

산화물 TFT 연구 동향

권 장 연 (서울대학교 재료공학부)

I. 서 론

산화물 반도체 물질을 이용한 Thin film transistor (TFT) 소자는 기존의 비정질 Si TFT와 저온 다결정 Si TFT 소자가 가지지 못하는 장점들이 보고되면서 차세대 디스플레이용 소자로 주목을 받고 있다. 산화물 TFT의 주요 디스플레이 응용처로는 다음의 4가지로 요약 될 수 있다. 1) 중대형 AMOLED 2) Flexible display 3) Transparent display 4) 고해상도 AMLCD 용 TFT backplane이 그것이다. AMOLED는 궁극의 디스플레이가 추구하는 거의 모든 성능의 구현이 가능하여 차세대 디스플레이로 주목 받고 있다. 특히 자발광형으로 인한 선명한 화질 및 빠른 동영상 구현 등이 가능하다. 이러한 AMOLED의 소형제품은 2008년 양산 중에 있다. 하지만 중대형 AMOLED의 구현을 위하여서는 이를 구동하는 TFT가 대면적 균일도 및 전류신뢰성이 동시에 만족되어야 한다. 현재 소형 AMOLED에서 사용 중인 저온 다결정 Si TFT의 경우에는 우수한 전류신뢰성 특성을 보이고 있으나 대면적 적용시 균일도 특성의 향상이 필요하다. 한편 비정질 Si TFT의 경우에는 대형 AMLCD 적용을 통하여 대면적 균일도 특성은 검증이 되었으나, 전류신뢰성 특성에 문제점을 가지고 있다. 이에 반하여 산화물 TFT는 대면적 균일도와 전류신뢰성을 동시에 만족할 수 있어 차세대 중대형 AMOLED 적용 가능성을 높이고 있는 실정이다. 두 번째 응용처인 Flexible display 경우에는 열적 내구

성이 유리 기판 대비 열악한 플라스틱 기판 상에 TFT가 구현이 되어야 한다. 기존 Si TFT도 플라스틱 기판 상에 구현하는 기술들이 발표가 되었으나, Si 반도체 물질 특성상 고온 공정을 적용할수록 TFT 소자의 전기적 특성 및 신뢰성 특성이 우수하여 진다. 이에 반하여 산화물 반도체 물질은 우수한 전기적 특성을 얻기 위하여 고온 공정이 요구 되지 않는다. 대부분의 산화물 반도체 물질은 상온 공정을 이용하여 형성하는 있는 것이 이를 대변한다. 이렇게 저온공정에 유리한 산화물 TFT가 향후 flexible display 적용이 가능할 것으로 예상된다.

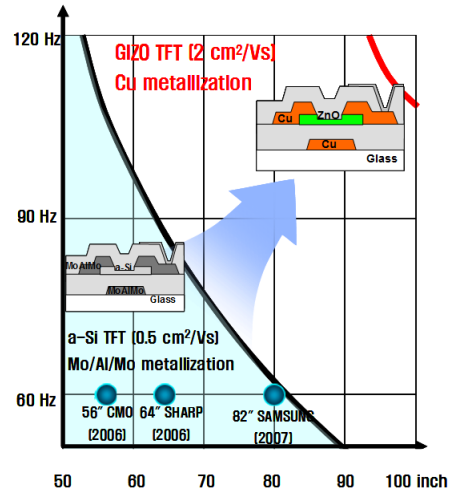
세 번째 응용처는 Transparent display이다. Si 반도체 물질은 가시광 영역을 흡수하여 불투명 하지만 산화물 반도체의 경우에는 상대적으로 높은 Bandgap을 이용하여서 투명한 소자에 적용이 가능하다.

네 번째 응용처로는 고해상도 AMLCD에 적용할 수 있다. 고품질의 영상을 구현하기 위하여 디스플레이의 해상도가 기존 Full high definition (FHD)급에서 Ultra definition (UD)급 이상으로 발전하게 되고, 동영상 품질을 향상시키기 위하여 구동속도 역시 120Hz (초당 120장의 화면 제공)에서 240Hz 이상으로 발전하고 있다. 이러한 고해상도와 고속 구동이 진행됨에 따라서 TFT의 구동속도 역시 증가 되어야 하고, 이를 위하여서는 고이동도의 TFT가 필요하다. 산화물 TFT의 경우 기존의 비정질 Si TFT 대비 높은 이동도를 보여 고해상도 AMMLCD 디스플레이용 구동소자로 적용이 가능하다.

