후 마지막으로 반도체 파라미터 분석기를 이용해 앞에서 언급된 반도체층, 전극층, 절연층을 적용한 Oxide-TFT의 전기적 특성변화를 분석하였다.

Ⅲ. 본론(결과 및 토의)

1. HfO_2, Co-sputtered HfAlO 박막 특성 분석

일반적으로 HfO_2의 스퍼터 증착 시 가해주는 적절한 O_2 유량은 박막의 형성 시 발생하는 산소 결핍을 보상해주어 O_2 가스를 가해주지 않은 박막에 비해 누설전류를 줄일 수 있으나 또한 너무 많은 O_2 가스 유량은 negative ion bombardment의 영향으로 누설전류를 다시 증가 시킬 수 있다.[14~15] 이에 우리는 순수 Ar 가스만을 스퍼터 반응성 기체로 사용한 HfO_2, 증착 시 Ar : O_2 가스 유량 20 : 0.1 SCCM을 가해줘 증착한 HfO_2, 그리고 Co-sputtered HfO_2-Al_2O_3 박막을 각각 증착하여 그 구조적, 전기적 특성을 비교하였다.

다른 조건으로 증착되어진 HfO_2와 Co-sputtered HfO_2-Al_2O_3 절연막의 결정성 변화를 알아보기 위한 XRD 분석을 그림 2에 나타내었다. 나타난 바와 같이

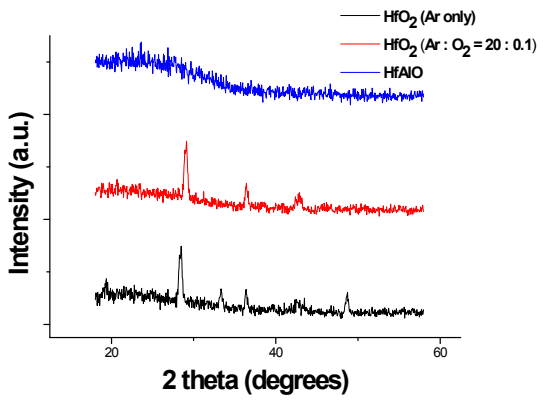


그림 2. HfO_2와 co-sputtered HfO_2-Al_2O_3 의 박막의 XRD 패턴
Fig. 2. XRD patterns of HfO_2 films and co-sputtered HfO_2-Al_2O_3.

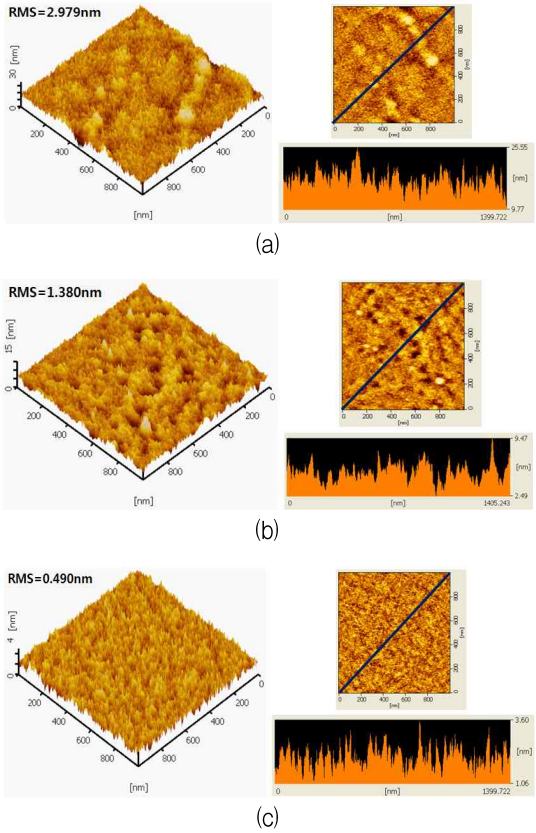
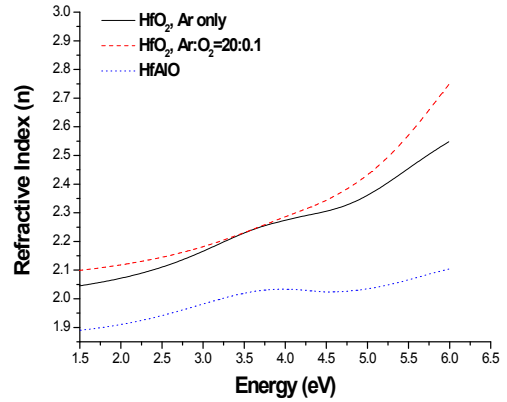


