



# 유기박막 트랜지스터를 이용한 능동구동 디스플레이

문대규 · 김원근 · 김영훈 · 한정인

## 1. 서론

최근 들어 기능성 유기물을 이용한 디스플레이에 대한 관심이 고조되면서 oligomer나 conjugated polymer를 이용한 유기박막 트랜지스터 (OTFT)에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다. 이미 pentacene의 경우 field effect mobility가  $2.4 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ , on/off ratio가  $10^8$  이상의 특성을 가지는 TFT 소

자가 보고되어 있으며, 이는 기존의 hydrogenated amorphous Si(a-Si:H) 보다도 우수한 성능이다. 하지만 pentacene은 우수한 특성에도 불구하고 고가의 진공 증착장비가 필요하고 미세 패턴 형성이 힘들기 때문에 기존의 비정질 실리콘을 이용한 디스플레이에 비해 가격적인 면에서나 대면적화에 있어서 큰 장점은 없다. 이에 비해 반도체 특성을 가지는 공액 고분자는 유기용매에 쉽게 녹는 특성을



문대규

1988 연세대 세라믹공학과 (공학사)  
1990 KAIST 재료공학과 (공학석사)  
1994 KAIST 재료공학과 (공학박사)  
1993 ~ LG-Philips LCD 선임연구원  
1998  
1999 ~ 영국 Oxford Univ. Post-Doc.  
2000  
2000 ~ FDTech 수석연구원  
2001  
2001 ~ 전자부품연구원 책임연구원  
현재



김영훈

1999 서울대 재료공학부 (공학사)  
2001 서울대 재료공학부 (공학석사)  
2001 ~ 전자부품연구원 책임연구원  
현재



김원근

1986 고려대학교 재료공학과 (공학사)  
1989 ~ 삼성전자 반도체사업부 연구원  
1994  
1996 ~ 전자부품연구원 책임연구원  
현재



한정인

1983 연세대학교 금속공학과 (공학사)  
1985 한국과학기술원 재료공학과 (공학석사)  
1989 한국과학기술원 재료공학과 (공학박사)  
1989 ~ 삼성전자 반도체연구소  
1992 선임연구원  
1998 ~ 경기대학교 첨단산업공학부  
2000 겸임교수  
1992 ~ 전자부품연구원 디스플레이연구센터  
현재 수석연구원

### Polymer Thin Film Transistor based Active-Matrix Displays

전자부품연구원 (Dae-Gyu Moon, Won-Keun Kim, Yong-Hoon Kim, and Jeong-In Han, Korea Electronics Technology Institute, #455-6, Masan-ri, Jinwi-myon, Pyungtaek, Gyunggi, Korea)  
e-mail:dgmoon@keti.re.kr

가지고 있어서 spin coating이나 ink-jet printing, contact printing, dip coating 등의 저렴한 공정이 가능하다. 이런 공정을 활용할 경우 roll-to-roll process를 이용할 수 있기 때문에 프린팅 방법을 이용한 미세 패턴 형성 공정이 뒷받침 해준다면 저 가격, 대면적 디스플레이 제작에 있어서 매우 유리한 위치에 있다고 할 수 있다. 그리고 상온에서 모든 공정이 이루어지기 때문에 플라스틱 기판을 이용한 플렉서블 소자 및 패널 제작에도 쉽게 적용할 수 있다. 하지만 앞서 언급했듯이 용액 공정이 가능하더라도 TFT 패널이나 integrated circuit(IC)을 제작하기 위해서는 고분자 막의 패턴이 필수적이다. Spin coating과 dip coating 방법은 가장 단순한 방법으로 막 형성이 가능하지만 패턴을 형성하기가 쉽지 않다. 그리고 ink-jet printing은 패턴 형성을 위해서 별도의 well 형태 구조물 혹은 표면 개질을 해야 하기 때문에 공정상 어려움이 따른다. 이에 비해 stamp를 이용한 contact printing 방법은 비교적 단순한 공정으로도 쉽게 high resolution (sub-micron) 패턴을 다양한 기판 상에 형성할 수 있기 때문에 다른 방법들보다 roll-to-roll process에 있어서 적합한 방법이라고 할 수 있다. 본 논문에서는 최근의 유기 박막 트랜지스터를 이용한 능동구동형 디스플레이의 기술 동향과 함께 rubber stamp printing 기술을 이용한 polymer TFT 소자 및 플렉서블 디스플레이 제작기술에 대해 설명하고자 한다.