II. 차세대 AMLCD용 TFT

현재 AMLCD TV의 경우 40~50inch 크기, FHD (Full high definition, pixel 개수 약 2백만개), 120Hz (초당 120장의 화면 구현) 구동속도의 제품이 시장의 주류를 이루고 있다. 이러한 AMLCD TV의 향후 발전 방향은 1) 대형화 2) 고해상도화 3) 고속구동화의 세 가지 발전 방향으로 예상된다. 대형화의 경우, 70inch에서 100inch로 크기가 커졌을 경우 화면시야각 (field of view)가 35도에서 49도로 증가하여 유저가 더욱 현실감을 느끼게 된다. 해상도의 경우 현재의 FHD는 약 2000 x 1000개의 pixel로 구현되는데 향후 4000 x 2000개의 UD (Ultra definition) 으로 발전할 것으로 예상된다. 고속 구동의 경우, 구동속도를 60Hz에서 240Hz로 증가할수록 이미지 잔상의 겹침 현상 (blur)의 감소로 인하여 동영상 특성이 우수하여 진다 [그림 1].

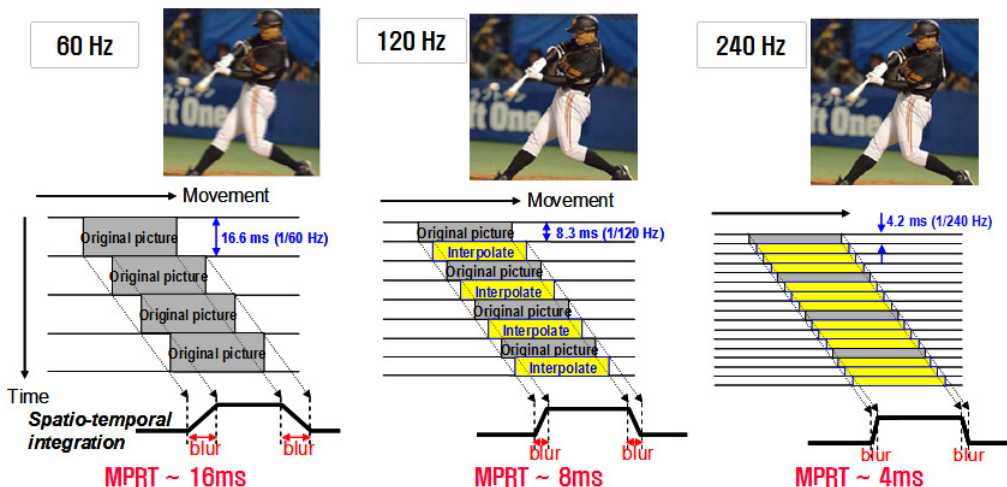
이러한 AMLCD TV가 발전함에 따라 이를 구동하는 TFT는 그 속도가 증가가 필수적이다. 해상도 증가에 따라 주어진 시간에서 구동해야하는 TFT의 개수가 늘어서 1개의 TFT가 동작해야하는 시간 (TFT turn-on-time)이 줄어들게 된다. 또한, 구동속도가 증가하게 되면 한 화면을 구성해야하는 시간 (60Hz의 경우 16.6msec, 240Hz의 경우 4.3msec)을 줄어들어, 이 또한 TFT turn-on-time의 감소를 야기한다. 대형화의 경우 소자를 연결하는 배선의



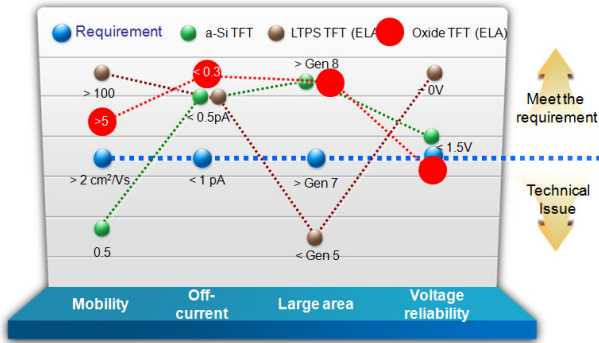
[그림 2] 디스플레이 크기와 구동속도에 따른 요구 TFT 이동도 (해상도는 UD급으로 고정)

길이가 길어져 저항이 증가하고 이는 RC delay의 증가로 이루어진다. 이러한 TFT turn-on-time의 감소는 TFT의 속도의 증가를 필요로 하게 되고 결국 TFT 이동도의 증가가 요구되게 된다.

