

플렉시블 디스플레이 백플레인 기술

<http://dx.doi.org/10.5757/vacmag.1.2.24>

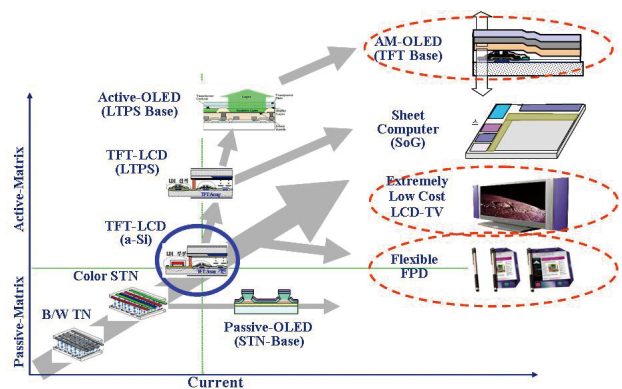
이용욱

Backplane Technologies for Flexible Display

Yong Uk Lee

Display is a key component in electronic devices. OLED is growing very fast recently due to the explosion of the smart phone market although still LCD is the dominating display technology in the display market at the moment. Also needs for the large area and high resolution TVs and flexible displays are increasing these days. Especially flexible display is expected to be one of the key technologies in mobile devices requiring small device size and large display size. Contrary to the conventional displays, flexible display requires organic materials for the substrate, the active driving element and also for the display element. Plastic film as a substrate, organic semiconductor as an active component of the transistor and organic light emitting materials or electronic paper as a display element are studied actively. In this article, mainly backplane technologies such as substrates and the transistor materials for flexible display will be introduced.

디스플레이는 정보화 시대에 가장 중요한 기술로 자리를 잡았다. 특히 LCD(Liquid Crystal Display)는 지난 수 십년간 눈부신 발전을 이루어 CRT를 대체하고 PDP와의 경쟁에서도 승리하여 디스플레이 시장에서 중요한 역할을 담당하고 있다. 여기에 더해 최근에는 OLED(Organic Light Emitting Display) 제품이 출시되고 시장 확대가 빠르게 이루어지면서 치열한 기술 경쟁이



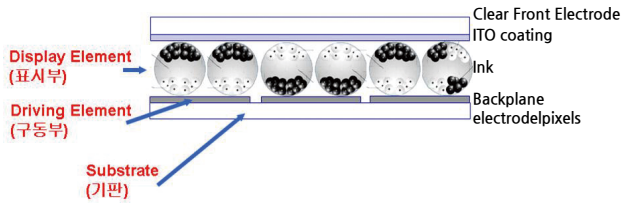
[Fig. 1] Flat panel display development trend

이루어지고 있다. 그림 1은 차세대 평판 디스플레이 기술의 개발 트렌드를 예시한 것이다. 크게 보아 LCD(Liquid Crystal Display) 이후 OLED가 가장 큰 디스플레이 기술의 흐름이 될 것으로 보이며, 이 외에 대형 초저원가 고해상도 대형 LCD TV 기술이 또 다른 큰 축을, 그리고 나아가 유연한 폼팩터(form factor)를 가지는 플렉시블 디스플레이(flexible display) 기술이 주요 디스플레이 제품군의 하나가 될 것으로 생각되어지고 있다. 특히 스마트폰(smart phone)의 전세계적인 보급 이후 모바일 디바이스(mobile device)의 중요성이 크게 부각되면서 작은 디바이스 크기와 동시에 대형 화면을 구현할



〈저자 약력〉

이용욱 박사는 2001년 서울대학교에서 재료공학 박사학위를 받았으며, 삼성전자 LCD 연구소와 전자부품연구원(KETI)을 거쳐 2008년부터 영국 CPI의 National Printed Electronics Centre에서 수석연구원으로 근무 중이다. (YongUk.Lee@uk-cpi.com)



[Fig. 2] Schematic structure of display cell.

수 있는 플렉시블 디스플레이 기술 개발의 필요성은 어느 때보다도 높아진 상황이다.

플렉시블 디스플레이는 기존의 딱딱한 판상 디스플레이와 전혀 다른 새로운 디스플레이의 응용 분야인데, 기존의 디스플레이가 주로 무기물이나 금속 물질을 사용하여 제조된 것에 비해 플렉시블 디스플레이는 유연성을 가지는 유기물과 같은 물질을 사용해야 하는 특징이 있으며, 특히 주 응용 분야가 모바일 디바이스가 될 것으로 생각되어서 부가적으로 강한 내충격성도 요구되어지고 있다.

