

# 고무기판상의 신축이 가능한 Zinc oxide 기반의 투명 박막 트랜지스터 Mechanically stretchable and transparent Zinc oxide thin film transistor on rubber substrate

\*박경애<sup>1</sup>, #안종현<sup>1,2</sup>

\*K. Park<sup>1</sup>, #J. -H. Ahn(ahnj@skku.edu)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>성균관대학교 신소재공학부, <sup>2</sup>성균관대학교 나노과학기술원

Key words : Zinc oxide, stretchable, transparent, thin film transistor

## 1. 서론

미래 사회의 정보화기기는 시간과 장소에 관계없이 원하는 정보를 취득하고 이를 표시할 수 있는 보다 인간친화적인 휴대형 복합기기가 요구된다. 미래친화적인 전자 소자들은 유연성 및 신축성을 지님으로써 보다 인간 신체와의 밀착성을 높이고 이에 따른 변형성을 가짐으로써 신축 가능형 전자 소자 (stretchable electronics)로의 응용이 가능해지게 된다. 이러한 신축을 지닌 전자소자는 디스플레이 분야에 응용함으로써 휴대가 가능한 개인용 potable display, 또는 미래지향적인 wearable display 등으로 개발이 가능해지게 된다. 산화물 반도체 재료를 기반으로 한 투명 박막 트랜지스터(Transparent Thin Film Transistors, TTFTs)는 기존 실리콘 기반의 소자에 비해 제작 공정이 비교적 간단하고 투명성을 지니고 있어 디스플레이 분야에 많이 이용되고 있다. 산화물 반도체 재료로는 주로 Indium oxide, Gallium oxide, Tin oxide, Zinc oxide 등이 사용되고 있으며 이와 같은 산화물 반도체를 이용하여 고성능의 유연성 및 신축성을 지닌 디스플레이 분야로써 인간친화적인 미래 전자 소자로 그 분야를 넓힐 수 있게 된다. 특히 Zinc oxide (ZnO)의 경우 bandgap energy 가 크고 높은 투과율을 보여 투명 박막 트랜지스터의 활성층으로 많이 사용되고 있다.[1-3] 이러한 ZnO 를 기반으로 한 투명성을 지닌 유연 소자를 구현하기 위해 지금까지 연구 개발되고 있는 방법은 플라스틱 기판 위에 직접 증착하는 저온 공정이 사용되고 있다.[4] 그러나 산화물 반도체의 경우 상대적으로 낮은 failure strain 값(ZnO 의 경우 <0.03%)으로 인해 쉽게 깨지는 단점을 갖고 있어 직접 증착하는 방식으로는 유연하면서 신축이 가능한 소자로의 응용이 불가능해진다. 본 연구에서는 이를 해결하기 위한 방법으로 “dry transfer method”를 이용하였으며, 이를 통해 미리 늘려놓은 고무 기판 위에 소자를 전사함으로써 신축이 가능한 투명 박막트랜지스터를 구현하였으며 변형 시에도 용이하게 응력을 흡수할 수 있도록 박막 패턴의 구조를 설계함으로써 구조적으로 소자의 안정성을 확보하고자 하였다.[5]

## 2. 실험방법

Fig.1 은 신축이 가능한 투명 박막 트랜지스터를 구현하기 위한 순서도이다. 실리콘 기판을 모기판으로 하고 그 위에 희생층인 Germanium 을 e-beam evaporator 를 이용하여 증착하였다. 이후 소자와 희생층간의 diffusion 을 방지하고 소자를 보호하기 위해 buffer layer 로 Silicon dioxide 를 증착하였다. 소자의 구현은 ZnO 를 활성층으로 하고 전극과 절연막은 각각 Indium Tin oxide (ITO)와 Silicon dioxide (SiO<sub>2</sub>)를 사용하였으며 bottom gate 구조의 박막 트랜지스터를 제조하였다. 소자의 완성 후 샌드위치 구조의 보호막으로써 polymer 소재를 이용하여 encapsulation film 을 spin-coating 법을 이용하여 도포하여 소자의 균열을 최소화하고 Neutral Mechanical Plane (NMP)을 통해 emcapsulationfilm 의 두께를 조절함으로써 활성층인 ZnO 박막에 가해지는 strain 을 최소화하도록 하였다. 또한 소자를 형성한 후 에칭트가 좀더

효과적으로 희생층을 제거하고 신축성을 위한 주름 패턴 형성 시 소자에 미치는 stress 를 최소화하기 위해 각 소자는 패드 형태로 분리하여 bridge 구조로써 각 소자 패드를 연결시켜주었다.[6] 이후 희생층을 제거함으로써 모기판으로부터 소자를 분리시키고 dry transfer 법에 따라 elastomeric stamp 를 이용하여 5% 가량 pre-strain 된 고무 기판 위에 전사하였다. 이때 소자가 전사된 pre-strain 된 고무 기판을 원상태로 release 시킴으로써 박막 소자에 발생하는 수축에 의해 bridge 에 주름이 형성되며 이러한 주름을 통해 ZnO 기반의 박막 소자를 5%까지 늘릴 수 있게 된다.