[그림 2]는 UD급 고해상도 AMLCD 디스플레이 구동을 위하여 요구되는 TFT의 이동도를 나타낸 그림이다. 기존 비정질 Si TFT의 구동한계가 검은색 실선으로 표현되었다. 그림에서 알 수 있듯이 디스플레이의 크기가 증가할수록, 구동속도가 증가할수록 이동도가 큰 TFT가 적용되어야 구동이 가능하다. UD급 해상도, 100inch size,



[그림 1] AMLCD 구동 속도에 따른 동영상 특성 향상



[그림 3] 차세대 UD급 AMLCD용 Backplane 비교

120Hz 구동을 위하여서는 적어도 $2cm^2/Vs$ 이상의 이동도가 요구된다.

이러한 UD급 AMLCD 구현을 위한 요구조건과 다양한 TFT의 특성을 [그림 3]에 비교하였다. 파란선 위쪽은 요구조건을 만족하는 특성을, 아래쪽은 요구조건의 만족을 위하여 연구개발이 더 필요한 특성을 의미한다. Conventional 비정질 Si TFT의 경우에는 기언급하였듯이 이동도 특성의 한계로 적용이 어렵다. 저온 다결정 Si TFT의 경우에는 이동도 특성은 우수하나 대면적 균일도 특성이 우수하지 못하여 적용에 한계가 있다. 이에 반하여 산화물 TFT의 경우에는 이동도 및 비정질 형태로 인한 우수한 대면적 균일도 특성을 가지고 있다.

III. 산화물 TFT 소자

1. 산화물 반도체 물질

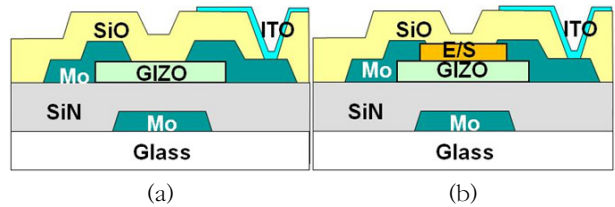
앞서 언급한 장점을 보유한 산화물 반도체 물질로는 ZnO^[1], InZnO^[2], ZnSnO^[3], GaInZnO^[4,5], ZrInZnO^[6] 등이 보고되었다. ZnO 물질의 경우 산화물 반도체 물질 내에서도 상대적으로 높은 이동도 특성을 보이고 있으나 상온에서도 비교적 쉽게 결정화가 이루어져서 대면적 균일도 특성 확보에 관한 연구가 더 필요한 실정이다. InZnO 물질의 경우 증착조건을 제어하여서 일반적으로 나타나는 반도체 특성이 아닌 반도체 특성의 확보가 가능하나 제작된 전기적 신뢰성 특성의 향상이 요구된다. 이에 반하여 GaInZnO 물질의 경우 산업화에서 요구하는 값 이상의 이동도와 우수한 신뢰성을 바탕으로 많은 연구

자에 의하여 연구되고 있는 물질이다. 하지만 In 등의 희귀금속 물질을 사용하기 때문에 궁극적으로는 In이 포함되지 않는 산화물 반도체 물질의 개발이 필요하다.

