

Transfer printing 기술을 이용하여 유연기판에 전사된 ZnO TFT의 Bendability

Bendability of ZnO TFT on flexible substrate using transfer printing

*황우진¹, #좌성훈¹, 은경태¹, 박경애², 안중현²

*W. J. Hwang¹, #S. H. Choa(shchoa@snut.ac.kr)¹, K. T. Eun¹, K. Y. Park², J. H. Ahn²

¹ 서울산업대학교 NID 융합기술대학원, ² 성균관대학교

Key words : ZnO TFT, Bendability, Reliability, Transfer Printing

1. 서론

최근 유연전기소자 (flexible electronic device)에 대한 관심이 증가하고 있다. 유연전기소자를 제작하는 방법은 크게 두 가지로 분류될 수 있다. 첫째는 유기재료로 잉크젯, 롤투를 프린팅 기술 등과 같은 프린팅 기술을 이용하여 유연 기판에 프린팅하는 기술이 있다. 둘째는 Rogers 그룹[1]에서 개발한 방식으로 실리콘 소자를 기판에서 떼어내어 유연기판에 옮기는 transfer printing 기술이 있다. Transfer printing 기술은 기존의 실리콘 소자가 갖고 있는 여러 가지 장점을 그대로 사용할 수 있는 특징이 있지만, 실리콘이나 SiO₂ 등의 재료가 매우 brittle 하기 때문에 굽힘이나 인장 변형에 매우 취약하다는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 wavy 패턴[2]이나 mesh design[3]을 적용하여 stretchability를 개선하려는 노력이 다양하게 시도되고 있다. 특히 최근에 ZnO, IGZO 등과 같은 산화물 반도체를 이용한 투명 TFT의 개발이 큰 관심을 끌고 있다. 이 경우에도 ZnO와 같은 무기물의 취성 특성이 유연소자로서의 활용에 bottleneck이 되고 있다. Wavy 패턴이나 mesh design을 적용하여 인장변형에 대한 stretchability 연구는 많이 진행되었으나, 유연소자의 특성으로 매우 중요한 굽힘특성(bendability)에 대해서는 아직 많은 연구가 진행되지 못하였다. 따라서 본 논문에서는 transfer printing 기술로 제작된 투명 ZnO TFT가 폴리머 기판에 부착되었을 때 발생하는 bendability 특성 및 피로특성에 대해서 연구를 수행하였다.

2. ZnO TFT의 제작 및 전사

본 연구에서는 투명 TFT를 제작하기 위한 재료로써 ZnO, SiO₂, ITO를 각각 활성층, 절연막, 전극으로 사용하였다. 희생층으로는 organic etchant로부터 소자를 보호하기 위하여 물에서 쉽게 etching될 수 있는 germanium (Ge)을 사용하였고 보호막으로는 SU-8을 사용하였다. Fig. 1은 PET 위에 전사된 ZnO TFT의 개략도이다. ZnO TFT를 제작하기 위해 실리콘 기판 위에 희생층인 Ge와 Buffer layer로 사용되는 SiO₂를 각각 300 nm, 450 nm의 두께로 e-beam evaporator로 증착한 후 열 산화 시켰다. Gate 전극은 ITO를 sputtering 공정을 이용하여 100 nm 두께로 증착하였고, 절연막으로써 SiO₂를 PECVD 공정을 이용하여 100 nm 두께로 증착하였다. 활성층으로 선정된 ZnO는 100 nm 두께로 sputtering 공정을 이용하여 증착하였으며 350°C에서 약 1시간 동안 annealing하였다. Source/drain 전극으로는 ITO를 sputtering 공정을 이용하여 100 nm 두께로 증착하였고, passivation layer인 SU-8을 spin coater를 사용하여 1 μm 코팅하였다. 제작이 완료된 ZnO TFT array의 크기는 7.25×6.95 mm이며 총 90개의 TFT로 이루어져 있다.

전사 공정은 자체 제작한 전사 장비를 사용하여 진행하였다. 유연 기판의 재료로는 투과율이 좋은 PET를 사용하였다. PET의 크기는 20×20 mm이고, 두께는 188 μm이다. Stamp의 재료로는 PDMS를 사용하였고, PET기판과 ZnO TFT의 adhesive는 NOA(norland 63) UV 경화제를 사용하였다. Fig. 2는 PET 기판 위에 전사된 ZnO TFT

를 나타내며, 전체적으로 투명한 구조로 이루어진 것을 확인할 수 있다.

