

투명디스플레이 기술 동향

박정희 / 한국전자통신연구원

흑백 브라운관 TV (CRT : cathode ray tube)가 1924년에 처음 개발된 이후 현재에 이르기까지 디스플레이는 진화를 거듭해오고 있다. 브라운관 TV를 디스플레이 기술의 제 1의 물결이라고 한다면 TFT-LCD, PDP, AMOLED 등의 평판디스플레이는 제2의 물결에 해당되며, 종이처럼 얇고, 휘어질 수 있으며 전력 소모가 아주 낮을 뿐만 아니라 야외에서의 시현성이 우수한 플렉시블 디스플레이는 제 3의 물결에 해당되며, 친환경적이면서 현실감이 있고 인간과 상호작용적이어서 편의성이 결

합된 3D 디스플레이는 디스플레이 진화의 궁극적 목표에 해당되는 제 4의 물결에 해당된다.

새로운 가치가 부가된 디스플레이의 추구하고 더불어 최근에는 투명한 디스플레이가 개발되고 있다. 이는 유리창 등에 embedded 된 건물 일체형의 대형 디스플레이부터 디자인 추구형의 모바일용 전자 기기 등 소형에 이르기까지 다양한 제품군에 널리 이용될 것으로 예상되고 있다. 이에, 최근에 개발되고 있는 투명 디스플레이의 기술 동향에 대해 간단하게 설명한다.

