

고분자 박막트랜지스터 개발동향

김보성 · 이용욱 · 홍문표 · 정규하

1. 서론

유기고분자재료는 마이크로 일렉트로닉스 분야에서 미세 패턴용 포토레지스트나 층간 유기절연막 등에 활용되어왔으나 실리콘 (Si)과 같은 능동소자 반도체 재료로 사용되는 경우는 거의 없었다. 1980년대 기초 연구로서 유기반도체 박막의 물성 평가나 저분자, 고분자계 유기 재료를 능동층으로 이용한 유기 트랜지스터의 기초 특성이 연구되어져 왔으나 실용 디바이스로 충분한 특성을 얻지는 못해 거의 주목받지 못

했었다. 그러나 유기재료는 저온 성막이나 용액공정 등의 값싸고 손쉬운 공정성과 재료자체가 가지는 유연성 등의 장점으로 꾸준히 연구되어온 결과, 최근에는 아몰퍼스 실리콘 (a-Si)에 필적하는 캐리어 이동을 가진 유기 박막트랜지스터 (thin film transistor: TFT) 및 전체-유기 집적회로 등이 발표되어 디스플레이 소자, 센서, 정보 태그, 스마트 카드 (정보 기능 카드) 등의 다양한 전자기기 분야에서 실리콘 디바이스를 대체할 수 있는 기술로 많은 주목을 받게 되었다.



김보성
 1990 부산대학교 화학과 (학사)
 1992 한국과학기술원 화학과 (석사)
 2000 서울대학교 화학과 (박사)
 2000~ 현재 삼성전자 AMLCD사업부 차세대 Display팀 책임연구원



홍문표
 1987 한양대학교 원자핵공학과 (학사)
 1989 한양대학교 원자핵공학과 (석사)
 1995 Univ. of Wisconsin - Madison Engineering Physics, Ph.D
 1995~ 현재 삼성전자 AMLCD 사업부 차세대 Display팀 수석연구원



이용욱
 1995 서울대학교 섬유고분자공학과 (학사)
 1997 서울대학교 섬유고분자공학과 (석사)
 2001 서울대학교 재료공학부 (박사)
 2001~ 현재 삼성전자 AMLCD 사업부 차세대 Display팀 책임연구원



정규하
 1974 서울대학교 섬유공학과 (학사)
 1980 Massachusetts Institute of Technology 재료공학과 (석사)
 1985 Massachusetts Institute of Technology 재료공학과 (박사)
 2000~ 현재 삼성전자 AMLCD사업부 차세대Display팀 상무

Technology Trends of Polymer Thin Film Transistors

삼성전자 AMLCD 사업부 (Bo Sung Kim, Yong Uk Lee, Munpyo Hong, and Kyuha Chung, Flat Panel Display R & D Team, LCD Business, Samsung Electronics Co., Ltd., San#24 Nongseo-ri, Gi-heung-eup, Yongin-city, Gyeonggi-do 449-711, Korea,) e-mail: bskim86@samsung.com

박막트랜지스터는 증폭률이 크고 높은 on/off 전류비, 또 on 상태의 저항이 낮은 것이 바람직하며, 고속으로 동작할 필요가 있다. 이러한 고성능 트랜지스터를 실현하기 위해서는 높은 캐리어 이동도를 가진 반도체재료의 개발이 필요하다. 본 논문에서는 최근 유기고분자재료를 이용한 박막트랜지스터의 개발과 이를 이용한 능동구동형 디스플레이 기술동향에 대해 소개하고자 한다.

2. 개발동향

2.1 유기고분자 반도체 박막의 특성

유기반도체 특성을 보이는 고분자로는 polythiophene, polyacetylene, polythienylenevinylene, polyphenylenevinylene, polypyrrole, polyaniline 등의 이중결합을 포함하는 다양한 공액 고분자재료 등이 있다. 이러한 대부분의 고분자는 연구초기 단계에는 field-effect mobility가 10^{-4} $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 이하로 실질적으로 일렉트로닉스 분야에 응용하기에는 너무 낮은 수준이었다. 고분자 유기반도체가 높은 수준으로 도핑될 경우 이동도가 0.1 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 에 도달하였으나 전도성 고분자의 성격을 보이며 on-off 전류비가 매우 낮은 결과를 초래했다.¹ 이러한 낮은 이동도 값은 대부분의 용액 공정의 공액고분자 박막의 무질서한 비정질 미세구조 때문으로 유기분자의 Hopping 수송모델에 의해 설명되어진다.² 도핑되지 않은 polythienylenevinylene의 비정질 고분자 TFT의 가장 높은 이동도 예는 10^{-3} $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 정도이다.³