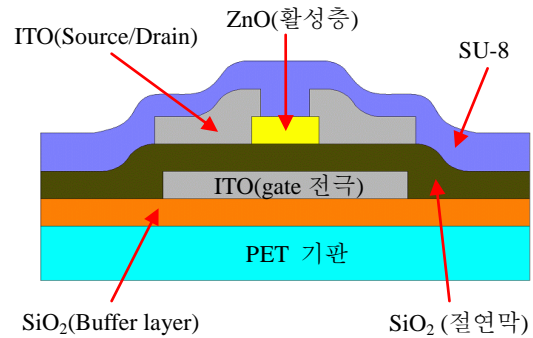


Fig. 1 Cross section of ZnO TFT on PET substrate

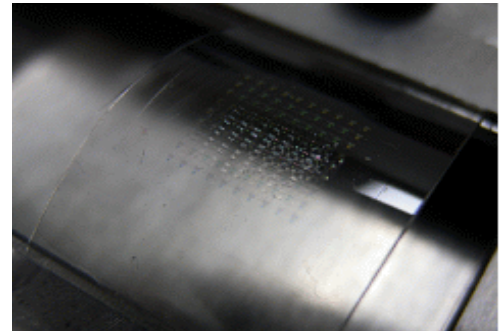


Fig. 2 Transferred ZnO TFT on PET substrate

3. PET에 전사된 ZnO TFT의 Bendability

ZnO TFT의 bending test는 자체 제작한 bending test 장비를 이용하여 진행하였다. 장비의 분해능은 이송속도 0.01 mm/s, 이송 거리 0.001 mm까지 가능하며 fatigue 실험이 가능하다. Fig. 3에서 본 연구를 위하여 자체 제작한 bending test 장비를 보여주고 있다.

ZnO TFT의 측정은 4 point probe station 장비를 이용하여 gate, source, drain 전극을 각각 contact하였고 source meter를 이용하여 전압/전류를 인가하였다. ZnO TFT의 transfer curve를 측정하기 위한 gate voltage는 -20~30V, drain voltage는 5V를 인가하였다. ZnO TFT의 bending radius와 strain 값은 식 (1), (2)에서 계산하였으며 Rogers 그룹[4]에서 제시한 수식을 사용하였다.

$$R_{nom} = \frac{L}{2\pi\sqrt{\frac{dL}{L} - \frac{\pi^2 h_s^2}{12L^2}}} \quad (1)$$

$$\epsilon_{nom} = \frac{h_s}{2R_{nom}} \quad (2)$$

Fig. 4는 ZnO TFT의 각 bending radius 별로 transfer curve를 측정한 data이다. ZnO TFT의 bending test는 radius 40 mm를 시작으로 30, 20, 15, 12 mm로 진행하였고 bending radius 40~15 mm까지 큰 변화를 보이지 않았다. 그러나 bending radius가 12 mm로 되었을 때 on/off ratio가 10^3 으로 감소하였으며, 11 mm에서 bridge에 crack이 생기면서 파괴가 발생하였다. ZnO TFT의 bendability는 bending radius 12 mm, normal strain 0.78%에서 안정적인 신뢰성과 flexibility를 보여주고 있음을 알 수 있다. 또한 bending radius 20 mm에서 반복굽힘응력시험(fatigue test)을 진행한 결과 2000회의 반복 시험에서 ZnO TFT가 안정적으로 동작하는 것을 확인할 수 있었다.