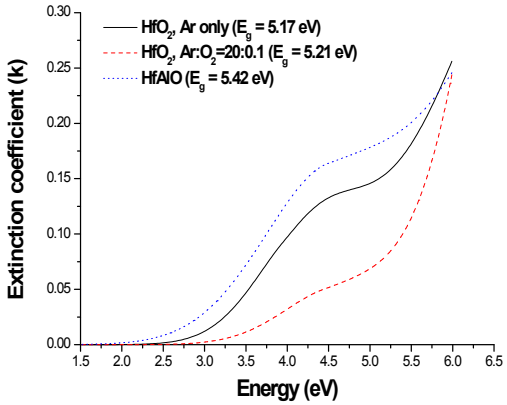
그림 3. AFM 촬영 표면 이미지 (1㎛×1㎛) (a) HfO_2 (Ar gas only) (b) HfO_2 (Ar:O_2=20:0.1) (c) Co-sputtered HfO_2-Al_2O_3
Fig. 3. AFM surface images (a) HfO_2 (Ar gas only) (b) HfO_2 (Ar:O_2=20:0.1) (c) Co-sputtered HfO_2-Al_2O_3.

두 HfO_2 박막 (using Ar gas only, Ar:O_2=20:0.1 SCCM)은 상온의 스퍼터 증착 시 2 theta, 약 28° 에서 강한 peak을 가져 monoclinic 구조의 미세결정 구조임을 알 수 있었던 반면, Co-sputtered HfO_2-Al_2O_3 박막의 경우 비결정 구조로 어떤 각에서도 peak 이 검출되지 않았는데, 이는 Al_2O_3가 HfO_2의 결정화를 막아주었을 거라 생각되어진다.

그림 3은 HfO_2 (a, b), Co-sputtered HfO_2-Al_2O_3 (c) 절연박막의 표면 거칠기 분석을 위한 AFM 촬영 이미지이다. 나타난 바와 같이 Ar 가스만을 이용해 제작한 HfO_2 박막의 RMS (Root Mean Square) 값이 2.979 nm를 갖는 반면 Co-sputtered HfO_2-Al_2O_3 박막의 경우 비결정성 구조를 가지는 만큼 표면 거칠기를 비교할 수 있는 RMS 값이 0.490 nm 만큼 더 낮아진 것을 확인할 수 있었다. 이런 Co-sputtered HfO_2-Al_2O_3의 더 부드러워진 표면 거칠기는 전자의 이동에 영향을 줄 수 있는 절연막과 활성층 사이의 계면 특성을 향상시켜, 결과적



(a)



(b)

그림 4. SE 분석을 통한 파장 (에너지 갭) 에 따른 굴절율 (a), 소광계수 (b) 의 그래프, 그래프 (b) 에 SE 분석에 의해 구해진 에너지 밴드 갭 표기

Fig. 4. (a) Refractive index and (b) extinction coefficient obtained from SE simulation, In (b) present the energy band gap (Eg) values determined by SE

으로 TFT 특성에 긍정적인 영향을 미칠 것이다.