2. 산화물 TFT 구조

산화물 TFT의 경우에는 TFT 구조 및 공정에 따라 산화물 반도체 막의 전기적 특성이 변화하여 소자 구조에 대한 연구가 중요하다. [그림 4-a]에 Back channel etch 구조로 형성된 산화물 TFT의 도식을 나타내었다. 이 구조는 현재 상업화에 사용되는 비정질 Si TFT의 구조와 동일하여 기존의 설계 및 공정을 활용 할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 Source/Drain 전극의 patterning시에 산화물 반도체 물질의 전기적 특성이 변하게 되는 단점을 가지고 있다^[7]. 이를 방지하기 위하여 wet etching 방법을 사용할 수 있으나 일반적으로 Source/Drain으로 사용되는 금속을 etch하는 acid 용액에 산화물 반도체 물질도 같이 etch되는 문제점이 있다. 뿐만 아니라 이후에 진행되는 passivation 공정에서도 노출된 산화물 반도체 박막의 전기적 제어가 중요하다.

이에 반하여 [그림 4-b]에 나타난 etch stopper 구조의 경우에는 Source/Drain 형성 및 passivation 공정 시에 etch stopper 박막이 산화물 반도체 박막을 보호하고 있어서 상대적으로 안정적인 전기적 특성 확보가 가능하다. 하지만 추가 mask가 필요하다는 단점을 가지고 있다^[8].



[그림 4] 산화물 TFT 구조; (a) Back Channel Etch 구조
(b) Etch Stopper 구조

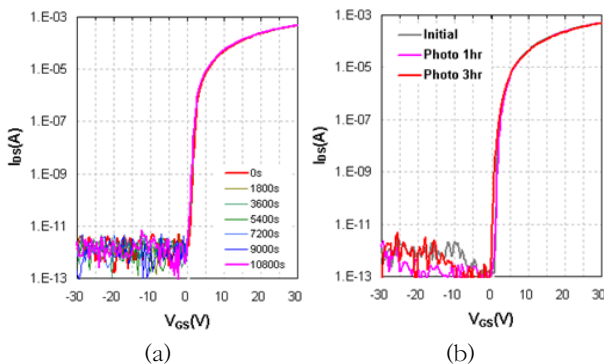
3. 산화물 TFT 신뢰성

산화물 TFT의 신뢰성 평가 방법은 application에 따라 다르다. OLED의 경우에는 TFT에서 공급하는 전류의 값이 display 밝기에 직접 비례하므로 전류의 정확한 제어

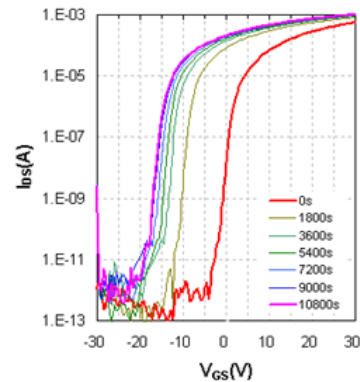
능력이 중요하다. 따라서 OLED용 소자의 신뢰성을 평가할 때는 turn-on 상태에서 일정 전류를 지속적으로 공급하는 능력을 평가하는 constant current 방식이 많이 사용된다.

한편 LCD 응용을 위하여서는 turn-off 상태에서의 신뢰성이 중요하다. LCD를 구동하는 TFT의 경우에는 전체 구동 시간 중 1%이하의 작은 시간 동안에만 turn-on 상태를 유지하고 대부분의 시간이 turn-off 상태로 존재한다. 따라서 off 상태를 잘 유지하는 test인 Negative Bias Temperature Stress (NBTS) test가 많이 사용된다. [그림 5-a]는 산화물 TFT의 NBTS 특성을 나타내었다. Off 전압은 일반적인 구동조건인 -8V보다 강한 -20V의 전압을 가해주어 가속실험을 진행하였다. 그림에서 알 수 있듯이 3시간 경과 후에도 TFT 특성에 큰 변화 없이 안정한 상태를 보여주는 것을 알 수 있다. LCD 구동의 경우 광원이 Backlight unit에서 항상 빛을 가하고 있으므로 TFT의 소자의 빛에 관한 신뢰성 또한 중요하다. [그림 5-b]는 산화물 TFT 소자의 광안정성 test 결과이다. 광조사시에도 역시 안정한 TFT 소자특성을 보여주는 것을 알 수 있다.

