

원자층 증착을 이용한 고 유전율 Al_2O_3 절연 박막 기반 Indium Zinc 산화물 트랜지스터의 저전압 구동

엄주송¹, 김성진^{1,2,a}

¹ 충북대학교 전자정보대학

² 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소

Low-Voltage Driving of Indium Zinc Oxide Transistors with Atomic Layer Deposited High-k Al_2O_3 as Gate Dielectric

Ju-Song Eom¹ and Sung-Jin Kim^{1,2,a}

¹ College of Electrical and Computer Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

² Institute for Computer and Information Communication, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

(Received January 12, 2017; Revised April 6, 2017; Accepted April 12, 2017)

Abstract: IZO transistors with Al_2O_3 as gate dielectrics have been investigated. To improve permittivity in an ambient dielectric layer, we grew Al_2O_3 by atomic layer deposition directly onto the substrates. Then, we prepared IZO semiconductor solutions with 0.1 M indium nitrate hydrate [$\text{In}(\text{NO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$] and 0.1 M zinc acetate dehydrate [$\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$] as precursor solutions; the IZO solution made with a molar ratio of 7:3 was then prepared. It has been found that these oxide transistors exhibit low operating voltage, good turn-on voltage, and an average field-effect mobility of $0.90 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ in ambient conditions. Studies of low-voltage driving of IZO transistors with atomic layer-deposited high-k Al_2O_3 as gate dielectric provide data of relevance for the potential use of these materials and this technology in transparent display devices and displays.

Keywords: Indium zinc oxide transistors, High-k Al_2O_3 , Atomic layer deposition

1. 서론

최근 새로운 디스플레이를 구동하는 소자의 개발이 디스플레이의 포맷과 더불어 가속화되었고, 특히 대폭적인 소비자들의 요구에 따른 중요한 요소를 만족시키는 유기 디스플레이 및 구동 전자 소자 분야에 상당한 진전이 있었다 [1-4]. 일반적으로 차세대 디스플레이를 위해 필수적인 요소는 높은 전하이동도, 가볍고 얇은 평판,

저비용 및 저소비 전력이며, 이러한 요소를 포함시키기 위해 비정질 산화물 반도체가 각광을 받게 되었다.

비정질 산화물 반도체는 기존의 실리콘 반도체에 비해 우수한 광 투과율과 높은 이동도를 가지고 있고, 큰 밴드갭으로 인해 투명 디스플레이에 이용이 가능하며, 빠른 이동도를 요구하는 active matrix organic light emitting diode (AMOLED)의 백플레인으로 활용할 수 있어서 미래의 디스플레이 산업에 큰 핵심 요소 기술로 발전하고 있다. 현재까지 평판 디스플레이의 백플레인에 들어가는 구동 전자 소자는 스퍼터링 및 chemical vapor deposition (CVD) 등의 비용 집약적인 진공 공정에서 제조하였는데, 이는 대량 생산과 대면적 디바이스 생산에 제한 사항을 가지고 있다 [5]. 이러한 이유로 단순하

a. Corresponding author; ksj@chungbuk.ac.kr

Copyright ©2017 KIEEME. All rights reserved.
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

며 저비용, 고성능의 용액공정을 통한 금속 산화물 박막 전자소자 제작이 집중적으로 연구되고 있다 [6-12].

한편, 산화물 반도체를 기반으로 한 트랜지스터를 저전압으로 구동하기 위해서는 일반적으로 고이동도 전자수송재료의 적용 및 유기물과 유기물간의 전자 주입장벽의 최소화와 같은 여러 가지 방법이 시도되고 있고 [13,14], 절연막에 HfO₂ [15], ZrO₂ [16,17], NbTaO₅ [18], Al₂O₃ [19,20]과 같은 고유전 물질을 제작하는 연구가 활발히 진행 중이다. 특히 atomic layer deposition (ALD) 공정을 통해 형성된 Al₂O₃ 절연막은 precursor 물질 자체의 boiling point가 낮아 ALD 공정 중에 heating chamber가 필요 없고 추가적인 assistant nitrogen gas를 주입하지 않아도 효율적인 증착이 가능하다. 또한 다른 고 유전 박막보다 히스테리시스 특성이 우수하여 leakage current로 인한 소자 특성의 감소를 개선할 수 있다.

