

스프레이 공정을 이용한 nc-ZnO/ZnO 전계효과트랜지스터 제작 및 특성 분석

조준희**

**상명대학교 전자공학과

The Study of nc-ZnO/ZnO Field-effect Transistors Fabricated by Spray-pyrolysis Process

Junhee Cho **

**Department of Electronics Engineering, Sangmyung University

ABSTRACT

Metal oxide semiconductor (MOS) based on spray-pyrolysis deposition technique has attracted large attention due to simple and low-cost processibility while preserving their intrinsic optical and electrical characteristics. However, their high process temperature limits practical applications. Here, we demonstrated the nc-ZnO/ZnO field-effect transistors (FETs) via spray-pyrolysis as incorporating ZnO nanocrystalline nanoparticles into typical ZnO precursor. The nc-ZnO/ZnO FETs exhibit good quality of electrical properties. Our experiments reveal that nc-ZnO in active layer enhance electrical characteristics.

Key Words : Zinc oxide, Spray pyrolysis, Metal oxide, Nanocrystalline nanoparticle

1. 서 론

산화물 반도체 기반 전계 효과 트랜지스터(field-effect transistor)는 우수한 고유 특성들을 바탕으로 여러 부분에서 불투명한 실리콘을 기반으로 한 트랜지스터 대비 우수성을 보여주고 있으며 이는 차세대 디스플레이를 위한 대표적 후보로서 많은 관심으로 이어지고 있다.[1] 먼저, 산화물 반도체는 고유 물성으로 넓은 밴드 갭(band gap)을 갖고 있다. 이는 광학적으로 투명하다는 것을 의미하며 다양한 분야, 특히 디스플레이 분야에서의 응용에 있어 무한한 가능성을 제공함을 의미한다.[1-3] 또한, 산화물 반도체는 높은 캐리어 이동도(carrier mobility)를 고유 특성으로 보유하고 있는데, 이미 액정디스플레이(Liquid-crystal display, LCD) 뿐 아니라 유기 발광 다이오드(organic light-emitting diode, OLED)를 기반으로 하는 디스플레이들을 구

동함에도 문제가 없는 수준을 보여주고 있으며, 이는 산화물 전계 효과 트랜지스터의 활용 가치가 매우 높다는 것을 보여준다.[4,5]

이런 훌륭한 특성을 보여주고 있는 산화물 반도체 물질을 활용한 전계 효과 트랜지스터에도 극복해야할 문제점들이 존재하고 있다. 이 중 가장 큰 과제는 대부분의 산화물 반도체 물질들, 특히 대표적인 산화물 반도체 물질인 산화아연 기반 산화물 반도체들의 경우, 채널층을 형성함에 있어 고온 공정이 필요하다는 것이다. 채널층의 성능은 결정화 과정을 통해 결정되는데 산화아연의 경우 결정화 온도가 전기적 특성에 끼치는 영향이 매우 큰 편이다. 이러한 공정 온도의 한계는 트랜지스터 활용에 있어 여러 제약들을 주게 되는데, 공정 기술 적용과 기판(substrate) 선택이 대표적인 예이다.[6]

공정 기술 적용에 있어서는 용액 공정이 특히 많은 제약을 받게 되는데 그 이유는 하기와 같다. 용액 공정의 장점은 진공 공정 대비 간단한 공정 과정과 공정 자체가

†E-mail: jh_cho@smu.ac.kr

공기 중에서 이루어지기 때문에 공정 공간의 제약에서 자유롭다는 점과 이로 인해 저비용 그리고 대면적 공정이 가능하다는 것이다.[7] 하지만 결정화 과정은 고온 및 공정 환경 조건에 대한 박막 특성의 의존성이 크기 때문에 추가적인 공정이 필요하며 이는 용액 공정 특유의 장점인 간단명료 및 저비용 특성이 반감되는 결과를 초래하게 된다는 점에서 아쉬움이 많을 수 밖에 없다.

