

# 차세대 디스플레이 기술

문 대규

전자부품연구원 디스플레이연구센터

451-865 경기도 평택시 진위면 마산리 455-6

## Advanced Display Technology

### I. 서 론

멀티미디어 및 인터넷의 기술의 발전과 더불어 브라운관 중심의 디스플레이 기술은 평판디스플레이 기술로 발전하였으며, 유비쿼터스 및 디지털 컨버전스 기술의 발전은 무기물을 중심으로 한 평판디스플레이 기술로부터 유기물을 중심으로 한 플렉서블 디스플레이 기술로 디스플레이 기술의 진화가 예상된다.

플렉서블 디스플레이는 90년대 후반 주로 저가형 수동구동 방식을 이용한 디스플레이를 중심으로 발전해 왔으나 현재에는 능동구동 방식을 이용한 디스플레이로 방향이 전환된 상태이다. 플렉서블 능동구동 디스플레이 기술은 크게 두 가지 형태로 진보하고 있는데, 우선 기존의 비정질 및 다결정 실리콘 박막 트랜지스터 기술을 플렉서블 기판에 적합하도록 개선하는 기술이 개발되고 있으며, 또한 active layer를 기존의 실리콘 대신 pentacene, P3HT (Poly (3-hexylthiophene)) 등과 같은 유기 반도체로 대체한 유기 박막 트랜지스터 기반의 플렉서블 디스플레이 기술 개발 역시 최근 들어 활기를 띠고 있다. 비정질 실리콘 기술을 적용한 플렉서블 능동구동 액정디스플레이 (AMLCD) 및 전자종이(Electronic paper) 시제품은 이미 90년대 후반부터 발표되기 시작되었으며, 이후 일본을 중심으로 미국, 한국 등에서도 많은 시제품들을 선보였다. 최근에는 Transfer 기술을 이용한 플렉서블 기판의 저온 폴리 실리콘 (LTPS) TFT AMLCD, AMOLED 등도 선보였다.

하지만 현재 플렉서블 기판의 디스플레이 관련 기술을 확립시키기 위해서는 몇 가지 극복해야 할 문제점들이 있다. 첫째, 고분자 필름을 기판으로 사용할 경우 공정 중에 bending이나 유기물과 무기물의 열팽창계수 차이에 의하여 잔류응력이 발생하여 박막에 크랙 등의 손상이 발생하게 된다. 잔류 응력을 줄이기 위해 pre-annealing, barrier layer, encapsulation layer 등 다양한 방법들이 연구되고 있지만 무기물을 사용할 경우 어느 정도의 특성 저하는 감수해야 한다. 하지만 기존의 무기물 대신 유기 전극, 유기 절연체 등을 사용하여 전유기 디스플레이 소자를 제

작할 경우 이와 같은 문제점들은 대부분 해소될 수 있을 것으로 보이나 아직까지는 기반 기술들의 한계로 당분간은 Hybrid 형태로 진행될 것으로 예측되고 있다.

두 번째 문제점은 고분자 기판의 투습율 및 투산소율과 관계가 있다. 고분자 기판은 유리 기판에 비해 매우 큰 투습율 및 투산소율을 가지고 있다. LCD나 OLED의 경우 산소 및 수분에 노출될 경우 특성 저하가 급속히 일어나기 때문에 소자의 수명 향상 및 신뢰성을 위해서는 투습율 및 투산소율 감소는 필수적이다. 현재 고분자 기판상에 multi-layer를 코팅하는 방식으로 많은 특성 향상이 이루어 졌지만 아직까지는 유리 기판에 비해 특성이 떨어지는 것을 사실이다. 하지만 향후 관련 기술의 꾸준한 향상으로 기계적으로도 특성이 우수하며 barrier layer로서도 특성이 뛰어난 필름이 나올 것으로 예상된다.