플렉시블 디스플레이에 사용되어지는 유기물들은 그 특성상 용액 공정이 가능한 장점이 있어서 기존의 진공 및 고온 공정과는 다른 상압 및 상온 공정에서 제조가 가능한 부가적인 특징도 가지고 있으며, 또한 플렉시블 디스플레이에 사용되어지는 기판은 플라스틱과 같이 유연성을 가지는 기판이어야 하고 이는 기존의 한 장씩 공정을 하는 sheet-to-sheet 공정이 아닌 롤투롤(roll-to-roll) 공정의 진행이 가능하게 하여 공정 단가를 혁신적으로 낮출 수 있는 가능성도 가지고 있다.

디스플레이 구조를 다음 그림2와 같이 기판부(substrate), 구동부(driving element) 그리고 표시부(display element)로 나누어 보았을 때, 플렉서블 디스플레이는 기판부 측면에서는 구부러질 수 있는 플라스틱 기판(plastic substrate), 초박형 유리(thin glass) 기판, 금속 호일(metal foil) 기판 등을 사용할 수 있고, 구동부 측면에서는 기존의 비정질 규소 박막 트랜지스터(a-Si thin film transistor), 저온 다결정 규소 박막 트랜지스터(LTPS, low temperature polysilicone thin film transistor)와 아울러 유기 박막 트랜지스터(OTFT, organic thin film transistor)가 사용될 수 있으며, 표시부 측면에서는 기존의 LCD와 더불어 OLED 및 전자 종이(electronic paper) 기술 등이 사용되어질

수 있다.

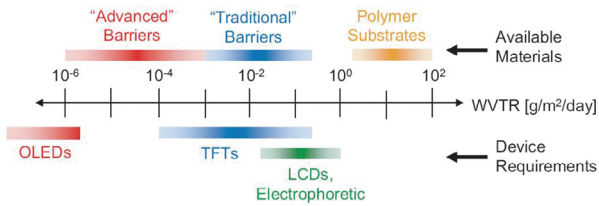
이 중에서 우선 일차적으로 특히 중요한 것은 백플레인(backplane) 부분이며, 이를 구성하는 기판과 구동부에 대해 간략히 소개하고자 한다.

유연 기판

플렉시블 디스플레이에 사용되어질 수 있는 유연 기판에는 박형 유리, 금속 호일 그리고 플라스틱 등이 있다. 박형 유리는 기존에 디스플레이에 사용되는 유리에 비해 두께가 훨씬 더 얇아서($<100 \mu\text{m}$) 쉽게 휘어질 수 있는 특징을 가진 유리를 지칭하는 것인데 표면 평탄도, 수분 및 산소 투과도, 라인 공정성 등 여러 측면에서 기존 유리와 같은 거의 특성을 보이는 장점이 있는 반면 가격이 비싸고 충격에 약하며 특히 향후 미래에 롤투롤 공정에 사용하기 어려운 단점이 있으며, 금속 호일은 내충격성과 공정성이 우수하고 수분 및 산소 투과가 적어 우수하지만, 표면 평탄도가 나쁘고 박막 공정 시작 전 부가적인 전기 절연체막 형성이 필요하며 LCD나 OLED와 같이 투명한 기판을 필요로 하는 디스플레이에는 적용이 어려운 단점이 있다. 이에 반해 플라스틱 기판은 플렉시블 디스플레이 제조를 위해 가장 적합한 소재로 주목을 받고 있는데, 무게가 가볍고 형태적인 제약이 없으며 가공이 용이하고 나아가 향후 롤투롤 연속 공정의 개발이 가능하다는 장점도 가지고 있다[1][2].

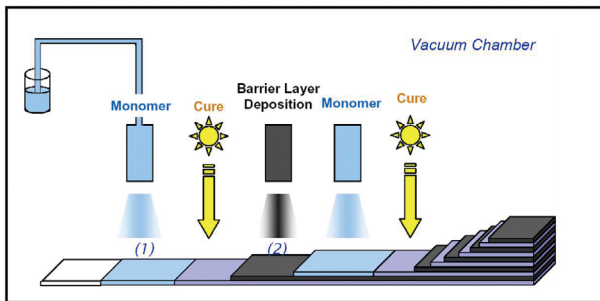
그러나 이러한 플라스틱 기판의 경우 유기물로 구성되므로 근본적으로 가지는 특성으로 인하여, 물리적, 기계적 특성이 변화하는 유리전이 온도 이상에서 공정을 진행하기 어려운 단점을 가지며 열에 의한 열팽창 및 열화 등의 문제점도 내포하고 있다. 따라서 디스플레이 제조 공정 온도를 낮추기 위한 노력과 함께, 기판 자체 측면에서는 고내열성과 낮은 열팽창 계수를 가지는 기판을 개발하려는 노력이 활발하게 이루어지고 있다.

