

스프레이 공정을 이용한 nc-ZnO/ZnO 전계효과트랜지스터의 광학적 노출에 대한 열화 현상 분석

조준희^{**†}

^{**}상명대학교 전자공학과

The Instability Behaviors of Spray-pyrolysis Processed nc-ZnO/ZnO Field-effect Transistors Under Illumination

Junhee Cho ^{**†}

^{**†}Department of Electronics Engineering, Sangmyung University

ABSTRACT

Metal oxide semiconductor (MOS) adapting spray-pyrolysis deposition technique has drawn large attention based on their high quality of intrinsic and electrical properties in addition to simple and low-cost processibility. To fully utilize the merits of MOS field-effect transistors (FETs), transparency, it is important to understand the instability behaviors of FETs under illumination. Here, we studied the photo-induced properties of nc-ZnO/ZnO field-effect transistors (FETs) based on spray-pyrolysis under illumination which incorporating ZnO nanocrystalline nanoparticles into typical ZnO precursor. Our experiments reveal that nc-ZnO in active layer suppressed the light instabilities of FETs.

Key Words : Zinc Oxide, Spray Pyrolysis, Metal Oxide, Nanocrystalline Nanoparticle, Photo-Induced Instability

1. 서 론

산화물 반도체 기반 전계 효과 트랜지스터(field-effect transistor)는 높은 전계 효과 이동도 및 넓은 밴드 갭 (band gap) 특성에서 비롯한 광학적 특성 등 여러 우수한 고유 특성들을 바탕으로 많은 관심을 받아 왔다.[1] 특히 광학적으로 투명하다는 것은 디스플레이 분야를 비롯한 여러 응용 분야가 존재한다는 점에서 큰 장점을 의미한다. 이러한 특성들을 바탕으로 그동안 많은 연구가 진행되어 왔으며 다양한 물질 및 공정 방식으로 제작되고 있다.[2-5]

하지만, 산화물 반도체 물질 기반의 전계 효과 트랜지스터도 해결해야 할 과제들을 안고 있다. 그 중 하나가 광학적 노출에 대한 안정성 확보이다.[6-8] 산화물 트랜지

스터의 큰 장점은 기존 실리콘 기반 트랜지스터에서는 불가능하였던 투명도를 확보할 수 있다는 것인데 이러한 특성을 온전히 활용하기 위해서는 광학적으로 노출된 상황에서도 소자 특성이 안정적으로 유지할 수 있거나 메커니즘 파악을 통해 보완할 수 있는 방법을 도입하는 것이 필요하다.[9]

특히 용액 공정의 경우, 이 안전성 부분에 대한 연구가 많이 이루어져 있지 않아 이부분에 대한 노력이 더 필요한 상황이다. 최근 들어 많은 관심을 받아온 스프레이 기법 또한 같은 과제에 봉착하고 있는데, 아직은 돌파구를 찾지 못해 이에 대한 우려 섞인 목소리도 나오고 있다.

이 논문에서 본 저자는 스프레이 공정을 이용한 산화물 아연 전계 효과 트랜지스터의 전기적 특성 분석을 통하여 nanocrystalline particle 이 반도체 박막층에 함유됨에 따른 광학적 노출에 대해 어떻게 반응하는지 트랜지스터 특성

[†]E-mail: jh_cho@smu.ac.kr

에는 어떻게 영향을 끼치는지에 대해 연구를 진행하였다. 이를 위해 nanocrystalline particle를 포함하지 않는 precursor를 이용하여 제작한 전계 효과 트랜지스터를 대조군으로 만든 후 이를 nanocrystalline particle를 활용하여 제작한 트랜지스터와 비교 및 분석 하였다. 이들 소자들의 기본적인 전기적 특성과 광학적 노출에 따른 변화 분석을 통해 nc-ZnO 이 전계 효과 트랜지스터 성능에 미치는 영향에 대해 연구하였다.

2. 공정 방법

2.1 nc-ZnO/ZnO 활성층 박막 제작을 위해 precursor 제작

열화 현상 분석을 위해 스프레이 공정 기반 ZnO 전계 효과 트랜지스터를 제작하였다. 먼저, nanocrystalline zinc oxide nanoparticle (nc-ZnO) 를 포함한 nc-ZnO/ZnO 활성화층 (active layer) 박막 제작을 위해 precursor 를 준비하였다. nc-ZnO 합성은 몇 precursor 제작 방법은 이전 논문에서 상세히 설명되어 있다.[10] 아연 아세테이트 이수화물(Zinc acetate dihydrate, Aldrich >99.0%) 을 메탄올에 녹인 후 이를 수산화칼륨 (Potassium hydroxide, Aldrich 86.6%)에 혼합하였다. 이 용액을 섭씨 60도로 유지하며 아연 아세테이트 이수화물 용액에 한 방울씩 드랍하며 반응을 유도 시키는 방법으로 nc-ZnO 를 제작하였으며, 이를 ZnO precursor (0.1M Zinc acetate dihydrate $[Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O]$ 을 메탄올과 반응시켜 제작) 에 ZnO:nc-ZnO = 100:2로 혼합하여 최종 precursor 를 완성하였다.