## 2. 기술 동향

유기물 반도체를 이용한 유기 박막 트랜지스터 개발은 이미 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 재료로

는 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 대기압보다는 연구소를 중심으로 발표가 이루어지고 있는 상황이며 아직까지는 모노 칼라급 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 **그림 1**은 PSU에서 최근에 발표한 pentacene을 이용한 PDLC 디스플레이 구조와 실제로 구동하는 모습이다. 기판은 125 μm 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 스핀 코팅하고 패턴을 형성하게 된다. 이후

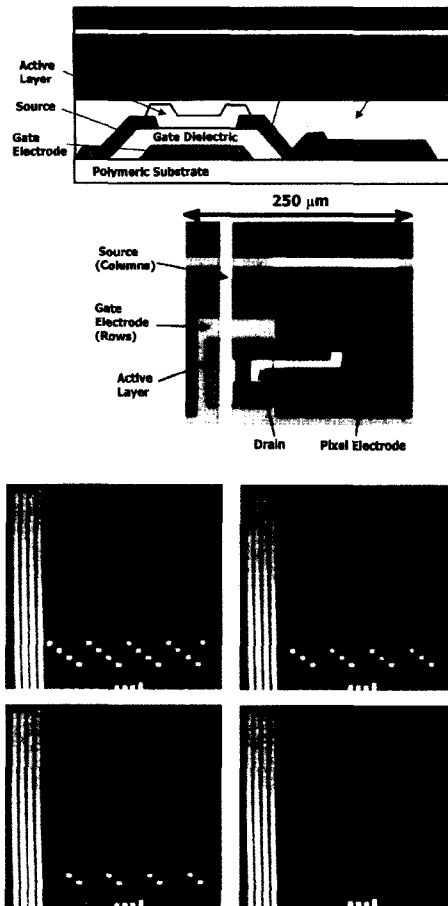


그림 1. Pentacene OTFT driven PDLC 디스플레이 (PSU).

산소 플라즈마 처리를 통해 active layer 패턴 이외의 부분을 식각하게 되면 쉽게 active layer 패턴을 형성할 수 있다.

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 시제품이라는데 의미가 있다. 이 기술은 또한 고분자 패턴 형성을 위해 proprietary surface energy patterning 기술을 사용했는데, 그림 2와 같이 laser-printing, SAM (self

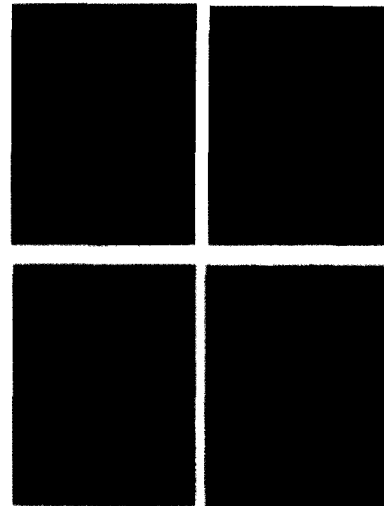


그림 2. Ink-jet으로 제작한 OTFT driven PDLC 디스플레이 (Plastic Logic).

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.

## 2. Rubber Stamp Printing 기술

Rubber stamp printing 혹은 micro contact printing 기술은 원래 IBM 및 Bell Lab. 등에서 금속막 상에 SAM을 인쇄해 미세 패턴을 형성하는데 사용했던 기술이다. 이 기술은 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 되며, 특성 역시 기존의 spin coating 방식으로 제작된 트랜지스터의 특성과 비교해 보면 오히려 더 뛰어난 특성을 보여주고 있다.

Rubber stamp printing 방식은 다음과 같은 형

대로 진행된다. 우선 고분자 반도체를 유기용액에 일정한 농도로 녹여 용액 상태로 만든 후 미리 형성된 stamp를 이용해 원하는 패턴을 기판에 형성한다. Stamp는 패턴이 형성된 master 기판 위에 silicon elastomer인 PDMS 용액을 넣어 curing을 해주면 고체 상태인 stamp가 형성이 되며, 이후 용액을 stamp 위에 충분히 공급한 후 N<sub>2</sub> gas로 blow-ing 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.

일반적으로 플렉서블 디스플레이는 기판으로서 기존의 유리나 quartz 기판 대신 유연한 특성을 가지는 플라스틱 필름이나 얇은 금속 필름을 사용하게 된다. 플라스틱 필름은 기존의 Si wafer나 glass에 비해서 열팽창 계수가 크기 때문에 100 °C 정도의 저온 공정온도에서도 쉽게 변형이 될 수 있다. 기판에 변형이 일어나면 공정 중에 alignment 오차가 커지기 때문에 플라스틱 필름을 기판으로 이용할 경우에는 기판의 변형을 줄이는 기술이 필수적이다. 기판의 변형을 최대한 줄이기 위해서는 공정 전에 미리 필름을 열처리 해주어야 한다.