앞서 언급했듯이 현재 플렉서블 디스플레이는 두 가지 형태로 발전하고 있다. 본 논문에서는 주로 현재까지 개발된 플렉서블 능동구동 디스플레이 제작 관련 기술을 중심으로 현재 기술 추이를 다루고자 한다.

### II. 기술 동향

#### 2.1 비정질, 다결정 실리콘 TFT 기반 플렉서블 능동구동형 디스플레이

비정질 실리콘 TFT backplane을 이용한 플렉서블 디스플레이로는 전자 종이 및 AMLCD 등이 있다. 전자종이는 고분자 기판 대신 얇은 steel sheet를 기판으로 사용하며 그 위에 비정질 실리콘 TFT backplane을 형성하여 electrophoretic ink를 구동하게 된다. E-Ink에서는 지난 2002년 5인치급의 4,096 컬러 디스플레이(320xRGBx234, 80ppi) 시제품을 선보였고 최근에는 Philips와 함께 high resolution의 모노 타입(160ppi)의 전자 종이 제품 양산에 박차를 가하고 있다. 하지만 아직까지 잔류영상 등 여러 가지 해결해야 할 문제점이 있는 상태이어서 2004년 정도가 되어서야

시장에 나올 것으로 예상된다. 비정질 실리콘 TFT를 이용한 플렉서블 AMLCD 제조 기술을 다른 기술에 비해 상당히 성숙된 상태이다. 이미 90년대 후반부터 시제품이 등장하기 시작했으며 현재에는 거의 일반적인 기술로 인식이 되어 가고 있다.

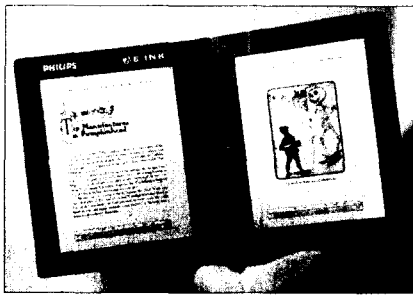


그림 1. 전자종이 (E-Ink)

최근의 추세는 Transfer 기술을 이용한 플렉서블 LTPS-TFT 능동구동 디스플레이로서 주로 Sony, Seiko-Epson이 이 분야에서 주도권을 가지고 있다. LTPS-TFT 기술을 적용할 경우 기판 상에 gate driver, signal driver, D/A converter 등의 integrated circuit(IC)를 실장할 수 있기 때문에 비정질 실리콘 TFT를 이용할 경우보다 한 차원 높은 수준의 플렉서블 디스플레이를 구현할 수 있다. 이 기술의 핵심은 유리 기판 상에 제작한 패널을 고분자 기판으로 transfer하는 기술인데, Sony에서는 유리 기판에 제작된 패널을 우선 다른 기판에 접착제로 붙인 후 유리 기판을 식각하고 다시 고분자 기판에 접착하는 방식을 사용하고 있으며, Seiko-Epson에서는 XeCl laser를 이용한 SUFLA® (Surface Free Technology by Laser Ablation/Annealing) 방식을 채택하고 있다. 아래 그림은 최근에 Sony에서 발표한 LTPS-TFT를 채택한 플렉서블 AMLCD 및 Seiko-Epson의 LTPS-TFT 플렉서블 AMOLED의 시제품이다.

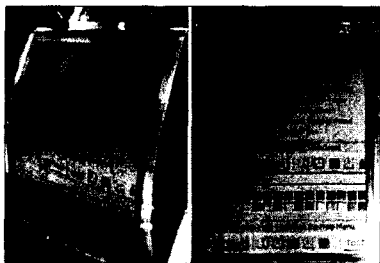


그림 2. 플렉서블 LTPS AMLCD (Sony)

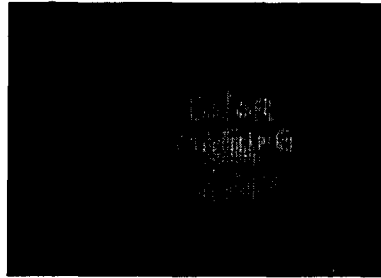


그림 3. SUFLA®, Ink-Jet 기술을 적용한 플렉서블 LTPS AMOLED (Seiko-Epson)