일반적으로 금속-산화물로 구성된 반도체 물질이 다수 연구되고 있지만 Indium-Zinc 산화물 박막은 annealing 공정 온도가 기타 물질보다 낮고 높은 transparency, carrier mobility를 가지고 있어서 본 연구에서의 활성층으로 사용하였다. 기존의 IZO 박막 트랜지스터의 높은 이동도 42.1 cm²/V는 대부분 RF sputtering으로 보고되고 있지만 [21] 본 논문에서는 저전압 구동을 위한 고 유전율 박막인 Al₂O₃을 ALD로 증착한 뒤 용액 공정형 IZO 박막 트랜지스터를 제작하고 전기적인 특성을 분석하였다.

2. 실험 방법

그림 1(a)는 이번 연구에서 제작한 IZO 기반의 산화물

반도체 소자의 구조를 나타낸다. Oxide TFT는 metal-oxide-semiconductor 구조로 제작하였다. 기판이자 하부전극으로써 heavily doped n-type 실리콘 웨이퍼를 사용하였으며, piranha cleaning을 이용하여 표준 세정을 실시하였다. 절연막 형성을 위해 thermal oxidation을 이용한 1,000 Å의 두께를 가지는 SiO₂ 박막과 ALD 공정을 통해 30 nm의 Al₂O₃를 각각 성장시켰다. 그림 1(b)는 본 실험에 사용된 ALD 시스템의 구조도이다. Al₂O₃의 전구체인 trimethyl aluminum (TMA)와 oxygen의 전구체인 H₂O를 반복적으로 증착하여 박막을 성장시키는 원리이다. Al₂O₃ 증착을 위해 TMA 용기를 상온에서 유지 한 후, 유체의 양을 조절하는 mass flow controller를 통해 chamber로 50 sccm의 질소 가스를 주입하여 TMA 증기를 process chamber로 이동시켰다. TMA와 H₂O의 증기가 주입되는 동안 2.5×10⁻² torr의 압력과 200°C의 온도에서 공정을 진행하여 30 nm의 Al₂O₃를 증착하였다.

산화물 반도체 특성을 나타내는 활성층인 IZO를 제작하기 위해 널리 알려진 sol-gel 공정을 진행하였다. Indium nitrate hydrate [In(NO₃)₃·xH₂O], zinc acetate dihydrate [Zn(CH₃COO)₂·2H₂O]를 시약으로 사용하였으며, 0.1 M의 indium, zinc 용액을 제작하기 위해 용매로써 2-methoxyethanol을 사용하였다. 시약을 용해시키기 위해 촉매의 역할을 하는 acetylacetone, NH₃를 indium 용액에 첨가하였고 acetylacetone을 zinc 용액에 첨가하여 2시간 동안 상온에서 stirring을 진행하였다. 이후 In, Zn 용액을 7:3의 비율로 혼합하여 1시간 동안 stirring을 진행하였다 [22]. 반도체 박막을 제작하기 위해 IZO 용액을 30초 동안 1,500 rpm의 속도로 spin-coating을 진

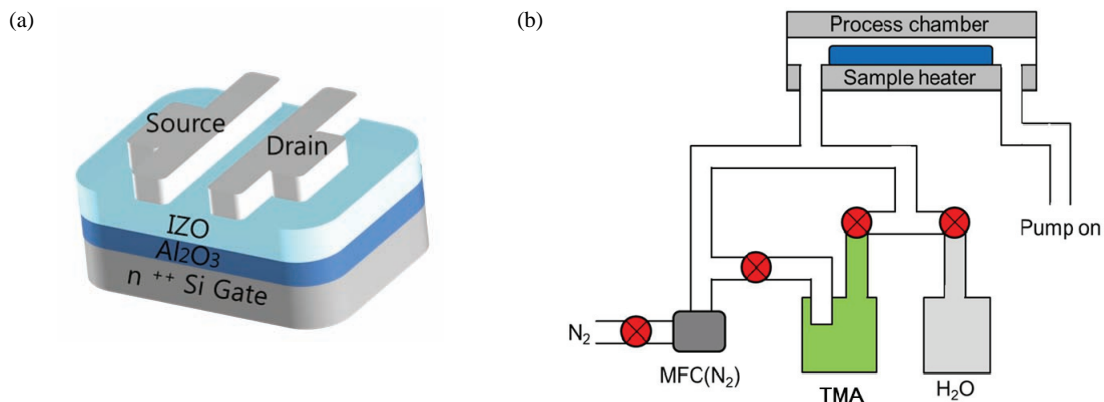


Fig. 1. FE-SEM image of the oxidation of FS-GaN for 8 hour at (a) 900°C and (b) 1,000°C.