고분자 반도체 재료로는 head-to-tail regioregularity가 98% 이상인 P3HT를 chloroform 용액에 0.1~1.0 wt%의 농도로 녹여 용액 상태로 만든 후 앞서 설명한 rubber stamp printing 방법으로 기판에 막을 형성하였다. 프린팅된 P3HT 박막의 두께는 약 50~100 nm 정도이며, 제작된 소자는 N<sub>2</sub> 분위기에서 2시간, 진공 분위기에서 12시간 연속적으로 어닐링한 후, N<sub>2</sub> 분위기에서 측정하였다 (그림 3).

P3HT를 이용한 유기 박막 트랜지스터에 대한 연구는 80년대 중반에 시작 되었으며 90년대 후반 University of Cambridge의 H. Sirringhaus에 의해 이 물질의 구조적인 특성과 트랜지스터의 전기적 특성 사이에 매우 밀접한 연관성이 존재한다는 것이 밝혀졌다. 이후 많은 연구가 진행되고 있으며 산화막의 표면 개질이나 P3HT의 regioregularity 개선 등 여러 방법들이 제시되고 있다.

박막 형성 방법에 따른 트랜지스터 소자의 특성 변화는 일반적으로 P3HT 막의 배향성에 의존하는 것으로 알려져 있다. P3HT 막은 비정질인 매트릭스에 부분적으로 결정화가 이루어진 형태로 존재하는데, 이 결정화된 부분의 배향성에 따라서 이동도

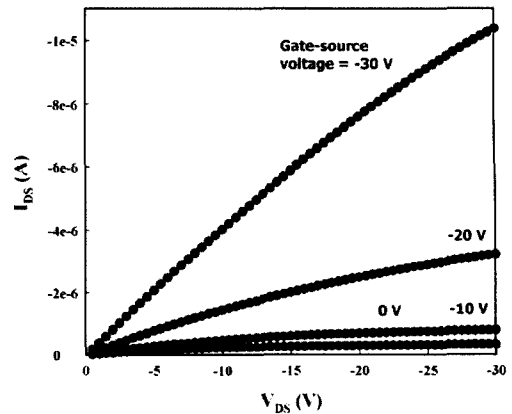


그림 3. Rubber stamp printing 기술로 제작한 P3HT TFT의 I-V 특성.

는 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. 그림 4는 고분자 기판으로 rubber stamp printing 기술을 적용해 제작한 2인치급 플렉서블 AMLCD의 구조 및 구동하고 있는 패널의 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.

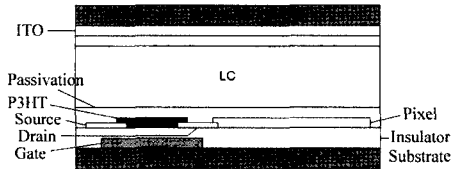
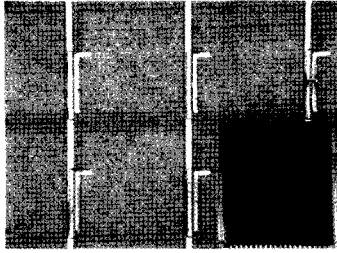


그림 4. Rubber stamp printing 기술을 이용한 P3HT TFT driven AMLCD (KETI).

### 3. 결론

이처럼 능동구동 방식을 이용한 플렉서블 디스플레이는 현재 여러 가지 형태로 발전하고 있는 상태이다. 아직까지는 기존의 비정질 및 다결정 실리콘 박막 트랜지스터 기술을 적용한 플렉서블 디스플레이가 유기 박막 트랜지스터를 이용한 디스플레이보

다 우위에 있지만 향후 관련 기술이 확립되고 새로운 재료가 개발되면 더욱 뛰어난 기능을 발휘할 수 있는 플렉서블 디스플레이가 가능할 것으로 생각된다.

### 참고문헌

1. H. Sirringhaus, P. J. Brown, R. H. Friend, and M. M. Nielsen, *Nature*, **401**, 685 (1999).
2. H. Sirringhaus, N. Tessler, and R. H. Friend, *Synth. Met.*, 857 (1999).
3. S. K. Park, J. I. Han, W. K. Kim, and M. G. Kwak, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40**, 412 (2001).
4. S. K. Park, Y. H. Kim, J. I. Han, D. G. Moon, and W. K. Kim, *IEEE Trans. Electron Devices*, **49**, 2008, (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, and J. West, *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 1088 (2001).
6. P. Mach, S. J. Rodriguez, R. Nortrup, P. Wiltzius, and J. A. Rogers, *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 3592 (2001).