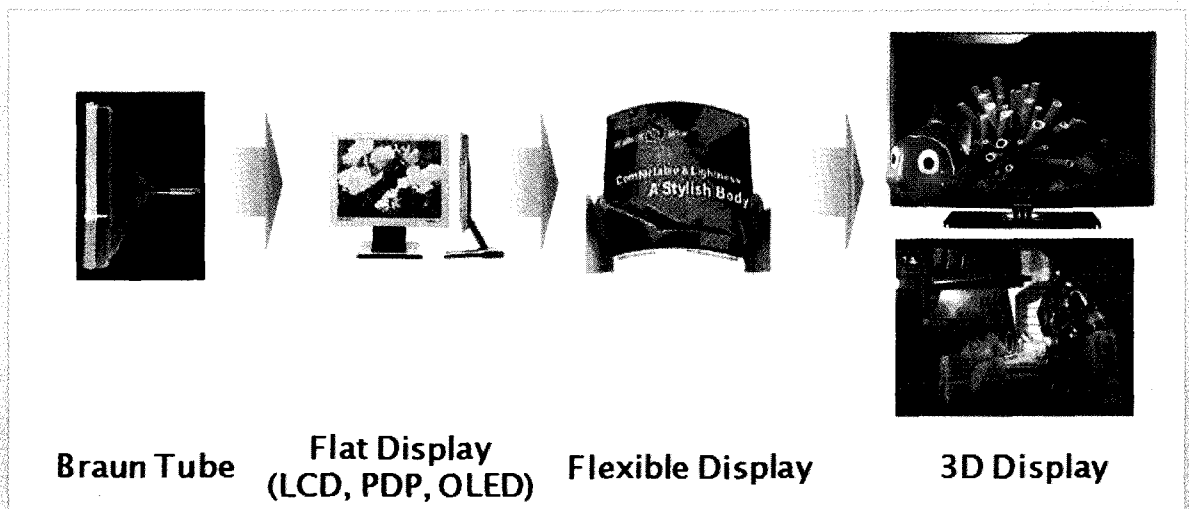


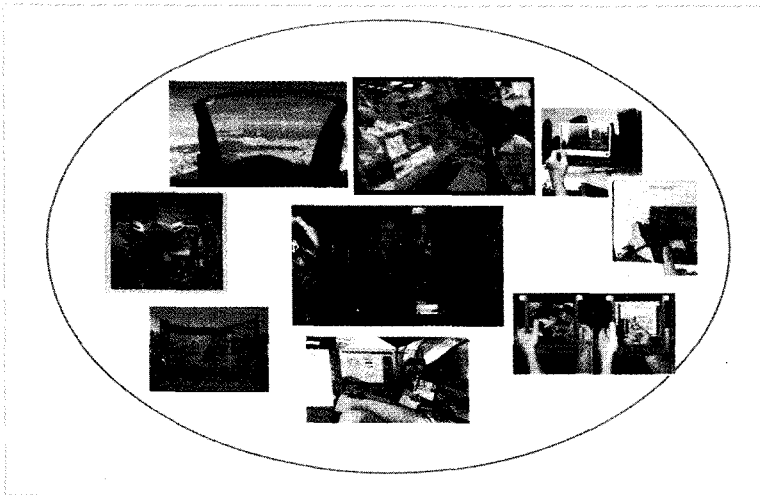
그림 1 디스플레이의 개발 동향

1. 투명 디스플레이 개요

1.1. Passive matrix 투명디스플레이

현재까지 개발된 디스플레이 모드 중에서 투명하게 구현할 수 있는 것은 무기 박막전계발광 디스플레이 (Thin Film- Electroluminescent Display) 와 OLED

(Organic Light Emitting Diode)가 있다. 이들은 TFT (thin film transistor) 가 없이도 화소 하나하나를 구동할 수 있는 passive matrix 방식으로 구동이 가능하므로 투명한 발광소자 재료 및 투명 전극으로써 제작 시, 디스플레이 전체를 투명하게 만들 수 있다. 기본 소자 구조는 그림 2와 같다. 무기 박막 전계발광소자의 경우는 청색 발광재료의 효율이 낮아 천연색 구현이 용이하지 않으며 OLED 의 경우도 passive matrix 구동 시 고해상도, 고휘도를 구현하는 데 한계가 있어 그림 3에서 보는 것처럼 단순한 기능의 제품만 시장에 진입한 상태이다.



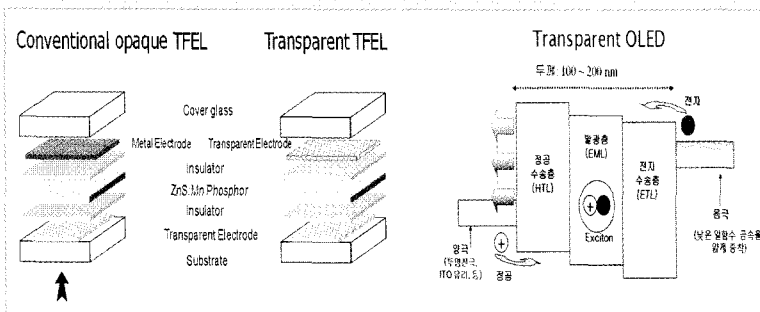
투명 항공, 광고, 개인용 전자기기, 공공용, 군사용 등에 적용 가능한 투명디스플레이의 예

1.2. Active Matrix 투명 디스플레이

1.2.1. 투명 TFT 기술

앞서 투명디스플레이 모드로서 무기 박막전계발광 소자와 OLED 를 소개했는데, 이중 무기 박막전계발광 소자는 고전압 구동이 필요하며 이를 위해서는 SOI 기판을 사용해야 하므로 투명 AM-ELD 를 구현하는 것은 기술적으로 상당히 어려우며 현재까지 보고된 바가 없다. 반면, OLED 는 저전압 구동이 가능하며 유리 기판에서 제작이 가능하고 또한 동영상 을 포함한 high information display 의 구현이 가능하므로 최근에 투명디스플레이 구현을 위해 가장 많이 연구되어 왔다. 이제부터 언급되는 투명 디스플레이는 모두 AM-OLED 에 해당하는 것이다.