또한 이러한 열적 특성에 더불어 안정적인 디바이스의 전기적 특성을 유지하기 위해서는 기판 자체에 높은 배리어 특성(barrier property) 또한 요구되어진다. 배리어 특성은 디바이스가 외부의 산소나 수분에 노출되었을 때 영향을 받지 않도록 하는 중요한 특성이다. 기존의 유리 기판과 달리 플라스틱 기판은 수분 및 산소의 투과가 비교적 용이하게 일어날 수 있으며 이 경우에 디스플레이



[Fig. 3] WVTR(water vapour transmission rate) requirements for various displays.

• Hybrid Multi-layer(1) (from Vitex System)



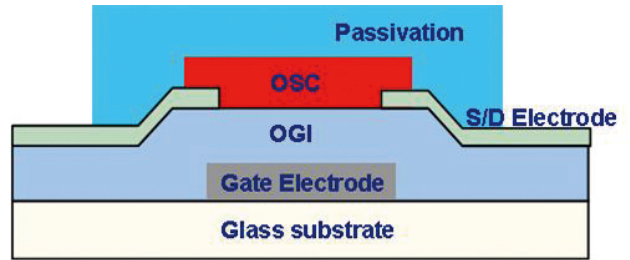
(1) Preheated Monomers (about 10 compounds) → Spray → Photo-polymerization (run time, < 1 min (?))
(2) SiO, SiN, AlOx (by Sputter)

[Fig. 4] Multi-layer barrier film.

레이 내부로 침투되어 들어간 수분과 산소는 유기물이 사용된 트랜지스터나 OLED 발광 소자와 같은 부분을 열화(degradation) 시키게 되어 결과적으로 디스플레이 자체의 특성 열화를 초래하는 위험이 있을 수 있다.

그림 3에 여러 디스플레이 별로 요구되는 배리어 특성이 표시되어 있다. OLED 소자와 같은 경우는 발광 물질로 민감한 유기물이 사용되어져서 특히 더 수분과 산소에 민감하게 되며 $10^{-6} \text{g/m}^2/\text{day}$ 이하의 아주 높은 배리어 박막 특성이 요구되어져서 이를 구현하기 위한 다양한 연구가 이루어지고 있는데 우수한 배리어막 자체의 개발과 함께 유기 배리어와 무기 배리어층을 여러 층으로 형성하여 우수한 배리어 특성을 얻는 연구도 이루어지고 있다.(그림 4.)

일반적으로 많이 연구되어 지고 있는 기판으로는 얇은 필름 형태의 PET(polyethylene terephthalate), PEN(polyethylene naphthalate), PES(polyether sulfone) 그리고 PI(polyimide) 등이 있으며, 특히 열 특성이 우수한 PI의 경우는 용액 상태로 바로 코팅(coating)하여 기판을 형성하는 기술도 활발히 연구 개발되고 있다.



[Fig. 5] Organic thin film transistor structure.
(OSC(organic semiconductor), OGI(organic gate insulator), S/D(source drain electrode))

유기 박막 트랜지스터

일반적으로 유기물은 절연체(insulator)로만 알려져 왔으며, 기존의 박막 트랜지스터와 같은 전자 분야에 있어서는 전통적으로 실리콘(silicon)과 같은 무기 물질들과 각종 금속 재료들이 주로 많이 사용되어져 왔다. 그러나 폴리아세틸렌(PA, polyacetylene)과 같이 공액(conjugated) 구조를 가지는 유기물이 전도성을 가질 수 있다는 사실이 알려지면서, 유기물을 전도체 및 반도체로 활용하기 위한 유기 전자(organic electronics) 분야에 대한 활발한 연구가 이루어졌다. 박막 트랜지스터(thin film transistor)의 경우에도 기존의 무기 실리콘 재료가 아닌 유기 반도체를 액티브(active) 재료로 활용한 유기 트랜지스터(organic thin film transistor)가 활발히 연구되어졌다.