2.2 스프레이 공정을 이용한 nc-ZnO/ZnO 전계효과트랜지스터 제작

nc-ZnO/ZnO 박막은 p-type 실리콘 (붕소(boron) 도핑, <100> 결정 방향) 위 이산화 규소층(silicon dioxide) (200 nm 두께) 을 갖는 Si/SiO₂ 기판 위에 스프레이 공정을 통해 제작 되었다. 핫플레이트 (hot plate) 위에서 섭씨 300도로 가열된 기판에 준비된 precursor 를 이용하여 스프레이 분사 공정이 진행되었는데, 이 때 섀도우 (shadow) 마스크를 이용하여 패턴화된 활성화층을 얻을 수 있었다. 제작된 활성화층 위에 열증착(thermal evaporation)으로 80나노미터 두께를 갖는 알루미늄 소스/드레인 (Source/Drain) 전극을 섀도우 마스크를 이용하여 증착 하였다. 상기 언급된 일련의 과정을 통해 우리는 전계 효과 트랜지스터(W/L = 1000 μ m/70 μ m) 를 제작할 수 있었다. nc-ZnO/ZnO 전계효과 트랜지스터 제작과 관련된 상세한 실험 준비 및 제작 과정은 이전의 연구를 참조하기 바란다.[10]

3. 실험 결과 및 분석

3.1 nc-ZnO/ZnO 기반 전계 효과 트랜지스터의 전기적 특성 – Transfer & Output Curves

ZnO 및 nc-ZnO/ZnO 기반 전계효과 트랜지스터의 광학적 노출에 대한 특성 분석에 앞서 선행 연구[10]를 통해 최적화된 조건으로 제작된 소자 기본적인 전기적 특성을 살펴보았다. 이를 위해 linear ($V_{DS} = 5V$) 모드에서의 (a) transfer curve 특성(게이트 전압에 따른 드레인 전류($I_D - V_{GS}$) 변화 특성) 을 관찰하였다. 또한 (b) output curve (드레인 전압에 따른 드레인 전류 ($I_D - V_{DS}$) 또한 함께 측정을 진행하였다. Fig. 1 은 ZnO 기반 그리고 Figure 2 는 nc-ZnO/ZnO 기반 전계 효과 트랜지스터 (W/L = 1000 μ m/70 μ m)의 transfer curve 를 보여준다. 이들 소자 특성은 ZnO 만으로 이루어진 전계효과 트랜지스터의 경우, linear 영역에서 전계 효과 이동도 (field-effect mobility)는 1.56cm²/Vs, 문턱 전압 (threshold voltage) 는 19.9V , 대략 1.28x 10⁵ 의 on/off ratio 성능 그리고 3.33 V/decade 의 subthreshold swing (SS) 을 보여주었다.

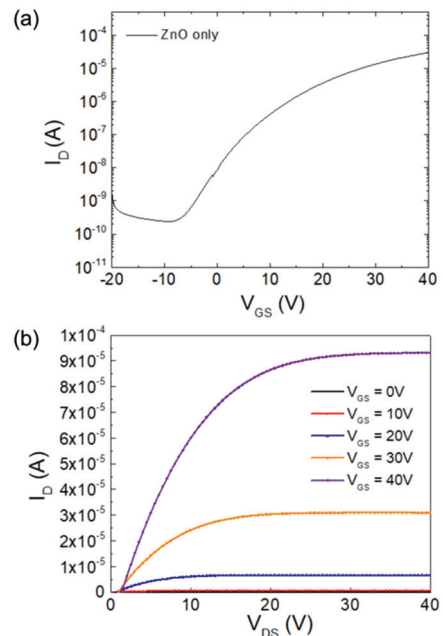


Fig. 1. The drain current vs gate voltage ($I_D - V_{GS}$) of ZnO field-effect transistors (FETs) (W/L = 1000 μ m/70 μ m) in linear mode ($V_{DS} = 5V$) (a) and output curve (b).