고온 공정은 기판(substrate) 활용에 있어서도 많은 제약을 발생시킨다. 산화물 반도체의 특성인 투명성은 웨어러블(wearable) 디바이스를 포함한 플렉서블(flexible) 디바이스에서 특이나 큰 활용 가능성을 보이게 된다. 하지만 고온 공정은 플렉서블 기판의 활용을 제한함으로써 이러한 활용 가능성의 구현에 있어 현실적인 어려움을 제공하게 된다.[8] 이를 해결하기 위해 산화물 반도체의 고온 결정화 과정을 대체하기 위한 노력들이 여러 공정 기술 분야에서 꾸준히 이루어져 왔으며 이는 용액 공정 분야 또한 이러한 노력들이 활발히 이루어져 왔지만 괄목할만한 성과를 도출해내지는 못하는 상황이다. 최근 들어 많은 관심을 받은 스프레이 기법 또한 타 산화물 반도체 용액 공정과 같은 과제에 봉착하고 있는데, 아직은 돌파구를 찾지 못해 꾸준히 받아왔던 관심이 행여 시들어지지 않는을까 하는 우려 섞인 목소리도 달리는 상황이다.

이 논문에서 본 저자는 스프레이 공정을 이용한 산화아연 박막 제작에 있어 결정화 온도를 낮추기 위한 방안을 제시하였다. 이를 위해 합성을 통해 제조한 nanocrystalline particle과 기존의 precursor를 혼합하여 새로운 형태의 precursor 제조를 진행하였고 이를 활용하여 실질적인 전계 효과 트랜지스터를 제작하고 더 나아가 소자 특성을 분석 하였다. 이를 위해 nanocrystalline particle의 농도를 달리하여 제작한 precursor를 이용하여 스프레이 공정을 통한 산화물 박막층을 만들고 이를 활성층으로 활용한 전계 효과 트랜지스터를 제작하였으며, 이들 소자들의 특성 분석을 통해 nc-ZnO 이 전계 효과 트랜지스터 성능에 미치는 영향에 대해 연구하였다.

2. 공정 방법

2.1 스프레이 공정을 위한 precursor 준비

용액 기반 스프레이 공정을 통한 박막 형성을 위해 ZnO nanoparticle 이 혼합된 ZnO precursor를 준비하였다. 이를 위해 먼저 nanocrystalline zinc oxide nanoparticle (nc-ZnO)을 합성을 통해 제작하였는데, 아연 아세테이트 이수화물 (Zinc acetate dihydrate, Aldrich >99.0%) 2.95 g을 메탄올 125 ml에 녹인 후, 1.89 g의 수산화칼륨 (Potassium hydroxide, Aldrich 86.6%)을 65 ml에 혼합한 후 이를 섭씨 60도로 유지하며

아연 아세테이트 이수화물 용액에 한 방울씩 떨어뜨리며 130 분 동안 강력히 휘저으며 반응을 유도 시켰다. 반응이 끝난 후 상온에서 2시간 넘게 식혀주었다. 이후 용액은 원심분리 과정을 거친 후 고체 잔여물들은 메탄올을 이용하여 씻어내는 과정을 통해 대략적으로 평균 5 나노미터 크기의 nc-ZnO particle을 형성하였다. 합성과 관련된 자세한 사항은 본 연구자가 출간한 이전 논문[9]에 자세히 언급되어 있으니 참고하기 바란다. 합성된 nc-ZnO particle은 기존에 널리 사용되어온 ZnO precursor (0.1M Zinc acetate dihydrate $[Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O]$ + 메탄올)과 혼합하는 과정을 거쳤다. 이 과정에서 nc-ZnO 농도에 따른 전계효과 트랜지스터의 특성 변화를 비교하기 위하여 세 가지 다른 농도(ZnO:nc-ZnO = 100:0(only ZnO), 100:2.5(2.5% nc-ZnO), 100:5(5.0% nc-ZnO))로 nc-ZnO/ZnO precursor를 준비하였다.