## 2.2 유기 박막 트랜지스터 기반 플렉서블 디스플레이

유기물 반도체를 이용한 유기 박막 트랜지스터(OTFT) 개발은 80년대 후반부터 시작되었지만 최근에 들어서야 가시적인 결과가 나타나기 시작했다. 하지만 기존의 비정질 실리콘 기술에 비해 아직까지는 관련 기술 및 재료 등이 뒷받침해주지 못하고 있어서 실제 제품으로 선보이기까지는 당분간은 힘들 것으로 예상된다. 하지만 유기물만의 고유 특성 때문에 앞으로의 성장 가능성은 무한대이다.

유기 박막 트랜지스터 역시 OLED와 비슷하게 저분자 재료를 이용하는 기술과 고분자 재료를 이용하는 기술로 구분되어 있다. 현재 저분자 물질로는 pentacene이 가장 보편적으로 사용되고 있는데 이는 pentacene의 경우 비정질 실리콘과 비슷하거나 우수한 특성을 보여주기 때문이다. 고분자 재료로는 P3HT, F8T2(Poly(9,9-dioctylfluorene-co-bithiophene))를 중심으로 연구가 되고 있는데 고분자의 경우 pentacene보다는 다소 낮은 특성을 나타내고 있지만 solution process가 가능하기 때문에 향후 플렉서블 디스플레이 제작에 있어서의 궁극적인 목표인 roll-to-roll process가 적용될 수 있다는 장점이 있어 저가격의 디스플레이를 구현해 낼 수 있다.

현재 유기물을 이용한 소자에서 가장 큰 문제점으로 대두되고 있는 것은 소자의 안정성이다. 일반적으로 유기물은 대기 중에 존재하는 산소나 수분에 의해 특성이 급격히 저하되기 때문에 제작 공정 중 산소 및 수분의 차단은 필수적이다. 유기 박막 트랜지스터의 경우 차단막(Passivation layer)으로 PVA (Polyvinyl alcohol), SiO<sub>2</sub> 등을 사용하고 있으며 차단막을 사용할 경우 대기 중에서 이동도, 문턱전압, on/off ratio 변화를 효과적으로 감소시킬 수 있다.

현재까지 발표된 유기 박막 트랜지스터를 이용한 디스플레이는 그리 많지 않다. 그리고 주로 대기업보다는 연구소를 중심으로 발표가 이루어지고 있는 상황이며 아직까지는 모노 컬러급 정도만 발표되고 있다. 최근까지 발표된 디스플레이 패널을 보면 PDLC(Polymer dispersed liquid

crystal)을 이용한 경우가 대부분이다. PDLC를 사용할 경우 별도의 편광판 없이 단순히 전압차에 의해 scattering cross section의 변화만으로 전기광학 효과를 조절할 수 있기 때문이다. 또한 PDLC는 반사형을 사용할 경우 별도의 백라이트 없이도 기존의 LCD에 버금가는 대비비를 얻을 수 있어 전자종이 등의 응용제품에는 매우 유리하다. 하지만 구동전압이 기존의 LCD에 비해 다소 높고 고품질의 디스플레이를 구현하는 데는 어려움이 있다는 단점이 있다.

저분자 재료를 active layer로 이용한 플렉서블 디스플레이 기술은 현재 PSU(Penn. state university), Bell Laboratories 등에서 앞서 있으며 아래 그림은 PSU에서 최근에 발표한 pentacene을 이용한 PDLC 디스플레이 구조와 실제로 구동하는 모습이다. 기판은 125 $\mu\text{m}$  두께의 PEN(polyethylene naphthalate)를 사용했으며 차단막으로는 PVA를 코팅하여 사용하였다. PVA는 차단막 기능 이외에도 pentacene active layer의 패턴을 형성하는 mask 기능도 함께 하고 있다. 우선 pentacene을 전면에 증착한 후 수용성 및 감광성의 특성을 갖는 PVA를 스프인 코팅하고 패턴을 형성하게 된다. 이후 산소 플라즈마 처리를 통해 active layer 패턴 이외의 부분을 식각하게 되면서 active layer 패턴을 형성할 수 있다.