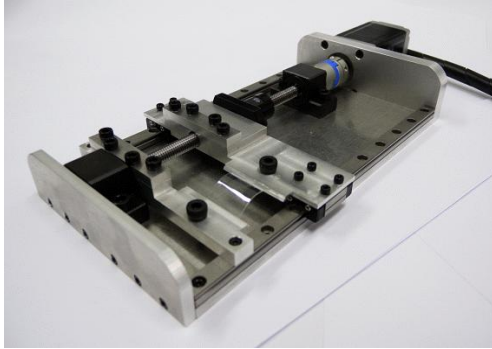


Fig. 3 Bending machine

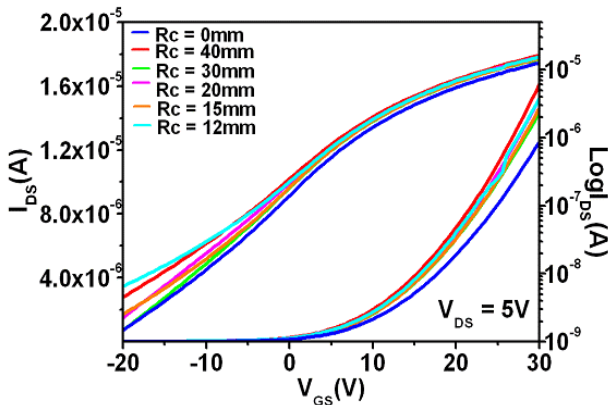


Fig. 4 Transfer curve of ZnO TFT at each bending radius

4. PET에 전사된 ZnO TFT의 파괴모드

ZnO TFT의 파괴는 Bending radius 11 mm에서 bridge에 crack이 생기면서 발생하였다. Transfer curve가 bending radius 별로 큰 차이를 보이지 않음에도 불구하고 갑자기 파괴된 이유는 ZnO TFT의 주요 재료인 SiO₂, ITO, ZnO가 brittle한 물질이기 때문이라고 판단된다. Fig. 5는 파괴된 ZnO TFT의 파괴된 형상과 bridge부분의 crack 발생 지점을 나타내고 있다. SiO₂로 이루어진 bridge에서 발생한 crack이 ITO전극으로 전달되어 ITO전극의 crack을 유발하는 것으로 판단된다. Fig. 6은 ZnO TFT의 bridge부분의 응력 분포를 관찰하기 위한 응력수치해석 결과이다. Maximum stress는 bridge pad의 끝 부분에서 집중적으로 발생함을 볼 수 있다. 이러한 bridge 형태의 구조에서 crack 발생을 줄이기 위해서는 bridge와 몸체의 interconnect 부분에 fillet형식의 구조 설계가 필요하다고 판단된다.

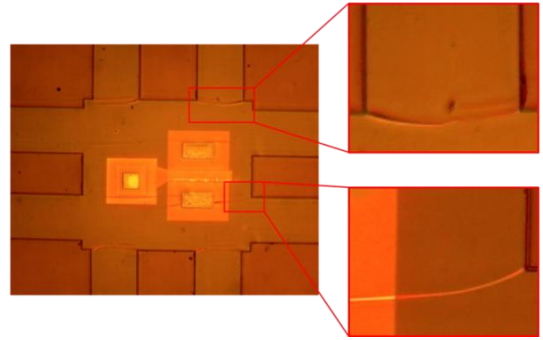


Fig. 5 Cracks occurred at the bridges(Microscope Image)

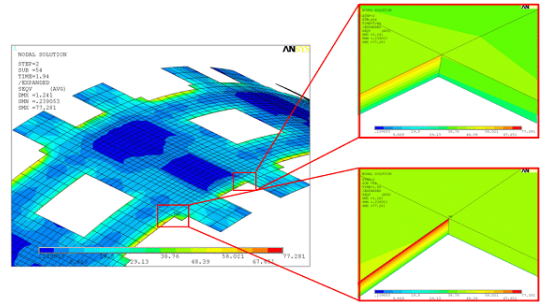


Fig. 6 Simulated maximum stress point around cracks area

5. 결론

본 연구에서는 transfer printing 기술로 제작된 투명 ZnO TFT가 폴리머 기판에 부착되었을 때 발생하는 bendability 특성 및 파괴특성에 대해서 연구를 수행하였다. ZnO TFT의 전기적 특성은 bending radius 40~12 mm까지 큰 변화를 보이지 않고 안정적인 결과를 보였다. 또한 2000회의 fatigue test에서도 안정적으로 작동함을 보였다. Bending radius 11 mm에서 bridge부분의 SiO₂의 crack으로 인한 ITO전극의 파괴를 볼 수 있었고, 해석을 통하여 살펴본 결과 bridge부분에 집중적인 stress가 발생함을 알 수 있었다. 차후 이러한 bridge구조의 crack 발생을 줄이기 위해서는 fillet형식의 구조가 필요하다고 판단된다.

후기

본 연구는 지식경제부, 산업원천기술개발산업의 일환인 "3차원 멀티스케일 구조물 제작기술 개발"의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. J-H, Ahn, et al., "Heterogeneous Three-Dimensional Electronics by Use of Printed Semiconductor Nanomaterials," Science, 314, 1754-1757, 2006.
2. D, Kim, et al., "Stretchable and Foldable Silicon Integrated Circuits," Science, 200, 507-511, 2008.
3. M, Gonzalez, et al., "Design of Metal Interconnects for Stretchable Electronic Circuits," Microelectronics Reliability, 48, 825-832, 2008.
4. S-I, Park, et al., "Theoretical and Experimental Studies of Bending of Inorganic Electronic Materials on Plastic Substrates," Adv. Funct. Mater, 18, 2673-2684, 2008