그림 4는 HfO_2와 Co-sputtered HfO_2-Al_2O_3 절연막의 에너지 갭 변화를 보여주는 파장 (에너지 갭)에 따른 굴절율 (n) 과 소광계수 (k)의 그래프 (각각 a, b)이다. 분석은 SE (Spectroscopic ellipsometer)를 통해 파장에 따른 ψ-Δ 값의 스펙트럼을 측정 후 tauc-lorentz 함수와 gaussian 함수로 이를 분석하였다. 파장에 따른 k의 값이 0에서 서서히 커지다가 약 5 eV에서 급격히 커지는 부분이 광의 흡수가 일어나는 곳이고, 이를 에너지 밴드 갭으로 봤을 때 순수 Ar 가스만을 사용한 HfO_2의 경우 에너지 밴드 갭이 5.17 eV 로 측정되었고, Co-sputtered HfO_2-Al_2O_3의 경우 5.42 eV 로 0.25 eV 만큼 더 커진 것을 확인할 수 있었다. 이것을 Oxide-TFT의 절연박막으로 적용했을 시, 더 넓어진 절연막의 에너지 밴드 갭은 활성층으로부터의 전자 tunneling 현상을 기존 HfO_2에 비해 효과적으로 막아주어 게이트 누설전류를 더 줄여줄 수 있을 것이다.

2. HfO_2, HfAlO를 게이트 절연막으로 적용한 Oxide-TFT의 전기적 특성 분석

앞서 언급한 활성층, 소스/드레인, 게이트 전극층으로 동시에 이용한 IZO 물질을 기반으로, 전기적, 구조적으로 향상된 성능의 HfO_2 절연막을 적용한 Oxide-TFT를 제작해 그 전기적 특성을 비교, 분석 하였다. 그림 5는 V_{DS} = 5 V에서 V_G를 -1 ~ 6 V 로 증가 시키며 측정한 Log-scale I_{DS} 그래프이다. Ar 가스만을 이용한 HfO_2 절연막 TFT의 경우 Off-current : 8.2 X 10^{-8} A, On-current : 2.2 X 10^{-4} A 로 전류점멸비 2.68 X 10^3를 나타내었고, 적절한 산소 유량으로 절연막의 표면 거칠기를 향상 시켜준 HfO_2 적용 TFT의 Off-current : 3.20 X 10^{-8} A, On-current : 2.0 X 10^{-4} A 로 전류점멸비 6.21 X 10^3를 나타내었다. Co-sputtered HfAlO 절연막 적용 TFT는 Off-current : 7.41 X 10^{-9} A, On-current : 2.23 X 10^{-3} A 로 전류점멸비 3.0 X 10^5를 나타내었는데 Ar 가스만을 적용한 HfO_2 절연막의 전류점멸비에 비해 약 10^2 만큼 향상된 것이다. 이는 향상된 표면 거칠기에 의해 최대 전류량이 늘어났을 뿐 아니라 넓어진 에너지 밴드 갭으로 누설전류를 더욱 줄여줘 Off-current 또한 더 작아졌기 때문이다.

최종적으로 구조적, 전기적으로 TFT에 더욱 적합하게 제작되어진 co-sputtered HfO_2-Al_2O_3 절연막을 이용한 IZO 기반 투명 산화물 반도체의 전기적 특성을 반도체 파라미터 분석기를 이용해 분석하였다. 그림 6은

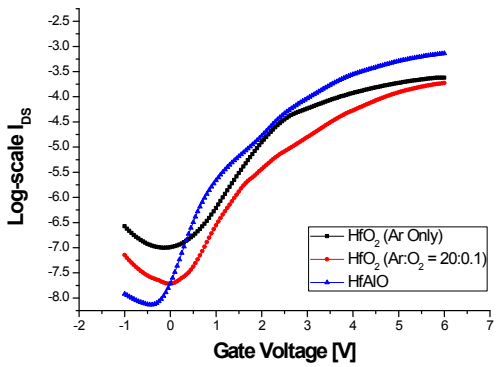


그림 5. HfO_2와 Co-sputtered HfAlO 적용 Oxide-TFT의 전류점멸비 특성

Fig. 5. I_{on-off} current ratio characteristics of Oxide-TFT with HfO_2 and Co-sputtered HfAlO.