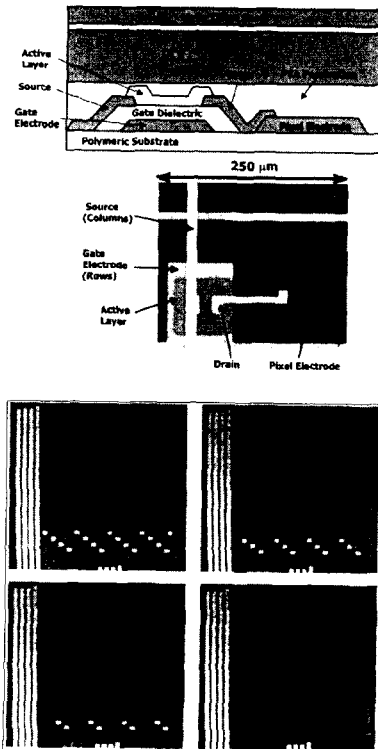


그림 4 : Pentacene OTFT driven PDLC 디스플레이 (PSU)

고분자 재료를 이용하여 능동구동 디스플레이를 최초로 구현한 곳은 Philips이다. Philips에서는 고분자 반도체를 이용하여 유리 기판 상에 능동구동형 PDLC 디스플레이를 구현하였다. 최근에는 Plastic Logic에서 Ink-Jet 기술을 적용한 전유기(All-organic) TFT 및 TFT backplane을 이용한 능동구동형 PDLC 디스플레이를 선보였다. 이 기술은 기존의 Hybrid 형태보다 한 단계 진보한 기술로 전극, 절연체, 반도체를 모두 유기물로 대체하여 디스플레이를 구현한 최초의 시제품이라는 데 의미가 있다. 이 기술은 또한 고분자 패턴 형성을 위해 proprietary surface energy patterning 기술을 사용했는데, 아래 그림과 같이 laser-printing, SAM (self assembled monolayer), UV 조사 등을 통해 표면을 hydrophobic, hydrophilic 형태로 만들어 주게 된다. 이후 수용성의 고분자를 Ink-Jet으로 인쇄하게 되면 Ink droplet은 표면의 hydrophilic한 영역에만 남게 되어 source-drain 등의 패턴을 형성할 수 있게 된다. 고분자 반도체로는 Ink-Jet 인쇄가 가능한 수용성 물질인 F8T2를 사용하였으며 유기 전극으로는 역시 수용성 물질인 PEDOT:PSS를 사용하였다.

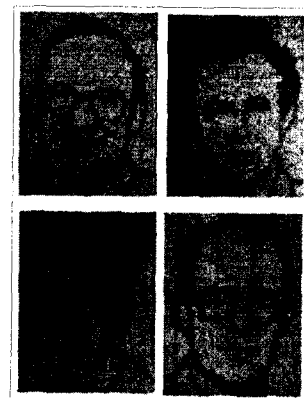
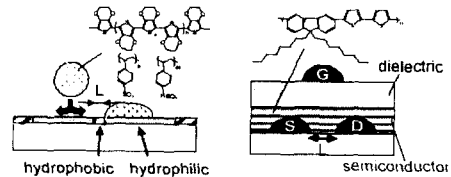


그림 5. Ink-Jet으로 제작한 OTFT 구조 및 OTFT driven PDLC 디스플레이 (Plastic Logic)

P3HT를 이용한 유기 박막 트랜지스터에 대한 연구는 80년대 중반에 시작이 되었으며 90년대 후반 University of Cambridge의 H. Sirringhaus