Passive matrix 투명 디스플레이의 경우 투명 배선과 발광소자만 필요한 반면 active matrix 의 경우는 화소 하나하나에 전기적 신호를 보내는 TFT도 모두 투명해야 디스플레이



무기 박막 전계발광소자와 OLED 소자의 구조도

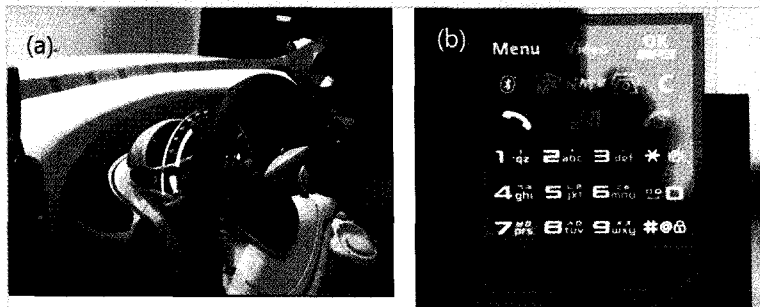


그림 4 투명 무기 박막 전계발광소자 제품(planar system) (a)와 휴대폰 키패드에 장착된 투명 OLED (네오뷰코어링)

● 기획 시리즈

레이 전체의 투명도를 높일 수 있으므로 무엇보다 이의 구현을 위해서는 투명 TFT array 가 필요하다. 현재 휴대폰이나 MP3 등의 디스플레이에 사용되고 있는 OLED의 구동에 이용되는 LTPS 는 Si 반도체를 사용하고 있으므로 투명하지 않다. 그러나 SMD 에서는 재료 및 공정은 기존 OLED 공정과 동일하게 적용하되, TFT 및 Pixel 설계의 최적화를 통해 기존 Pixel을 발광부와 투명부로 분할함으로써 투명도 30%를 달성하였다. 그림 5는 2009년 SMD 가 SID 에 전시한 LTPS 와 금속 배선을 사용하여 제작한 12인치의 투명 AM-OLED 이다. 이를 유리창에 integration 함으로써 새로운 기능의 투명창의 가능성을 보여주었다.

이와 유사하게 LGD 에서는 실제와 정보를 한꺼번에 결합하여 표현할 수 있는 See-Through type의 Display 를 개발하여 SID 09 에서 전시하였다.

그러나, 고해상도의 투명도가 높은 투명 디스플레이를 제조하기 위해서는 불투명한 Si 을 대체할 수 있는 투명한 반도체가 필요한데 현재까지 산화물 반도체가 가장 많이 연구되어 왔다. 1996년도에 강유전체를 이용한 투명산화물 반도체가 발표된 후 1 일본의 Hosono 교수 그룹에서는 IGZO 반도체를 이용하여 제작한 TFT 를 발표하였고 2 미국의 Wager 교수는 ZnO 를 반도체로 사용한 투명 TFT 를 발표하였다. 3 이 후 최근 몇년 동안 산화물 TFT 는 비약적인 기술의 발전을 이루었으며 스퍼터링법으로 다조성계 산화물 반도체를 증착하여 제작한 산화물 TFT 는 대면적 공정이 용이하고 이동도가 우수하며 또한 전기적 신뢰성도 우수하여 OLED 의 구동소자로 적합한 것으로 알려졌다. 4,7 그림 6은 ETRI 에서 발표한 다조성

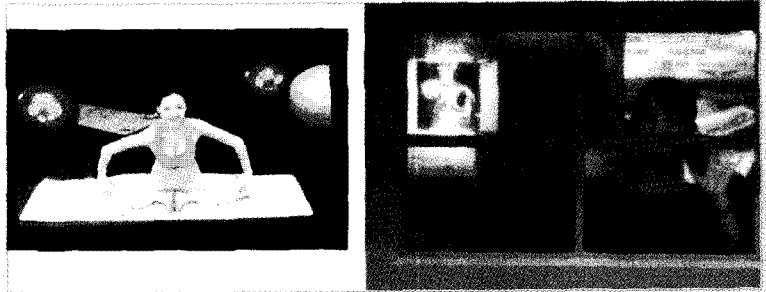


그림 5 금속배선과 LTPS를 이용하여 제작한 투명 AM-OLED(투과도 30%)