행하여 IZO 산화물 반도체를 30~40 nm 두께로 코팅하였다. 이후 남아있는 용매를 증발시키기 위해 400°C의 furnace에서 2시간 동안 annealing을 실시한 뒤 Metal evaporator를 이용하여 Al을 진공 증착하여 100 nm의 source, drain 전극으로 제작하였다. 이후 전자소자 측정 장비인 Agilent B1500을 사용하여 소자의 전기적 특성을 공기 중에서 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 1,000 Å의 SiO₂와 30 nm의 Al₂O₃에 대한 current density-electric field (J-E) 특성을 보여준다. 박막 증착된 SiO₂와 Al₂O₃의 누설 전류 밀도를 알 수 있으며 특히 SiO₂ 박막은 3 MV/cm 이하의 전계가 가해졌을 때 10⁻⁷ A/cm² 정도의 전류 밀도를 유지하는 반면에 Al₂O₃ 박막은 1.4 MV/cm 이상의 전계가 가해졌을 때 절연 파괴 현상이 시작됨을 알 수 있었다. 그러나 8.9 정도의 높은 유전 상수를 가지는 Al₂O₃ 박막은 10 V 이하의 저전압 구동을 목적으로 하기 때문에 이 같은 현상은 문제되지 않을 것으로 판단한다.

그림 3은 Si wafer 위에 SiO₂와 Al₂O₃를 성장시키고, IZO 박막을 증착한 뒤 표면의 morphology를 확인하기 위해 atomic force microscopy (AFM)을 사용한 결과이다. SiO₂ 보다 Al₂O₃의 표면이 더 촘촘하고 조밀하게 형성되어 있는 것을 볼 수 있었다. 이러한 특성으로 인해 더 효율적인 전하 포획(charge trapping)을 예상할 수 있으며, 고 유전박막 특성으로 인해 저전압구동이 가능함을 알 수 있다.

그림 4는 SiO₂와 Al₂O₃를 산화물 트랜지스터의 절연

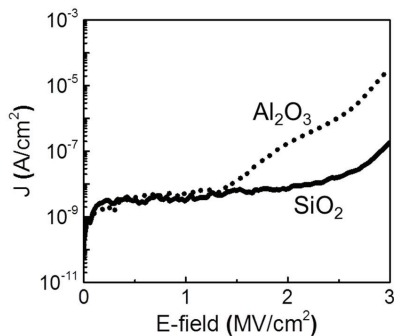


Fig. 2. Current density-electric field (J-E) characteristics of SiO₂ and Al₂O₃ dielectrics.

막으로 사용했을 때의 소자의 transfer curve 이다. 먼저, 그림 4(a)는 SiO₂를 절연막으로 사용했을 때, gate voltage에 따른 drain current를 측정해보았는데, off 상태가 1.38×10⁻¹⁰, on 상태가 2.51×10⁻²로 on/off ratio

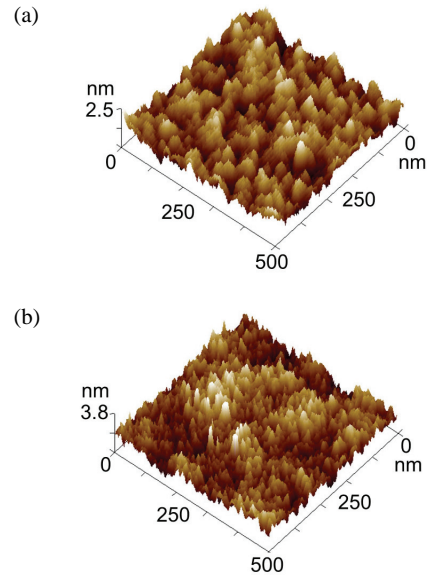


Fig. 3. AFM image of oxide transistor with (a) SiO₂ and (b) Al₂O₃ dielectrics.

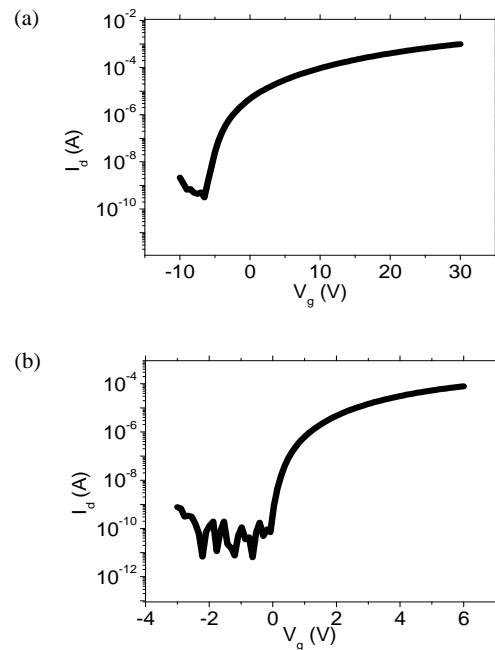


Fig. 4. Representative transfer characteristics of IZO transistor with (a) SiO₂ and (b) Al₂O₃ dielectrics.