하지만 실제 LCD 구동조건은 전기적 stress와 광학적 stress가 분리되지 않고 동시에 가해지는 상황이므로 이러한 환경에서 안정한 TFT 소자가 요구된다. [그림 6]은 전기와 빛이 동시에 가해지는 상황에서의 산화물 TFT 안정성을 평가한 결과이다. 한 가지 stress만 가해졌을 경우와는 달리 TFT 특성이 음의 방향으로 이동하는 것을 알 수 있다^[9]. 이는 절연체 내부 혹은 반도체와 절연체 계면에



[그림 5] 산화물 TFT 신뢰성 특성; (a) 전기적 신뢰성
(b) 광학적 신뢰성



[그림 6] 산화물 TFT 전기광학적 신뢰성 특성

positive charge가 생긴 것으로 생각할 수 있다. 빛에 의하여 생성된 hole이 반도체 내부에 존재하는 defect state에 자리 잡고 걸어준 전기적 bias에 의하여 가속되는 현상으로 이해할 수 있다.

IV. 향후전망

산화물 반도체 TFT는 기존의 Si 기반의 TFT가 가지지 못하는 장점들을 가지고 있어서 고속구동이나 고안정성을 요구하는 차세대 디스플레이용 소자로 적합할 것으로 예상된다. 하지만 앞서 설명한 빛과 전기가 동시에 가해진 상황에서의 안정성 등 아직 해결해야할 기술적 문제가 남아 있다. 뿐만 아니라, 기본적인 산화물 반도체 물질 및 소자 거동에 대한 이해도가 부족하다. 기존 Si 반도체 물질의 경우 수십 년간의 다양한 연구개발로 인하여 물질의 다양한 특성에 대한 이해도가 우수한 상황이다. 이러한 물질 거동에 대한 이해 부족은 향후 산업화 및 연구 개발 과정에서 발생할 수 있는 이상거동에 관한 대처가 힘들게 된다. 폭넓은 재료 및 소자에 대한 이해야 말로 새로운 반도체 소자의 다양한 응용에 필수적이 요소일 것이다.

참고 문헌

- [1] E. Fortunato, P. Barquinha, A. Pimentel, A. Goncalves, A. Marques, L. Pereira, R. Martins, Adv. Mater. 17, 590,(2005)

- [2] B. Yaglioglu, H. Y. Yeom, B. Beresford, D. C. Paine, Appl. Phys. Lett., **89**, 062103. (2006)
- [3] D. Hong, H. Q. Chiang, J. F. Wager, J. Vac. Sci. Technol. B, **24**, L23. (2006)
- [4] H. Yabuta, H. Sano, K. Abe, T. Aiba, T. Den, H. Kumomi, K. Nomura, T. Kamiya, H. Hosono, Appl. Phys. Lett, **89**, 112123. (2006)
- [5] J. K. Jeong, J. H. Jeong, H. W. Yang, J.-S. Park, Y.-G. Mo, H. D. Kim, Appl. Phys. Lett., **91**, 113505. (2007)
- [6] J.-S. Park, K. Kim, Y.-G. Park, Y.-G. Mo, H. D. Kim, J. K. Jeong, Adv Mater. , **21**, 329. (2009)
- [7] K.-S Son, T.-S. Kim, J.-S. Jung, M.-K. Ryu, K.-B. Park, B.-W. Yoo, J. Y. Kwon, Electrochem. Sol. Stat. Lett., **12**, H26 (2008)
- [8] J. Y. Kwon, J.-S. Son, J.-S. Jung, K.-H. Lee, J. S. Park, T.-S. Kim, K. H. Ji, R. Choi, J. K. Jeong, B. Koo, S. Y. Lee, Electrochem. Sol. Stat. Lett., accepted (2010)
- [9] K.-H Lee, J.-S. Jung, K.-S. Son, J. S. Park, T. -S. Kim, R. Choi, J. K. Jeong, J. Y. Kwon, B. Koo, S. Y. Lee, Appl. Phys. Lett. **95**, 232106 (2009)

저 자 약 력

권 장 연



- 1997년 : 서울대학교 금속공학과 공학사
- 1999년 : 서울대학교 재료공학부 공학석사
- 2002년 : 서울대학교 재료공학부 공학박사
- 2009년 : 삼성종합기술원 책임연구원
- 2010년 : 삼성종합기술원 수석연구원
- 2010년~현재 : 서울대학교 재료공학부 연구교수
- 관심분야 : 산화물 TFT, 투명 electronics, AMOLED, flexible electronics