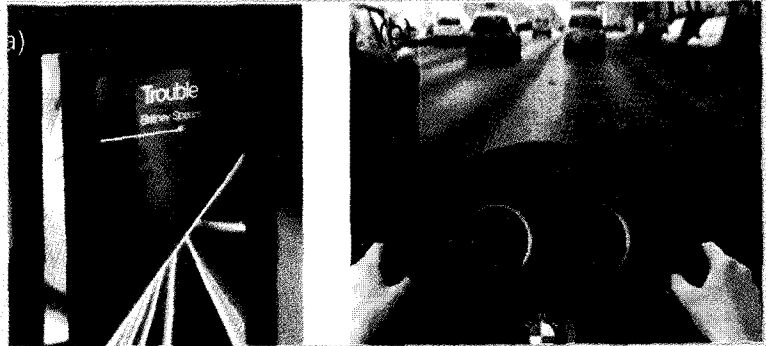


그림 6 (a)두개의 패널 정보가 결합된 투명 디스플레이(LGD)(b)환경의 정보와 투명 디스플레이 정보가 결합된 sec-through type의 가상 차량용 투명 디스플레이

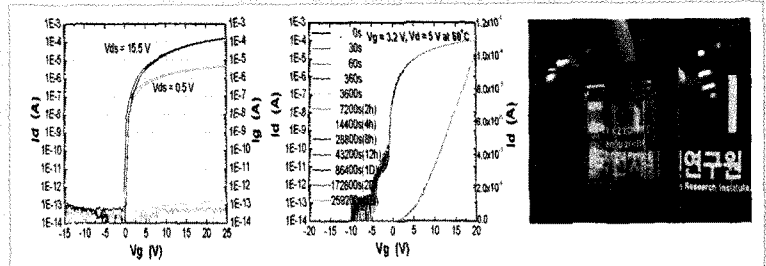


그림 7 AZTO TFT의 transfer curve, bias temperature stability(@60°C) 그리고 이를 이용하여 제작한 투명 AM-OLED(투과도 58%)

계 비정질의 AZTO TFT의 전기적 특성 및 이를 이용하여 제작한 투명 AM-OLED 를 보여준다. 8 TFT의 이동도는 12 cm²/Vs, Sub-threshold swing 은 0.12 V/dec 이며 60°C에서 Vg = +3.2 V, Vd = 5 V 를 72시간 동안 가했을 때의 Vt shift 는 0.12 V 에 불과했다. 투명 전극과 투명 반도체를 이용하여 제작한 TFT array 의 투과도는 85% 이상이며 패널의 투과도는 59% 이다. 패널 투명도의 감소는 주로 OLED cathode에 기인하는 것으로 이는 광학 설계를 통하여 투명도를 80% 이상으로 향상시킬 수 있다.

산화물 TFT의 우수한 전기적 특성에도 불구하고 투명

디스플레이의 양산 적용을 위해서 해결해야 할 몇가지 문제점들은 안고 있다. 우선, 산화물 반도체의 밴드갭은 3 eV 이상이므로 가시광선에서의 투과도를 확보하여 다양한 응용제품으로 사용이 가능하지만 밴드갭 내의 산소 vacancy 혹은 interface에서의 defect 등으로 인하여 강한 가시광선이나 UV 에 의해 광전류를 발생하며 negative bias 를 가하면서 광을 조사 시, Von 전압을 음의 방향으로 이동시키는 문제를 야기한다.⁹ 아직까지 이러한 현상에 대한 정확한 메카니즘은 규명되고 있지 않으나 밴드갭 내의 에너지 준위들의 양을 줄여야 한다고 공감하고 있다. 투명 디스플레이는 자체발광에 대한 노출, 외부의 가시광선 및 UV 등에 지속적으로 노출이 되므로 광신뢰성을 확보하는 것은 투명 AM-OLED 의 제품개발에 가장 중요한 이슈가 아닐 수 없다.