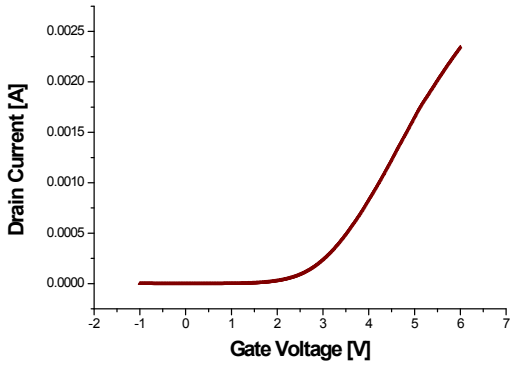


그림 6. HfAlO를 적용한 Oxide-TFT의 V_G-I_{DS} 출력 곡선
Fig. 6. V_G-I_{DS} transfer curve of Oxide-TFT with co-sputtered HfAlO.

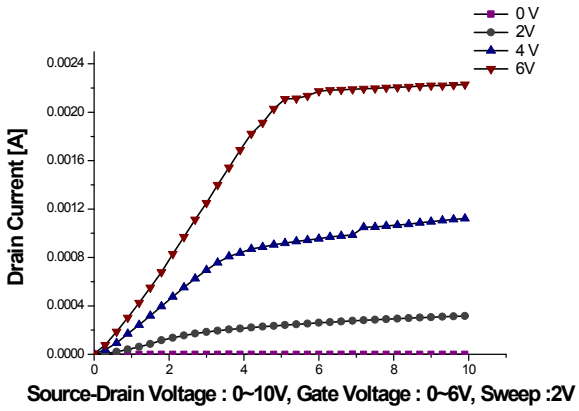


그림 7. HfAlO를 적용한 Oxide-TFT의 V_{DS}-I_{DS} 출력 곡선
Fig. 7. V_{DS}-I_{DS} output characteristic curve of Oxide-TFT with co-sputtered HfAlO.

V_{DS} = 5 V 로 고정한 체 V_G를 -1 ~ 6 V 까지 변화시켜 구한 I_{DS} 전류 특성 곡선이고, 그림 7은 V_G를 2 V 만큼 sweep 하며 나타낸 V_{DS} (0 ~ 10 V)에 대한 I_{DS} 전류 특성 곡선이다. Oxide-TFT의 전기적 특성은 이동도 10 $cm^2/V \cdot s$ 이상, 문턱전압 2 V 이하, 전류점멸비 10^5 이상에 최대전류량은 2 mA 이상을 나타내었다.

Ⅳ. 결 론

본 연구에서는 transparent Oxide-TFT의 게이트 절연막으로 쓰이는 고유전 절연체 HfO_2와 구조적, 전기적으로 TFT에 더욱 적합하게 특성이 향상되어진 co-sputtered HfO_2-Al_2O_3을 제작하여 그 특성을 비교 분석하였다. HfO_2와 Al_2O_3를 co-sputter에 의해 동시 증착하여 제작한 HfAlO 물질은 Al_2O_3에 의해 기존 HfO_2의 미세결정구조가 비결정 구조로 바뀌어 HfAlO 박막의 표면 거칠기를 HfO_2에 비해 더욱 부드럽게 해 주었다. 또한 에너지 밴드 갭 또한 더욱 넓어져 누설전류를 줄여 주었는데, 이는 최종적으로 HfAlO를 게이트 절연막으로 Oxide-TFT에 적용했을 때 그 전기적 특성을 더욱 향상시켜 주었다. 본 연구를 위해 제작되어진 IZO 기반 transparent oxide-TFT 는 상온에서 별도의 열처리 공정 없이 물리적 증착법인 스퍼터에 의해서만 shadow-mask를 이용해 원하는 절연층, 활성층, 전극층 각 영역의 패턴을 선택적 그리고 순차적으로 형성하였다. 이는 대면적 OLED 구동을 위한 back-plane 과 유연소자로의 적용 가능성을 보여준다.여기에 내용을 입력하세요.