Table 1. Semiconducting parameters of device performance.

	Material	Thickness	Mobility (cm^2/Vs)	$I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$	$V_{\text{th}}(\text{V})$	S/S (V/decade)
(a)	SiO_2	100 nm	5.06	1.1×10^8	3.87	0.49
(b)	Al_2O_3	30 nm	0.90	1.2×10^7	7.07	0.65

값은 1.1×10^8 이며, turn-on voltage가 왼쪽으로 이동된 것으로 보인다. V_g 가 30 V 이상 가해짐에 따라 on 특성이 나오는 것을 확인할 수 있었다.

그림 4(b)에서 Al_2O_3 를 절연막으로 사용했을 때의 소자 특성은 off 상태가 3.31×10^{-11} , on 상태가 4.52×10^{-4} 로 on/off ratio 값은 1.21×10^7 이며 turn-on voltage가 0 V에 근접하게 이동한 것으로 보인다. 특히 SiO_2 를 절연막으로 가지는 소자와는 다르게 낮은 5 V의 V_g 전압을 인가함에도 불구하고 확실한 turn-on의 switching 특성을 보여줌으로써, 제안한 ALD 공정으로 제작한 고 유전 박막의 용액 공정형 산화물 트랜지스터가 저전압으로 효율적으로 구동함을 알 수 있었다.

표 1은 SiO_2 , Al_2O_3 기반 산화물 트랜지스터의 주요 4가지 전기적인 소자 parameter에 대하여 표로 정리한 결과를 나타낸다. 상온(23°C), 암실(dark room)의 측정 환경에서 먼저 SiO_2 절연막을 가지는 IZO 소자의 source와 drain을 하나는 ground, 다른 하나는 25 V로 고정시킨 후, gate에 -10 V에서 30 V의 전압을 지속적으로 인가하여 측정하였다. 그 결과 mobility가 5.06 (cm^2/Vs), on/off ratio가 1.18×10^8 로 관측되었고, 문턱 전압(V_{TH})은 3.87 V, subthreshold swing (S/S)가 0.49 V/decade로 나오는 것을 확인할 수 있었다.

다음으로, Al_2O_3 절연막을 가지는 IZO 소자의 source와 drain을 하나는 ground, 다른 하나는 5 V로 고정시킨 후, gate에 -4 V에서 6 V의 전압을 지속적으로 인가하여 측정하였다. 그 결과, mobility가 0.90 (cm^2/Vs), on/off ratio가 1.23×10^7 로 SiO_2 절연막을 가지는 IZO 소자보다 낮게 나왔고, 문턱 전압(V_{TH})은 7.07 V, S/S가 0.65 V/decade로 나오는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 산화물 반도체를 저전압에서 구동시키기 위해서 고 유전율인 Al_2O_3 를 ALD 공정 방법으로 증

착한 용액 공정 기반의 IZO 산화물 트랜지스터를 제작하여 전기적인 특성을 평가하였다. Al_2O_3 를 증착한 소자가 기존의 SiO_2 절연막 소자보다 gate bias에 의한 전기적 신뢰성 평가 시 turn-on 전압이 0 V에 가깝고, 낮은 전압에서도 기존과 같은 반도체 특성을 보인다. 향후 우수한 광 투과율과 낮은 소비 전력을 필요로 하는 차세대 디스플레이 스위칭 소자의 핵심 기술로 응용될 수 있다고 생각된다.

감사의 글

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (2017R1D1A3B03029782) and the Human Resources Development of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grant funded by the Korea government Ministry of Trade, industry & Energy (No. 20144030200450), and the MSIP (Ministry of Science, ICT and Future Planning), Korea, under the ITRC (Information Technology Research Center) support program (IITP-2015-R0992-15-1008) supervised by the IITP (Institute for Information & communications Technology Promotion).