둘째로, OLED 패널의 경우, 특히 대면적의 경우 전류의 흐름에 의한 열이 발생하게 되며 이에 따른 TFT 의 열화를 고려해야 한다. 일반적으로 밴드갭이 넓은 반도체의 경우 conduction band 와 Fermi level의 차이는 Si 에 비해 클 수밖에 없으며 이들 차의 지수 함수꼴로 나타나는 온도에 대한 민감성도 클 수밖에 없다. 그러므로 패널내의 온도가 상승 시, TFT 의 변화는 야기될 수밖에 없으므로 이에 대한 보상 설계 등이 필요하게 된다.

세째로, 산화물 반도체는 수분, 산소 등의 환경에 민감하다. 이는 산화물 반도체의 주요 캐리어가 산소 vacancy, H 등에 의해 생성이 되기 때문에 습한 공기 노출에 의해 쉽게 캐리어를 증가시킴으로써 TFT 특성을 악화시킨다. 산화물 반도체 내의 캐리어양의 조절은 아주 중요하고도 어려운 문제이다. 이는 산화물 반도체막의 증착 공정에만 지배를 받는 것이 아니라 반도체 증착 전/후 공정 및 반도체와 인접한 박막과의 상호작용, 그리고 소자가 제작 된 후의 환경에 의해서도 영향을 받기 때문이다. 특히 산화물 TFT 의 캐리어양과 이동도와 의 상관관계를 고려 시, 모든 공정 이후에 10¹⁶ 정도의 적정 수준의 캐리어를 가질 수 있도록 공정을 최적화 하는 것이 중요하다. 그러기 위해서는 특히 bottom gate 소자의 경우 passivation layer 공정이 매우 중요한데 이는 barrier 특성이 우수한 passivation layer 를 증착하기

위해 공정 온도를 올리면 H 의 incorporation 에 의한 캐리어 증가를 수반하는 trade-off 가 있기 때문이다. 그러나 AM-OLED 의 경우 OLED 의 열화를 막기 위한 패널 자체의 packaging 으로 인하여 산화물 TFT가 저절로 보호를 받을 수 있기 때문에 오히려 passivation layer 에 대한 부담을 덜 수 있는 이점이 있다.

마지막으로 OLED 자체의 광/열에 의한 열화이다. 빛과 열에 의한 OLED 수명을 최소화 할 수 있는 재료 개발, 소자 구조 개발 등이 필요하다.

1.2.2. 투명 배선 기술

투명 디스플레이에서 반도체만을 투명한 재료로 전환 시, 실제적인 투명도 향상은 해상도에 따 조금씩 다르겠지만 5% 미만인 것으로 알려졌다. 투명도 향상에 있어 가장 중요한 factor 는 gate 전극과 S/D 전극의 투명도이다. 그러나, 전류로 구동되는 OLED 의 경우, 투명도를 확보하기 위해 고저항의 투명전극을 사용 시 RC delay 로 인해 4인치 QVGA 이상의 패널 제작은 어렵다고 보고되었다. 그러므로, 저저항의 투명배선의 개발은 투명디스플레이 개발에서 가장 중요한 요소기술이라 하겠다.

가장 많이 연구된 고투과 저저항 배선 기술은 산화물/금속/산화물 (OMO)의 삼층구조를 형성하는 것으로 이때 사용하는 금속은 10 nm 의 Ag 이며 산화물은 응용에 따라 여러가지 종류를 선택 사용할 수 있다. OMO 의 경우 100nm 두께에 2오姆의 면저항을 확보할 수 있으나 공정상의 가장 중요한 이슈는 패터닝 기술이다. 왜냐하면 얇은 Ag 와 두꺼운 산화물을 동시에 에칭 시, Ag 의 over etching 이 심각하게 발생하기 때문이다. 그러므로 적절한 에천트의 개발도 동시에 진행되어야 한다.