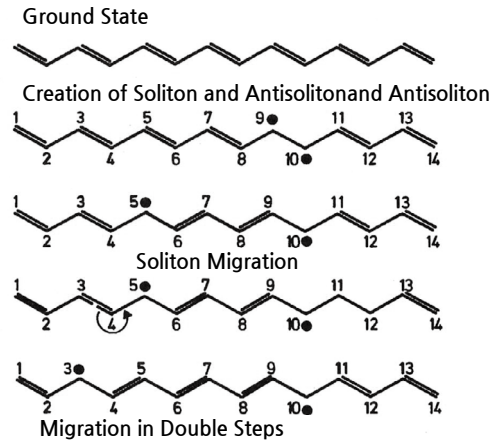
그림 5에 전형적인 유기 박막 트랜지스터의 단면 구조를 예시하였다. 일반적으로 유기 박막 트랜지스터라고 지칭할 수 있는 구조는 기본적으로 우선 최소한 반도체 물질이 기존의 실리콘과 같은 무기물질이 아닌 공액 구조를 가지는 유기물인 경우이다. 유기 반도체(OSC, organic semiconductor)와 더불어 절연막 등에도 유기물이 사용되어질 수 있으며, 나아가 전극과 보호막(passivation) 등에도 유기물이 사용되어지게 되면 전유기(all organic) 구동 소자가 되는 것이다.

유기물은 무기물과 달리 비교적 적은 노력과 에너지로 제조가 가능한 장점도 가지고 있다. 무기물이나 금속 물질들이 주로 고진공 및 고온 공정을 통해서 증착되어야 하는 데 비해서 대부분의 유기물들은 상온 및 상

압의 조건에서 프린팅(printing)이나 스핀 코팅(spin coating)과 같은 용액 공정을 통해서도 쉽게 형성되어 질 수가 있기 때문에 고가의 고진공 고온 장비가 필요 없게 되어 제조 설비 측면 뿐 아니라 제조 공정의 효율 측면에서도 큰 강점을 가질 수 있다. 더욱이 유기물은 금속에 비해 크랙(crack)과 같은 문제가 덜할 것으로 예상되어지며, 따라서 유기물에 기반을 둔 박막 트랜지스터 소자는 플렉시블 디바이스에 적용 시 실제 사용 중의 벤딩(bending) 등의 조건에서 무기물보다 박막 접착력(adhesion)이나 크랙 측면에서 훨씬 더 유리하고 따라서 플렉시블 디스플레이 구현의 핵심 기술이 될 것으로 기대된다.

유기 박막 트랜지스터는 1982년에 폴리아세틸렌을 반도체로 이용한 소자가 제조된 이후 눈부신 발전을 이루어 2003년에는 3M에 의해 캐리어 이동도(carrier mobility) $\sim 4.8 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 의 유기 박막 트랜지스터가 보고되어 20여 년간 이동도 특성은 거의 1000배 가까운 향상을 이루었으며, 최근에는 CPI, SmarKem, Merck, Polyera 등에 의해 이동도 $5 \sim 8 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 의 안정적인 고 대면적에서 균일한 이동도도 보고되어 지고 있다. 따라서 현재 유기 트랜지스터는 이미 비정질 실리콘(a-Si) 박막 트랜지스터 보다 우수한 특성을 쉽게 얻는 수준까지 연구가 되어졌으며, 현재는 옥사이드 트랜지스터(oxide transistor)에 버금가는 수준이라고 할 수 있으며, 멀지 않은 미래에 다결정 실리콘(poly-Si) 박막 트랜지스터도 대체할 수 있는 차세대 구동 소자로 크게 각광을 받을 것으로 기대된다[3][4][5].

유기 반도체는 전술한 바와 같이 공액 구조를 가지는 유기물들이 사용되어질 수 있는데, 그 동안에는 주로 우수한 특성의 소자를 제작할 수 있는 진공 증착 공정이 필요한 저분자(low molecular weight) 유기 반도체가 많이 사용되어져 왔다. 그러나 유기 박막 트랜지스터는 궁극적으로 잉크젯 프린팅과 같은 용액공정을 통해 제조될 때 많은 장점을 가질 수 있으므로 용액 공정이 가능하여 공정적인 측면에서 장점을 가지는 고분자 유기 반도체도 꾸준히 연구되어져 왔다. 그러나 고분자 유기 반도체의 경우 공정적인 장점은 있으나 정제(purification)가 어렵고 분자 간 균일 정렬이 어려워져 저분자 유기 반도체 물질에 비해 특성이 떨어지는 문제점이 대두되었으며, 따라서 최근에는 고분자 유기 반도체