2.2 스프레이 공정을 이용한 ZnO 박막 형성 및 전계효과트랜지스터 제작

먼저 상기 과정에서 준비한 nc-ZnO/ZnO precursor는 헨드 스프레이건을 이용해 200 nm 두께의 이산화규소 층 (silicon dioxide)을 갖는 p-type 실리콘 기판 (붕소(boron) 도핑, <100> 결정 방향) 위에 분사 하였다. 스프레이 분사 공정은 섭씨 300도의 핫플레이트 (hot plate) 위에서 진행이 되었는데, 이를 통해 nanoparticle이 섞여 있는 ZnO precursor이 결정화 과정을 거쳐 필름으로 형성 될 수 있었다. 이전 연구[9]에서 언급되어 있는 일련의 최적화 과정을 통해 양질의 20 nm 두께의 nc-ZnO/ZnO 박막을 만들어 낼 수 있었다. 이 때 독립된 활성화 층 (active layer) 제작을 위해 스프레이 분사 공정은 새도우 (shadow) 마스크를 이용하여 진행하였다.

이후 소스/드레인 (Source/Drain) 전극으로 80나노미터 두께의 알루미늄을 새도우 마스크를 이용한 열 증착 (thermal evaporation) 방법으로 증착 하였고 이들 과정을 통해 전계 효과 트랜지스터 (W/L = 1000 μ m/70 μ m)를 제작할 수 있었다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 nc-ZnO/ZnO 기반 전계 효과 트랜지스터의 전기적 특성 - Transfer Curve

본 저자는 기존에 선행된 nc-ZnO/ZnO 박막 제조 기술 연구[9]를 바탕으로 전계 효과 트랜지스터를 제작하고 이들의 전기적 특성을 분석하고 이를 최적화하는 과정을 진행하였다. 이를 위해 다양한 분석 방법이 진행되었는데, 먼저 transfer curve와 output curve 특성을 살펴 보았다. Fig. 1은 ZnO/nc-ZnO 농도에 따른 transfer curve 특성을 보여주었고 있다. ZnO/nc-ZnO 전계 효과 트랜지스터의 전기적 특성을

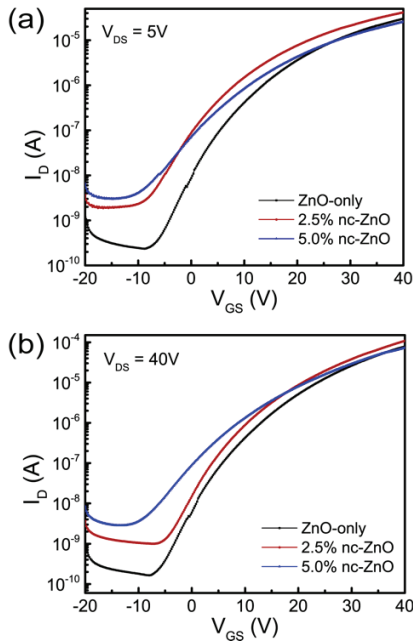


Fig. 1. The drain current vs gate voltage ($I_D - V_{GS}$) of nc-ZnO/ZnO-based field-effect transistors (FETs) ($W/L = 1000\mu\text{m}/70\mu\text{m}$) prepared from the precursors with various ratios of nc-ZnO (0% nc-ZnO, 2.5% nc-ZnO and 5.0% nc-ZnO) in linear mode ($V_{DS} = 5\text{V}$) (a) and saturation modes ($V_{DS} = 40\text{V}$) (b).

좀 더 세밀히 살펴보고자 linear 모드 ($V_{DS} = 5\text{V}$) (a)와 saturation 모드 ($V_{DS} = 40\text{V}$) (b) 두 가지 조건에서 게이트 전압에 따른 드레인 전류 ($I_D - V_{GS}$)의 특성 분석을 진행 하였다.