한편 저항이 낮은 금속보조 전극을 사용하는 경우도 있다. 이 경우 투과도가 줄어드는 것을 염려 해야 하지만 실제로 Al alloy를 5 μm 선폭으로 100nm 두께로 형성하여도 TFT array 의 투과도가 거의 줄어들지 않은 결과가 보고되었다.¹⁰ 특히 대면적 디스플레이의 경우 전극의 면적도 커지지만 동시에 발광 화소의 영역도 충분히 확보 가능하므로 대면적의 경우는 보조전극의 사용으로 투과도도 확보하고 RC delay 로 막을 수 있을 것으로 여겨진다.

2. 투명디스플레이 연구동향

산화물 TFT 를 이용한 투명 전자 소자에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 반면, 투명디스플레이의 개발은 아직까지는 산화물 TFT 에 비해 크게 주목을 받지 못하고 있다. 이는 투명디스플레이의 killer application 을 제대로 찾지 못한 것이 가장 큰 이유로 여겨진다. 그럼에도 불구하고 디스플레이의 진화와 더불어 새로운 가치가 부가 되고 새로운 디자인을 추구할 수 있다는 기대와 함께 투명디스플레이에 대한 연구는 지속되고 있다.

국내에서 투명 PM-OLED 는 네오뷰코오롱에서 가장 앞선 기술을 자랑하고 있으며 휴대폰의 키패드, 투명 키보드, 차량용 디스플레이 등을 PM 방식으로 개발하고 있다. 미국의 플라나사는 ZnS:Mn 를 이용한 투명 박막 전계발광소자를 제작하여 현재에도 시판하고 있다. AM-OLED 의 경우 ETRI 에서 ZnO-TFT 로 구동된 투명 AM-OLED 를 SID 2006 에 세계 최초로 발표하였으며 연이어 삼성 SDI 에서 IGZO TFT 와 금속 배선을 이용한 투명 디스플레이를 IMID 2007 에 발표하였다. 그 이후 LTPS 를 이용한 저투과도의 투명 디스플레이가 SMD 와 LGD 등에 의해 개발되고 있다. 2009 년에는 양면터치 패널이 외장 된 투명디스플레이를 ETRI/SDT 공동으로 개발하여 추후 게임기 등의 시장 진입 가능성을 열었다.

3. 결 론

디스플레이는 소비자의 필요에 의한 개발 보다는 공급자가 소비를 주도하는 경우가 오히려 더 많은 역사를

가지고 있다. 기술과 시장이 점점 더 포화되어 가고 있는 이때에 인간과의 상호작용성이 더욱 강조되고 새로운 가치를 부여할 수 있는 제품의 개발로써 디스플레이 시장에 새로운 산업 가치를 창출해야 하고 그러기 위해서 투명디스플레이는 많은 잠재력을 가지고 있다고 여겨진다, Si 을 기반으로 하는 디스플레이와는 달리 단기간에 엄청난 기술의 도약을 이룬 산화물 TFT 를 기반으로 하는 투명 디스플레이의 발전을 위해서는 더 많은 physics 의 이해도 필요하며 동시에 제품 개발자들의 많은 resource 투여로 시장 진입에 성공해야 할 것이다.

참고 문헌

- 1) M.W.J. Prins et al. Appl. Phys. Lett. 3650 (1996)
- 2) K. Nomura et al., Nature, vol 432, 488 (2004)
- 3) J. Wager et al., Science, vol 300, 1245 (2003)
- 4) P. F. Carcia et al., App. Phys. Lett., 82, 1117 (2003).
- 5) E. M. C. Fortunato et al., Appl. Phys. Lett. 92, 222103 (2008)
- 6) H. N. Lee et al. SID, May, 2007, 68.2
- 7) S.-H. K. Park et al. e-MRS 2007
- 8) S.-H. K. Park et al. SID 2009
- 9) J.-H. Shin et al., ETRI Journal 31, 62 (2009).
- 10) M. Ito et al., FPD International 2009 workshop