[Fig. 6] Carrier movement in conjugated structure

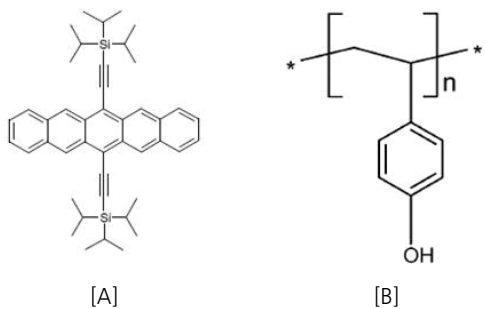
체와 같이 용액 공정이 가능하면서도 동시에 정제가 쉽고 분자가 배열이 용이한 저분자 물질이 개발되어 특성도 우수하고 동시에 공정적인 장점을 유지하려는 연구가 많이 되어 지고 있다.

그림 6에 유기물질의 공액 구조에서의 캐리어 전도 메카니즘을 도식화하였다. 일반적으로 유기 반도체는 분자 내에서는 공유 결합으로 연결된 사슬 방향을 따라서 캐리어가 이동하므로 상당히 큰 이동도 값을 보이는 반면 분자 간에는 반데르발스(van der Waals) 인력에 의해 약하게 결합되어 있으며 호핑(hopping)을 통해서만 이동하게 되므로 이동도가 급격히 저하되게 된다.

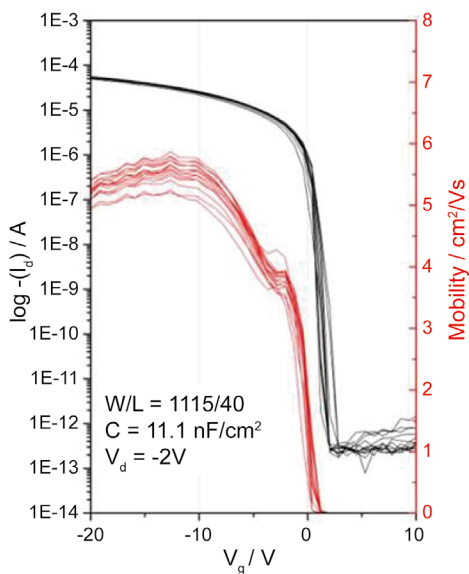
가장 많이 사용되어지는 유기 반도체로는 저분자 재료 중에는 펜타센(Pentacene)[6]이 있으며, 고분자 재료 중에는 P3HT(poly(3-hexylthiophene)) 등 폴리티오펜 (polythiophene) 계열[7]이 있다. 상술한 바와 같이 구조 측면에서는 저분자 유기 반도체와 고분자 유기 반도체로 나누어 볼 수 있으며, 공정 측면에서는 진공증착용 유기 반도체와 용액 공정용 유기 반도체가 있다.

유기 절연체로는 CYEPL(cyanoethylpullulan)[8], PI (polyimide)[9], PVP(polyvinyl phenol)[10] 등 다양한 재료들이 많이 연구되어지고 있다. 유전율이 큰 CYEPL 같은 재료를 사용하여 구동 특성을 향상시킨 연구를 한 경우가 있는 한편, Janos Veres 등은 저유전율 (low dielectric constant) 절연체를 주로 사용하여 높은 이동도를 가지는 소자를 얻기도 하였다[11].

또한 유기물질을 단층으로 형성하여 SAM(self-assembled monolayer) 단분자층을 유기 절연체로 형



[Fig. 7] Samples of organic semiconductor: TIPS Pentacene (Triisopropylsilyl pentacene) (A) and organic gate insulator: Polyvinylphenol (B).



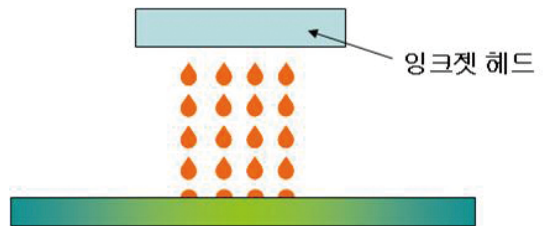
[Fig. 8] Transfer curve of high performance p-type organic thin film transistor.

성시켜 소자를 제조한 경우도 있다[12].

그림 7에 대표적인 유기 반도체와 유기 절연체 물질의 구조를 제시하였다.