2.5% nc-ZnO precursor 를 이용하여 제작한 nc-ZnO FET (2.5% nc-ZnO TFTs)의 경우, nanocrystalline particle 이 첨부되지 않은 ZnO-only FET 대비 on 상태에서의 전류, off 상태에서의 전류, 전계 효과 이동도는 더 높은 그리고 문턱 전압의 경우 더 낮은 값을 보여주었다(Table1 참조). 이러한 결과는 이전 연구[9]에서 진행되었던 nc-ZnO/ZnO 박막의 전기적 특성 연구에서 관찰되었던 nano-particle 에 의한 전기적 전도도 증가와 연관이 되어 있는 것으로 보인다. 첨가된 nc-ZnO 가 박막의 전기 전도성을 증가시키고 그로 인해 동작 시 그리고 동작하지 않을 시 모두의 전류 량을 증가시키고 전류 연계 전자 이동도를 증가 시키며 이와 동시에 문턱 전압을 낮추는 효과를 가져 온 것으로 보인다. 다만, 5% nc-ZnO FET의 경우, nc-ZnO 함량이 증가함에 따라 수평적 뿐 아니라 수직적 전기 전도도가 증가하게 되었고 그로 인해 채널에서의 캐리어 이동이 이상적인 수평적 이동이외 수직적인 요소도 함께 커져 제어가 완벽하게 이루어지지 못하는 것으로 사료된다.[9]

Table 1. The electrical characteristics of MOS FETs fabricated by 0% and 2.5% nc-ZnO precursor.

	On-current (A)	Off-current (A)	Field-effect mobility (cm^2/Vs)	Threshold voltage (V_{th}) (V)
ZnO-only	3.0×10^{-5}	2.4×10^{-10}	1.55	21.9
2.5% nc-ZnO	4.2×10^{-5}	1.9×10^{-9}	1.82	19.0
5.0% nc-ZnO	2.6×10^{-5}	3.0×10^{-5}	1.28	21.4

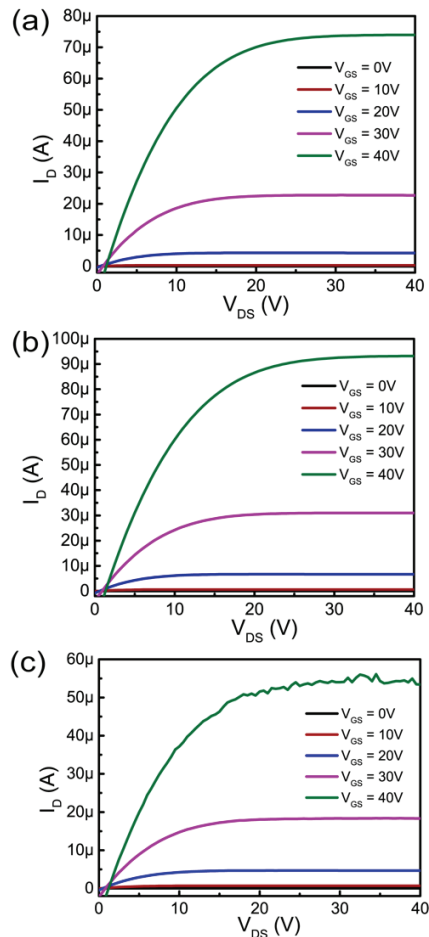


Fig. 2. The drain current vs drain voltage ($I_D - V_{DS}$) of nc-ZnO/ZnO-based field-effect transistors (FETs) ($W/L = 1000\mu\text{m}/70\mu\text{m}$) prepared from the precursors with various ratios of nc-ZnO (0% nc-ZnO(a), 2.5% nc-ZnO(b) and 5.0% nc-ZnO(c)).

3.2 nc-ZnO/ZnO 기반 전계 효과 트랜지스터의 전기적 특성 – Output Curve

본 저자는 nc-ZnO/ZnO 기반 전계 효과 트랜지스터의 전기적 특성에 대해 좀 더 심도 있게 연구하기 위하여 이들의 드레인 전압에 따른 드레인 전류 특성($I_D - V_{DS}$)에 대해서도 분석을 진행하였다. 하기 Fig. 2는 세 가지 다른 nc-ZnO 함량을 갖는 precursor 를 이용하여 제작한 전계 효과 트랜지스터들의 output curve 특성들을 보여주고 있다.