참 고 문 헌

[1] K. Nomura, H. Ota, A. Takagi, T. Kamiya, M. Hirano, and H. Hosono, Nature 432, 488 (2004)
[2] Kimmon Lee, Jae Hoon Kim, Seongil Im, Chang Su Kim, and Hong Koo Baik, APL, 89, 133507 (2006)
[3] Y. L. Wang, W. T. Lim, D. P. Norton, S. J. Pearton, I. I. Kravchenko, J. M. Zavada, APL, 90, 232103 (2007)
[4] H. Q. Chiang, J. F. Wager, R. L. Hoffman, J. Jeong, D. A. Keszler, APL, 86, 013503 (2005)
[5] S. Kwon, J. W. Park, Philip D. Rack, Electrochemical and Solid-State Letters, 12 (7), H278-H280 (2009)
[6] B. Yaglioglu, H. Y. Yeom, R. Beresford, and D. C. Paine, APL, 89, 062103 (2006)
[7] D. C. Paine, B. Yaglioglu, Z. Beiley, S. H. Lee, Science Direct, 516, 5894-5898 (2008)
[8] E. Fortunato, P. Barquinha, A Pimentel, L. Pereira, G. Goncalves, and R. Martins, Phys. Stat. sol. (RRL) 1, No. 1, R34-R36 (2007)
[9] E. Fortunato, P. Barquinha, G. Goncalves, L. Pereira, R. Martin, Science Direct 52, 443-448, (2008)
[10] Seongpil Chang, Yong-Won Song, Sanggyu Lee, Sang Yeol Lee, and Byeong-Kwon Ju, APL, 92, 192104 (2008)
[11] W. T. Lim, S. H. Kim, Y. L. Wang, J. W. Lee, D. P. Norton, S. J. Pearton, F. Ren, and I. I. Kravchenko, Journal of The Electrochemical Society, 155 (6) H383-H385 (2008)
[12] Z. L. Pei, L Pereira, G. goncalves, P. Barquinha, N. Franco, E.Alves, A. M. B. Rego, R. Martins,

and Fortunato, Electrochemical and Solid-state Letters, 12 (10) G65-G68 (2009)
[13] Luis Pereira, Pedro Barquinha, Goncalo Goncalves, Anna Vila, Antonis Olziersky, Joan Morante, Elvira Fortunato, and Rodrigo Martins, Phys. Status Solidi A 206, No. 9, 2149-2154 (2009)
[14] R. Wallace and G. Wilk, MRS Bull, 27, 192 (2002)
[15] H. R. Jones and M. K. Wiles, J. Phys. Chem. 78, 8356 (1999)

저 자 소 개

손 희 근(학생회원)
2009년 동아대학교 전자공학과 학사 졸업
2011년 부산대학교 전기전자 공학부 석사 졸업
<주관심분야 :Oxide TFT>

조 동 규(학생회원)
2009년 부경대학교 전자공학과 학사 졸업
2010년~현재 부산대학교 전기 전자공학부 석사 과정
<주관심분야 :Oxide TFT>

이 동 희(학생회원)
2011년 부산대학교 전자공학과 학사 졸업.
2011년~현재 부산대학교 전기 전자공학부 석사 과정
<주관심분야 :Oxide TFT>

양 정 일(학생회원)
2010년 동아대학교 전자공학과 학사 졸업.
2010년~현재 부산대학교 전기 전자공학부 석사 과정
<주관심분야 : Oxide TFT>

우 상 현(학생회원)
2011년 부경대학교 전자공학과 학사 졸업.
2011년~현재 부산대학교 전기 전자공학부 석사 과정
<주관심분야 :Oxide TFT>

이 문 석(정회원)
1991년 포항공과대학교 전자전기 공학과 학사 졸업.
1995년 포항공과대학교 전자전기 공학과 석사 졸업.
1999년 포항공과대학교 전자전기 공학과 박사졸업.
1999년 7월~2002년10월 미국 LBNL. Post Doc./Staff Scientist
2002년12월~2004년8월 삼성전자 반도체총괄 책임연구원
2004년 9월~현재 부산대학교 전자전기공학부 부교수.
<주관심분야 : 반도체 소자, 공정, Oxide TFT>