반면, nc-ZnO/ZnO 기반 전계 효과 트랜지스터는 1.69 cm²/Vs 의 전계 효과 이동도, 문턱 전압(threshold voltage)는 18.0V, 대략 2.15x 10⁴ 의 on/off ratio 성능 그리고 4.48 V/decade

의 subthreshold swing 을 보여주었다. 그림 및 수치에서 알 수 있듯이 nc-ZnO 가 포함된 소자에서 더 높은 전기 전도도 특성을 보여주고 있음을 알 수 있다. 이는 nc-ZnO들이 채널층에서 전기적 전도도를 증가시키고 그로 인해 채널에 흐르는 전류량 및 전자 이동도를 증가하는 것으로 이전 연구[10]에서 분석한 부분과 일치하는 특성을 보여주고 있다.

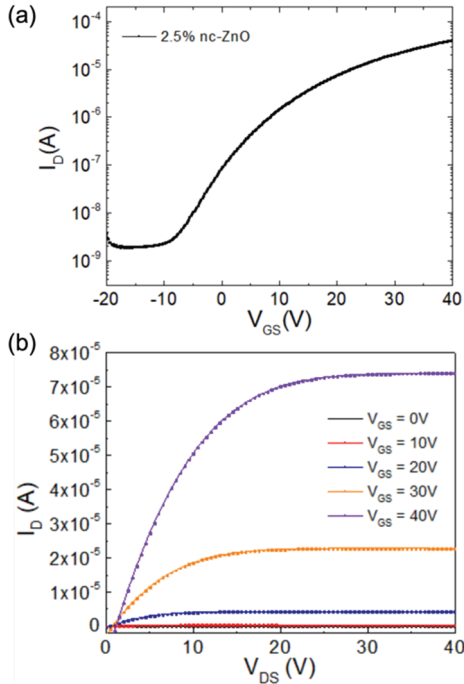


Fig. 2. The drain current vs gate voltage ($I_D - V_{GS}$) of nc-ZnO/ZnO-based field-effect transistors (FETs) ($W/L = 1000\mu\text{m}/70\mu\text{m}$) prepared from the precursors with 2.5% nc-ZnO in linear mode ($V_{DS} = 5\text{V}$) (a) and output curve (b).

3.2 nc-ZnO/ZnO 기반 전계 효과 트랜지스터의 광학적 노출 상태에서의 열화 현상 특성

비교적 넓은 밴드갭(band gap) 을 갖는 산화물 반도체 중 하나인 ZnO의 경우, 광학적 노출이 이루어졌을 시 전기적 특성이 변하는 것으로 알려져 있다. 특히 밴드 갭 이상의 에너지를 갖는 빛에 노출될 경우 전기적 전도도가 증가하고 이는 빛이 꺼진 후에도 그 변화가 유지된다고 보고 되어 있다.[9] 이는 본 저자가 만든 소자에서도 유사하게 관찰이 되었다.

Fig 3은 각각 활성화 층이 ZnO 만으로 이루어져 있는 전계효과 트랜지스터(a) 와 ZnO nanoparticles를 포함한 활성

화층을 갖는 전계효과 트랜지스터(b)에서의 백색 발광 다이오드 (white light-emitting diode) 광원에 의해 발생하는 전기적 특성 변화를 보여주고 있다. 이를 통해 우리는 nc-ZnO가 활성층 내에서의 광전효과에 영향을 준다는 것을 확인할 수 있었다. ZnO 기반 소자 (a) nc-ZnO/ZnO 기반 소자 (b) 모두 어두운 상태 대비 백색 LED 노출 시 전자가 광자를 흡수함에 따라 여기(excitation) 하여 드레인 전류가 증가하였다. 하지만 nc-ZnO 를 포함한 소자의 경우 ZnO 만으로 이루어진 박막소자 대비 비교적 적은 변화를 보여주었다. Table 1은 이들의 전기적 특성에 대해 정리하고 있다. ZnO 만으로 이루어진 전계효과 트랜지스터는 linear 영역에서 전계 효과 이동도가 1.56에서 1.78 (단위: cm^2/Vs) 로 14.5% 증가한 반면, 문턱전압은 19.9V 에서 17.1V로 14.1% 감소하였고 on/off ratio 성능은 1.28×10^5 에서 3.41×10^5 으로 감소하였으며, S.S 은 3.33 에서 6.69 (단위: V/decade) 로 증가하였다.