에 의해 이 물질의 구조적인 특성과 트랜지스터의 전기적 특성 사이에 매우 밀접한 연관성이 존재한다는 것이 밝혀졌다. 이후 많은 연구가 진행되고 있으며 KETI에서는 최근 Rubber stamp printing 기술을 이용한 플렉서블 P3HT TFT AMLCD를 선보였다. Rubber stamping printing 혹은 micro-contact printing 기술을 원래 IBM 및 Bell Lab.등에서 금속막 상에 SAM을 인쇄해 미세 패턴을 형성하는데 사용했던 기술이다. 이 기술 우선 sub-micron size의 미세한 패턴도 단순한 공정으로 쉽게 형성할 수 있을 뿐만 아니라 stamp가 유연하기 때문에 플렉서블 기판에 쉽게 적용할 수 있고 또한 roll-to-roll process에도 적합한 방식이다.

Rubber stamp printing 방식으로 고분자를 인쇄하게 되면 one-step으로 박막 패턴을 형성할 수 있게 된다. 또한 기존의 spin coating 방식으로 제작된 트랜지스터의 특성과 비교해 보아도 오히려 더 뛰어난 특성을 보여주고 있다.

Rubber stamp printing 방식은 다음과 같은 형태로 진행된다. 우선 고분자 반도체를 유기용액에 일정한 농도로 녹여 용액 상태로 만든 후 미리 형성된 stamp를 이용해 기판에 원하는 패턴을 형성한다. Stamp는 패턴이 형성된 master 기판 위에 silicon elastomer인 PDMS 용액을 넣어 curing을 해주면 고체 상태인 stamp가 형성되며, 이후 용액을 stamp 위에 충분히 공급한 후 N2 gas로 blowing 해주게 된다. 그러면 stamp 상에는 얇은 고분자 박막만 남게 되고, 이 stamp를 이미 제작한 기판과 align한 후 접촉하게 되면 박막이 기판으로 전이되게 된다. Printing되는 P3HT 막의 두께는 용액의 농도로 조절이 가능하다.

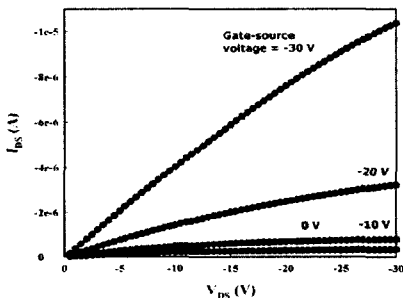


그림 6 : Rubber stamp printing 기술로 제작한 P3HT TFT I-V 특성

박막 형성 방법에 따른 트랜지스터 소자의 특성 변화는 일반적으로 P3HT 막의 배향성에 의존하는 것으로 알려져 있다. P3HT 막은 비정질인 matrix에 부분적으로 결정화가 이루어진 형태로 존재하는데, 이 결정화된 부분의 배향성에 따라서 이동도는 달라지게 된다. P3HT의 thiophene