유기 전극으로는 전도성이 특히 우수한 고분자가 많이 사용되는데, polyaniline과 polythiophene 계열이 주류를 이루고 있다. 그러나 유기 전극의 경우 아직 금속 전극 재료에 비해서 특성이 현저히 부족하여 실제로 많이 쓰이지 못하고 있는 실정이다.

유기 박막 트랜지스터의 전기적 특성 해석은 기존 a-Si TFT와 같은 무기 박막 트랜지스터에서 쓰이는 이론식을 그대로 이용할 수 있다. 다만 현재 주로 많이 보고되는 유



[Fig. 9] Organic materials positioning by inkjet printing technique.

기 박막 트랜지스터는 n-type이 아닌 p-type이 주류를 이루고 있으며, 이 경우 n-type a-Si과는 조금 다르게 게이트(gate) 전압이 + 일 때 off 상태가 되며, - 일 때 on 상태가 되는 것이다. 그림 8에 CPI에서 개발중인 유기 박막 트랜지스터의 트랜스퍼(transfer) 특성 그래프 및 이동도 그래프를 제시하였다.

유기 박막 트랜지스터는 제조 공정 측면에서도 많은 장점을 가질 수 있다. 무기물이나 금속 물질이 사용되어지는 경우에는 비정질 실리콘 박막 트랜지스터에서와 같이 진공증착 → 포토(photo) 공정 → 식각(etching) 공정 → 스트립(strip) 공정의 순서를 따르게 된다. 전술한 바와 같이 용액 공정이 가능한 유기물을 사용하는 유기 박막 트랜지스터에서는 진공 공정보다 유리한 용액 공정이 사용되어질 수 있으며, 특히 잉크젯(inkjet) 같이 필요한 부분에 직접 재료를 위치시키는 직접 패터닝(patterning) 방법이 사용되어질 수 있으며 이를 통해 획기적인 재료 절감 및 공정 스텝 감소 등을 얻을 수 있다.

지금까지 살펴본 바와 같이, 모바일 디바이스의 중요성이 부각됨에 따라 플렉시블 디스플레이에 대한 요구는 갈수록 커지고 있다. 이러한 플렉시블 디스플레이를 구현하기 위해서는 플라스틱 기판과 같이 유연한 기판, 유기 박막 트랜지스터와 같이 벤딩에 강한 구동 소자 등 백플레인에 대한 연구가 우선 이루어져야 하며, 나아가 플렉시블 환경에 적합한 디스플레이 모드 및 패시베이션 기술과 같은 부분도 연구가 이루어져야 한다. 플렉시블 디스플레이는 또한 미래 몰투몰 공정을 통해서 제조될 수 있는 잠재력이 있으며, 이는 획기적인 공정 기술의 개발도 촉진할 수 있을 것으로 기대된다.

| References |

- [1] 김기현, 서경수, 전자통신동향분석, 제21권 제5호, 129(2006).
- [2] J. Lewis, *Materials Today*, Vol 9, 38(2006).
- [3] F. Ebisawa, T. Kurokawa, and S. Nara, *J. App. Phys.* Vol 54, 3255(1983).
- [4] C. D. Dimitrakopoulos and D. J. Mascaro, *IBM J. Res. & Dev.* Vol. 45, 11(2001).
- [5] A. Dodabalapur, *Materials Today*, Vol 9, 24(2006).
- [6] Y. Y. Lin, D. J. Gundlach, S. F. Nelson, and T. N. Jackson, *IEEE Trans. Elec. Dev.* Vol. 44, 1325(1997).
- [7] Z. Bao, A. Dodabalapur, and A. J. Lovinger, *Appl. Phys. Lett.* Vol 69, 4108(1996).
- [8] X. Peng, G. Horowitz, D. Fickou, and F. Garnier, *Appl. Phys. Lett.* Vol 57, 2013(1990).
- [9] Z. Bao, Y. Feng, A. Dodabalapur, V. R. Raju, and A. J. Lovinger, *Chem. Mater.* Vol 9, 1299(1997).
- [10] H. Klauk, M. Halik, U. Zschieschang, G. Schmidt, W. Radik, and W. Weber, *J. Appl. Phys.* Vol 92, 5259(2002).
- [11] J. Veres, S. D. Ogier, S. W. Leeming, D. C. Cupertino, and S. M. Khaffaf, *Adv. Funct. Mater.* Vol 13, 199(2003).
- [12] J. Collet, O. Tharaud, A. Chapoton, and D. Vuillaume, *Appl. Phys. Lett.* Vol 76, 1941(2000).