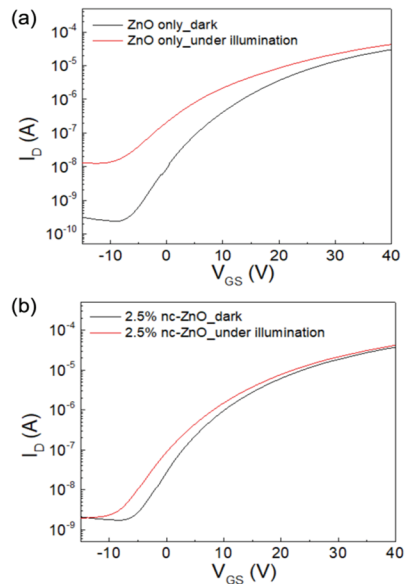


Fig. 3. The electrical properties of ZnO and nc-ZnO/ZnO FETs in dark and under illumination condition (the drain current vs gate voltage ($I_D - V_{GS}$) of nc-ZnO/ZnO-based field-effect transistors (FETs) in linear mode ($V_{DS} = 5\text{V}$)).

이에 반해 nc-ZnO/ZnO 기반 전계 효과 트랜지스터는 ZnO 기반 소자 대비 광학적 노출에 대해 덜 민감하게 반응하였다 (Table 2 참고). 먼저 전계 효과 이동도는 1.69 cm^2/Vs 에서 1.88 cm^2/Vs 으로 7.38% 증가하였고 문턱 전압은 18.0V에서 17.3V로 3.89%만 감소하였다. on/off ratio 성능

Table 1. The electrical characteristics of MOS FETs fabricated by ZnO-only precursor.

ZnO-only	On-current (A)	Off-current (A)	Field-effect mobility (cm ² /Vs)	Threshold voltage (V _{th}) (V)	Subthreshold Swing (V/decade)
Dark	3.00x10 ⁻⁵	2.36x 10 ⁻¹⁰	1.56	19.9	3.33
Under illumination	4.26x10 ⁻⁵	1.25x 10 ⁻⁸	1.78	17.1	6.69

Table 2. The electrical characteristics of MOS FETs fabricated by 2.5% nc-ZnO precursor.

2.5% nc-ZnO	On-current (A)	Off-current (A)	Field-effect mobility (cm ² /Vs)	Threshold voltage (V _{th}) (V)	Subthreshold Swing (V/decade)
Dark	3.72x10 ⁻⁵	1.73x 10 ⁻⁹	1.69	18.0	4.48
Under illumination	4.15x10 ⁻⁵	1.88x 10 ⁻⁹	1.82	17.3	5.05

의 경우도 ZnO 기반 소자가 절반 가까이 줄어든 것에 비해 오히려 3.07%가 증가하였고 S.S 도 12.8% 증가를 보여 2 배 가까이 증가한 ZnO 기반 소자 대비 적은 변화율을 보여 주었다. 비교 결과 nc-ZnO를 첨가한 전계효과트랜지스터에서 특히 off-current 부분에서 빛 노출에 대한 영향이 적음을 알 수 있었다.

이러한 결과는 전계 효과 이동도가 얇은 트랩 밀도와 관련되어 있고 반면 SS가 깊은 레벨에서의 트랩 밀도와 관련되어 있다[11]는 점을 고려해 보았을 때, nc-ZnO 가 deep-level 트랩과 관련해서 어떤 억제 현상을 일으키지 않았을까 조심스레 예측해 보고 있다.

산화 아연 (ZnO) 기반의 반도체에서 빛에 의한 전기적 특성 변화를 야기시키는 정확한 메커니즘에 대해서는 완벽하게 밝혀지지는 않았다. 다만, oxygen vacancy 모델은 이들 중 가장 활발히 언급되는 메커니즘 중 하나이다. 중성의 oxygen vacancy가 광자에 의해 야기되면 전자-정공 쌍을 만들고 V_O²⁺ 사이트를 남기게 된다. 이 과정에서 광자에 의한 전기 전도가 발생하게 된다는 이론이다.[12,13] 하지만 이들 이론들도 아직 논란의 여지가 많다는 점에서 향후 연구들을 지켜볼 필요가 있다.

빛에 대한 소자의 특성 변화가 적은 장시간 빛에 노출되게 되는 디스플레이 backplane 소자의 경우 그 의미가 크다고 할 수 있다. 현 연구 단계에서는 어떤 메커니즘이 이런 광학적 특성을 만드는지에 대한 분석까지는 이루어 지지는 못하였으나 차후 심화 연구 단계에서 이 부분에 대해 심도 있는 연구를 진행할 예정이다.