REFERENCES

- [1] E.M.C. Fortunato, P.M.C. Barquinha, A.C.M.B.G. Pimental, A.M.F. Gonçalves, A.J.S. Marques, L.M.N. Pereira, and R.F.P. Martins, *Adv. Mater.*, **17**, 590 (2005). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.200400368>]
- [2] K. Nomura, H. Ohta, A. Takagi, T. Kamiya, M. Hirano, and H. Hosono, *Nature*, **432**, 488 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1038/nature03090>]

- [3] F. Jaehnik, D. V. Pham, R. Anselmann, C. Bock, and U. Kunze, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 14011 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.5b03105>]
- [4] M. K. Kim, J. H. Jeong, H. J. Lee, T. K. Ahn, H. S. Shin, J. S. Park, J. K. Jeong, Y. G. Mo, and H. D. Kim, *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 212114 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2742790>]
- [5] M. Rockelé, D. V. Pham, J. Steiger, S. Botnaras, D. Weber, J. Vanfleteren, T. Sterken, D. Cuypers, S. Steudel, K. Myny, S. Schols, B. van de Putten, J. Genoe, and P. Heremans, *J. Soc. Inf. Disp.*, **20**, 499 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1002/jsid.114>]
- [6] J. M. Ball, P. H. Wöbkenberg, F. Colléaux, M. Heeney, J. E. Anthony, I. McCulloch, D.D.C. Bradley, and T. D. Anthopoulos, *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 103310 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3212736>]
- [7] P. H. Wöbkenberg, J. Ball, F. B. Kooistra, J. C. Hummelen, D. M. de Leeuw, D.D.C. Bradley, and T. D. Anthopoulos, *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 013303 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2954015>]
- [8] M. Benwadih, J. A. Chroboczek, G. Ghibaud, R. Coppard, and D. Vuillaume, *J. Appl. Phys.*, **115**, 214501 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4880163>]
- [9] H. U. Li and T. N. Jackson, *IEEE Electron Device Lett.*, **36**, 35 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1109/led.2014.2371011>]
- [10] X. Yu, J. Smith, N. Zhou, L. Zeng, P. Guo, Y. Xia, A. Alvarez, S. Aghion, H. Lin, J. Yu, R.P.H. Chang, M. J. Bedzyk, R. Ferragut, T. J. Marks, and A. Facchetti, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **112**, 3217 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1501548112>]
- [11] J. Socratous, K. K. Banger, Y. Vaynzof, A. Sadhanala, A. D. Brown, A. Sepe, U. Steiner, and H. Sirringhaus, *Adv. Funct. Mater.*, **25**, 1873 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.201404375>]
- [12] Z. Qi, J. Cao, H. Li, L. Ding, and J. Wang, *Adv. Funct. Mater.*, **25**, 3138 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.201500525>]
- [13] C. W. Tang and S. A. VanSlyke, *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 913 (1987). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.98799>]
- [14] D. Platz, E. A. Tholén, D. Pesen, and D. B. Haviland, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 153106 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2909569>]
- [15] J. Tardy, M. Erouel, A. L. Deman, A. Gagnaire, V. Teodorescu, M. G. Blanchin, B. Canut, A. Barau, and M. Zaharescu, *Microelectron. Reliab.*, **47**, 372 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2006.01.012>]
- [16] G. Adamopoulos, S. Thomas, P. H. Wöbkenberg, D.D.C. Bradley, M. A. McLachlan, and T. D. Anthopoulos, *Adv. Mater.*, **23**, 1894 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201003935>]
- [17] A. Hardy, S. Van Elshocht, C. Adelman, T. Conard, A. Franquet, O. Douhéret, I. Haeldermans, J. D'Haen, S. D. Gendt, M. Caymax, M. Heyns, M. D'Olielaeager, M.K.V. Bael, and *Thin Solid Films*, **516**, 8343 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.04.017>]
- [18] S. Clima, G. Pourtois, A. Hardy, S. Van Elshocht, M. K. Van Bael, S. De Gendt, D. J. Wouters, M. Heyns, and J. A. Kittl, *J. Electrochem. Soc.*, **157**, G20 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1149/1.3253583>]
- [19] N. Avci, P. F. Smet, J. Lauwaert, H. Vrielinck, and D. Poelman, *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, **59**, 327 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s10971-011-2505-9>]
- [20] J. H. Park, K. Kim, Y. B. Yoo, S. Y. Park, K. H. Lim, K. H. Lee, H. K. Baik, and Y. S. Kim, *J. Mater. Chem. C*, **1**, 7166 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1039/C3TC31589D>]
- [21] J. Sheng, H. J. Lee, S. Oh, and J. S. Park, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **8**, 33821 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.6b11774>]
- [22] C. Y. Koo, K. Song, T. Jun, D. Kim, Y. Jeong, S. H. Kim, J. Ha, and J. Moon, *J. Electrochem. Soc.*, **157**, J111 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1149/1.3298886>]