ring이 기판에 대해 edge-on orientation을 가지게 되면, 즉, P3HT의 side chain들이 절연막의 표면과 결합하는 형태를 가지면  $\pi$ - $\pi$  stacking 방향이 TFT 소자에서 전류가 흐르는 방향과 같은 평면상에 존재하기 때문에 전류 이동 특성이 향상된다. 하지만 face-on orientation을 가지게 되면  $\pi$ - $\pi$  stacking 방향이 전류 이동 방향과 수직을 이루기 때문에 이동 특성이 떨어지게 되며, 전류가 이동할 때 절연체인 side chain을 통과해야 하기 때문에 이 역시 이동 특성을 현저히 저하시킨다. P3HT 막이 edge-on orientation 혹은 face-on orientation을 갖게 되는 이유에 대해서는 아직까지 정확하게 밝혀지지 않았으며 다만 P3HT 재료의 HT regioregularity와 막의 형성 방법, 절연막의 표면 상태에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. P3HT 막을 spin coating으로 형성할 경우 edge-on orientation을 가지려면 HT regioregularity가 90 % 이상 되어야 하며, Rubber stamp printing 방법으로 P3HT 막을 형성할 경우 형성 과정이 spin coating과 전혀 다르기 때문에 P3HT 박막의 배향성 역시 달라지게 된다. 아래 그림은 고분자 기판으로 Rubber stamp printing 기술을 적용해 제작한 2인치급 플렉서블 AMLCD의 구조 및 구동하고 있는 패턴의 실제 모습이다. 산소 및 수분 차단막으로는 SiO<sub>2</sub>를 사용하였으며 절연막은 고분자 필름의 거친 표면 및 기계적 특성 향상을 위해 유기-무기 이중 절연막을 적용하였다. 이중 절연막은 표면의 평탄화 역할 및 flat-band voltage, leakage current 특성 향상에도 기인한다.

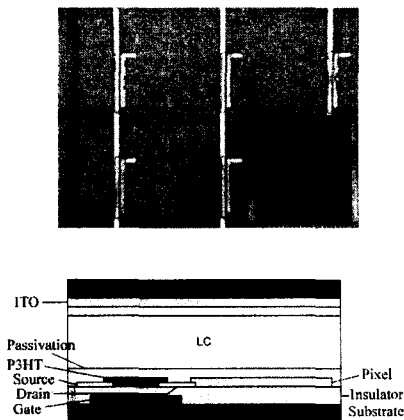


그림 7 : Rubber stamp printing 기술을 이용한 P3HT TFT driven AMLCD (KETI)

### III. 결 론

이처럼 능동구동 방식을 이용한 플렉서블 디

스플레이는 현재 여러 가지 형태로 발전하고 있는 상태다. 아직까지는 기존의 비정질 및 다결정 실리콘 박막 트랜지스터 기술을 적용한 플렉서블 디스플레이가 유기 박막 트랜지스터를 이용한 디스플레이보다 우위에 있지만 향후 관련 기술이 확립되고 새로운 재료가 개발되면 더욱 뛰어난 기능을 발휘할 수 있는 전유기 플렉서블 디스플레이가 가능할 것으로 생각된다.

### 참고 문헌

- [1] H. Sirringhaus, P.J. Brown, R.H. Friend, M.M. Nielsen, "Two-dimensional charge transport in self-organized, high-mobility conjugated polymers", *Nature* 401, p. 685, 1999.
- [2] H. Sirringhaus, N. Tessler, R.H. Friend, "Integrated high-mobility polymer field-effect transistors driving polymer light-emitting diodes", *Synth. Met.*, p. 857, 1999.
- [3] S. K. Park, J. I. Han, W. K. Kim, M. G. Kwak, "Chip bonding on non-rigid and flexible substrates with new stepped process", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 40, p. 412, 2001.
- [4] S. K. Park, Y. H. Kim, J. I. Han, D. G. Moon, W. K. Kim, "High-performance polymer TFTs printed on a plastic substrate", *IEEE Trans. Electron Devices*, ED. 49, p. 2008, Nov. 2002.
- [5] C. D. Sheraw, L. Zhou, J. R. Huang, D. J. Gundlach, T. N. Jackson, M. G. Kane, I. G. Hill, M. S. Hammond, J. Campi, B. K. Greening, J. Francl, J. West, "Organic thin-film transistor-driven polymer dispersed liquid crystal displays on flexible polymeric substrates", *Appl. Phys. Lett.* 80, p. 1088, 2001.
- [6] P. Mach, S. J. Rodriguez, R. Nortrup, P. Wiltzius, J. A. Rogers, "Monolithically integrated, flexible display of polymer-dispersed liquid crystal driven by rubber-stamped organic thin film transistors", *Appl. Phys. Lett.* 78, p. 3592, 2001.