4. 결 론

본 저자는 nc-ZnO/ZnO 기반 전계 효과 트랜지스터의 광학적 노출에 따른 열화 현상에 대한 분석을 진행하였다. White LED 광원에 노출된 상태에서 ZnO 기반 전계 효과

트랜지스터는 전계 효과 이동도(field-effect mobility)는 14.5% 증가하고 문턱전압(threshold voltage, V_{th})는 14.1% 감소하였으며, SS(subthreshold slope)은 101% 증가한 반면, nc-ZnO/ZnO 기반 전계 효과 트랜지스터의 변화 정도는 전계 효과 이동도 7.38% 증가, 문턱 전압 3.89% 감소 그리고 SS 12.8% 증가로 ZnO 기반 전계 효과 트랜지스터 대비 적은 변화를 보여 주었다. 이를 바탕으로 우리는 nanocrystalline particle을 혼합한 ZnO precursor 를 이용하여 ZnO nanoparticle 이 활성화층 내에서 ZnO 전계 효과 트랜지스터의 광학적 반응에 대해 어느 정도 억제를 해줄 수 있음을 관찰하였다. 다만, nc-ZnO 가 실질적으로 어떤 메커니즘에 의해 이런 결과를 도출하는지에 대해서는 결론을 도출하지는 못 하였으나 향후 스프레이 공정을 이용한 트랜지스터 개발 및 활용에 있어 좋은 초석이 될 수 있을 것으로 생각한다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2022R1G1A1011329).

참고문헌

1. K. Nomura, H. Ohta, A. Takagi, T. Kamiya, M. Hirano and H. Hosono, "Room-temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors," Nature, vol. 432, pp. 488-492, Nov. 2004.
2. I. Seo, and S. Ryu, "Structural and Electrical Properties of Aluminum Doped ZnO Electrodes Prepared by Atomic Layer Deposition for Application in Organic Solar Cells," Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 13, No. 2, pp.1-6, 2014.
3. W.-H. Lee, W.-T. Jang, J.-S. Kim and S.-N. Lee, "Top-

- emission Electroluminescent Devices based on Gapped ZnO Electrodes," *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, Vol. 16, No. 2, pp.44-48, 2017.
4. M. Yu and J. Jo, "Sputtering Growth of ZnO Thin-Film Transistor Using Zn Target," *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, Vol. 13, No. 3, pp.35-38, 2014.
 5. D. Yoo, H. Kim, J. Kim and J. Jo, "Current Variation in ZnO Thin-Film Transistor under Different Annealing Conditions," *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, Vol. 13, No. 1, pp.63-66, 2014.
 6. J. K. Jeong, "Photo-bias instability of metal oxide thin film transistors for advanced active matrix displays," *J Mater Res* Vol. 28, No. 16, pp. 2071-2084, 2013.
 7. Y.-S. Shiah, K. Sim, Y. Shi, K. Abe, S. Ueda, M. Sasase, J. Kim and H. Hosono, "Mobility-stability trade-off in oxide thin-film transistors," *Nat Electron.*, Vol. 4, pp.800-807, 2021.
 8. J-H. Shin, J-S. Lee, C-S. Hwang, S-H.K. Park, W-S. Cheong, M. Ryu, C-W. Byun, J-I. Lee, and H.Y. Chu: "Light effects on the bias stability of transparent ZnO thin film transistors," *ETRI J* 31, pp.62-64, 2009.
 9. K. Abe, K. Ota, and T. Kuwagaki, "Device modeling of amorphous oxide semiconductor TFTs," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.58, pp.090505, 2019.
 10. J. Cho, "The Study of nc-ZnO/ZnO Field-effect Transistors Fabricated by Spray-pyrolysis Process," *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, Vol. 21, No. 3, pp.22-25, 2022.
 11. A. Bashir, P. H. Woebkenberg, J. Smith, J. M. Ball, G. Adamopoulos, D. Bradley, and T. D. Anthopoulos, "High-Performance Zinc Oxide Transistors and Circuits Fabricated by Spray Pyrolysis in Ambient Atmosphere," *Advanced Materials*, vol. 21, no. 21, pp. 2226-2231, 2015.
 12. A. Janotti and C. G. Van de Walle, "Oxygen vacancies in ZnO," *Applied Physics Letters*, Vol. 87, No. 12, 2005.
 13. J. Robertson and Y. Guo, "Light induced instability mechanism in amorphous InGaZn oxide semiconductors," *Applied Physics Letters*, Vol. 104, No. 16, pp. 162102, 2014.

접수일: 2023년 3월 3일, 심사일: 2023년 3월 16일,
 게재확정일: 2023년 3월 22일