Output curve 특성에 있어서 제작한 소자들은 transfer curve 와 일관성 있는 결과를 보여주었다. Nanocrystalline particle 도입에 따라 2.5% nc-ZnO FET 는 주어진 모든 게이트 전압 ($V_{GS} = 0, 10, 20, 30, 40V$)에서 ZnO만으로 이루어진 ZnO-only FET 대비 on-current 의 절대값이 증가하는 경향성을 보여주었다. 5.0% nc-ZnO 소자의 경우 드레인 전극에 흐르는 on 상태에서의 전류에 있어 열화 현상 발생이 관찰되었다. 이로 인하여 소자에 흐르는 전류 크기가 감소하였으며 높은 게이트 전압 (40V) 에서는 불안정한 모습을 보이기도 하였다. 이는 앞서 언급하였던 nc-ZnO 함량이 증가함에 따라 수직적 전기 전도도의 증가로 인하여 이상적인 수평적 채널 형성이 이루어지지 못하여 이런 현상을 나타낸 것으로 예상할 수 있다.[9]

4. 결 론

본 저자는 저온 스프레이 공정 산화물 반도체 소자 개발을 목표로 nanocrystalline particle 을 혼합한 ZnO precursor 를 이용하여 전계 효과 트랜지스터(On-off ratio = 2.2×10^5 , 전계 이동도: $1.82 \text{ cm}^2/V\cdot\text{s}$)를 제작하였다. 본 연구를 통해 zinc oxide nanoparticle 을 많이 포함한 ZnO FET에서 더 높은 전기적 전도율에 의한 전기적 효과들이 나타남을 확인할 수 있었다. 다만, nc-ZnO가 전기적 통로 제공을 통해 전하의 이동을 향상 시키는 하나 이러한 현상은 무작위 방향으로 발생하게 되고 이는 채널 형성에 있어 좋은 방향으로만 작용하지는 않게 됨을 확인 하였다. 다만, 이러한 실질적인 소자 제작하여 이에 대한 특성 연구를 통해 nanoparticle 의 주입이 소자 특성에 미치는 영향을 분석하고 문제점을 제시 했다는 점에 있어 향후 nanocrystalline particle 을 이용한 트랜지스터 개발에 있어 큰 도움을 줄 수 있을 것으로 생각한다.

감사의 글

본 연구는 2022학년도 상명대학교 교내연구비를 지원받아 수행하였음 (과제번호: 2022-A000-0326).

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. A. Kołodziejczak-Radzimska and T. Jesionowski, "Zinc Oxide—From Synthesis to Application: A Review," *Materials*, vol. 7, no. 4, pp. 2833–2881, Apr. 2014.
4. W.-H. Lee, W.-T. Jang, J.-S. Kim and S.-N. Lee, "Top-emission Electroluminescent Devices based on Ga-doped ZnO Electrodes," *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, Vol. 16, No. 2, pp.44-48, 2017.
5. 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.
6. 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.
7. D. Afouxenidis, R. Mazzocco, G. Vourlias, P.J. Livesley, A. Krier, W.I. Milne, O. Kolosov and G. Adamopoulos, "ZnO-based Thin Film Transistors Employing Aluminum Titanate Gate Dielectric Deposited by Spray Pyrolysis at Ambient Air," *ACS Appl. Mater. Interfaces* vol.7, Issue 13, pp.7334-7341, Apr. 2015.
8. Y.-Y. Noh, X. Cheng, H. Sirringhaus, J. I. Sohn, M. E. Welland, and D. J. Kang, "Ink-jet printed ZnO nanowire field effect transistors," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, no. 4, p. 043109, Jul. 2007.
9. J. Cho, "Morphological and Electrical Characteristics of nc-ZnO/ZnO Thin Film Fabricated by Spray-pyrolysis for Field-effect Transistor Application," *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, Vol. 20, No. 4, pp.1-5, 2014.

접수일: 2022년 8월 3일, 심사일: 2022년 9월 6일,
게재확정일: 2022년 9월 19일