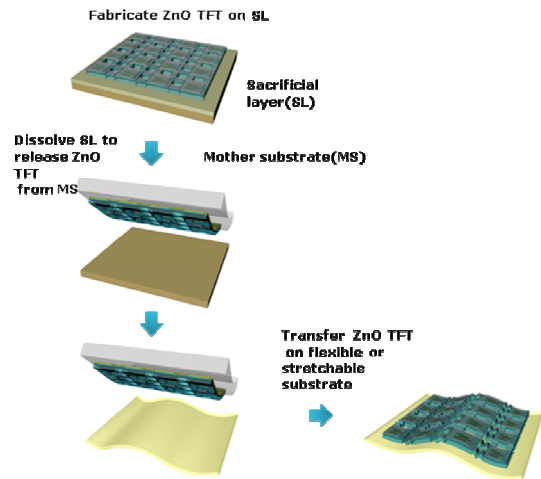
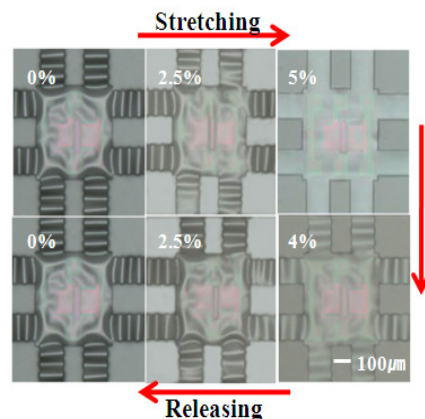


Fig. 1 Diagram of stretchable Zinc oxide thin film transistor

## 3. 실험결과

그림 2 는 고무 기판 위에 전사된 박막 트랜지스터를 5%까지 늘렸을 때 bridge 에 나타난 주름 형상에 대한 이미지이다. 5% 가량 미리 늘려놓은 고무 기판 위에 소자를 전사법을 통해 구성하고 이를 다시 수축시킴으로써 소자를 연결하는 bridge 에 주름을 형성시켜 5%까지 늘릴 수 있는 신축성 투명 박막 트랜지스터를 구현하였다. 소자를 각각 0%에서 2.5%, 4%, 5%까지 늘림에 따라 소자를 연결하는 bridge 가 퍼지게 되고 이를 다시 원상태인 0%로 releasing 시킴으로써 주름이 다시 형성되는 것을 통해 신축이 가능한 박막 트랜지스터를 구현하였다.



. Fig. 2 Optical image of biaxially stretched Zinc oxide thin film transistor with wavy pattern

또한 소자를 전사하기 전과 소자를 고무 기판 위에 전사하여 각각 0%, 2.5%, 4%, 5%까지 늘린 후 원상복귀시켰을 때의 전기적 특성을 살펴보았다. Drain 전압은 5V 를 가하였으며 gate 전압은 -20V~25V 로 측정을 하였다. 전사 전에 비해 전사 이후 on-off ratio 가  $10^7$  에서  $10^6$  으로 다소 감소하는 경향을 보이나 이는 전사 시 활성층과 절연막의 interface 에 약간의 strain 이 작용한 것으로 보이나 전사 이후로는 소자가 비슷한 전기적 특성을 보이며 구동되는 것을 확인하였고 다시 원상태로 주름 패턴이 형성되었을 때에도 유사한 전기적 특성값을 보였다.

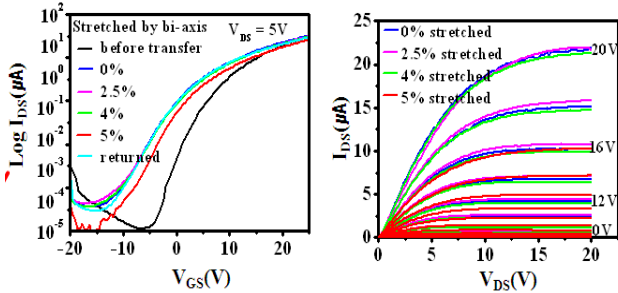


Fig. 3 IV curve and transfer curve of ZnO TFT when device are stretched from 0% to 5%

#### 4. 결론

투명성을 지닌 산화물 반도체 소재를 기반으로 한 신축이 가능한 투명 박막 트랜지스터를 구현하였다. 각 소자를 패드 형태로 분리를 하고 이를 bridge 구조로 연결시켜줌으로써 신축을 위한 주름 패턴 형성 시 소자에 미치는 stress 를 최소화하고 5%까지 신축이 가능한 소자의 구현을 가능하게 하였다. 또한 NMP 을 적용하여 encapsulation film 의 두께를 조절함으로써 소자에 미치는 strain 을 최소화하여 소자의 안정성을 확보하고자 하였다. 이를 통해 유연성 및 신축성을 갖는 투명 박막 트랜지스터를 이용한 wearable display 로의 응용 또한 가능할 것으로 사료된다.

#### 후기

본 연구는 한국 지식경제부의 산업원천기술개발사업 (No.10033309)의 연구지원에 의해 이루어졌습니다.

#### 참고문헌

1. Fortunato, E., P. Barquinha, et al. (2005). "Recent advances in ZnO transparent thin film transistors." *Thin Solid Films* 487(1-2): 205-211.
2. Fortunato, E. M. C., P. M. C. Barquinha, et al. (2004). "Wide-bandgap high-mobility ZnO thin-film transistors produced at room temperature." *Applied Physics Letters* 85: 2541.
3. Hoffman, R. L., B. J. Norris, et al. (2003). "ZnO-based transparent thin-film transistors." *Applied Physics Letters* 82: 733.
4. P. F. Carcia, R. S. McLean, M. H. Reilly, G. Nunes Jr, 2003, "Transparent ZnO thin-film transistor fabricated by rf magnetron sputtering," *Applied Physics Letters*, Vol. 82, pp. 1117.
5. Kim, D. H., J. H. Ahn, et al. (2008). "Stretchable and foldable silicon integrated circuits." *Science* 320(5875): 507.
6. Kim, D. H., J. Song, et al. (2008). "Materials and noncoplanar mesh designs for integrated circuits with linear elastic responses to extreme mechanical deformations." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105(48): 18675.