유기박막트랜지스터의 이동도를 증가시키는 방안으로는 박막 고분자의 분자정리배열을 향상시키는 것이다. 이러한 분자배열의 미세구조를 개선하는 방법으로 Langmuir-Blodgett,⁴ 기계적 러빙에 의한 배향,⁵ 고분자 주사술에 mesogenic 말단기 도입,⁶ 고분자 주사술의 구조반복성 등이⁷ 있다. 이러한 초기의 실험에 의해 고분자 배열과 구조적 질서가 높아짐으로써 이동도가 다소 증가하였다. 미세구조와 이동도의 명확한 관계를 보여준 예로, 높은 regioregularity를 가진 poly-3-hexylthiophene (P3HT)은 이동도가 0.045~0.1 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 이었는데, head-to-tail regioregularity와 microcrystallinity가 이동도와 밀접한 관련이 있음을 보여준다.⁸ 최근 regioregular P3HT에 고분자 절연체에 top gate 구조에서 0.2

$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 이상도 보고되었다.⁹ 고분자배향에 따른 이동도의 증가효과의 다른 예로서 polydioctylfluorene-based 공중합체에서 uniaxial 고분자배향은 배향막의 위에 thermotropic 액정상을 형성하였다.³ Poly-dioctylfluorene-co-bithiophene (F8T2)의 자기조립 액정상을 이용하여 0.02 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 의 이동도를 얻었다. 이러한 급격한 이동도 향상은 TFT의 전하 수송재료로서 고분자 반도체의 가능성을 보여주고 있다.

실질적인 응용의 관점에서 고분자 TFT로 얻어지는 이동도는 아직 다른 TFT 기술에 비하여 다소 떨어지기는 하지만, 고분자 TFT는 다른 TFT 기술과는 차별화가 가능한 몇가지 두드러진 기술이 있다. 플렉시블 플라스틱 기판 위 응용으로 실리콘과 달리 상온 또는 저온에서 스핀-코팅 등의 용액도포 기술은 대면적의 공정응용이 가능하다. 특히 고분자는 잉크형태로 직접 프린팅에 의한 패터닝이 가능하다. 실리콘 TFT는 진공증착과 포토리소그래피 패터닝을 통하여 제작될 수 있는 반면, 용액 도포와 직접프린팅 기술로 스위치부로서 고분자 반도체, 전극, 배선과 층간연결부로서 전도성 고분자, 그리고 층간절연막 등을 포함하는 전체-고분자 TFT 제작이 가능하다. 이는 박막전사소자를 신문의 프린팅과 같은 기술로 제작할 수 있는 가능성을 열어주고, 만약 그것이 가능하면 대면적의 박막소자를 극저원가의 제작으로 새로운 박막소자의 응용으로 범위를 넓힐 수 있다. 수백개의 트랜지스터로 구성된 전체-고분자 로직회로가 polyaniline을 포토리소그래피 패터닝 방법을 통하여 필립스에 의해 개발되었고,¹⁰ 최근 100 bit/s의 속도로 구동되는 300개 transistor를 포함하는 코드 제너레이터가 개발되었다.¹¹

용액도포 및 직접프린팅 공정으로부터 유기반도체 박막을 제작하는 데는 두가지 방법이 있다. 하나는 용액으로부터 반도체 전구체 (precursor)를 도포한 다음 연속적으로 반도체로 전환하는 방법이고, 다른 하나는 가용성의 반도체를 직접 도포하는 방법이다. 반도체로 사용되는 대부분의 공액 올리고머와 고분자는 일반적으로 보통 용매에 녹지 않는다. 때때로 고분자 반도체의 용해도를 증가시키기 위하여 용액화 치환기들을 도입하기도 하는데, 이러한 치환기들은 분자들의 패킹을 어렵게 하거나 분자들 사이의 π - π 스택킹 거리를 증가시켜서 전하 이동도를 떨어뜨린다. 전기화학적 고분자반응은 채널영역에 polythiophene 반도체를 직접 도포하는 방법으로 개발되었

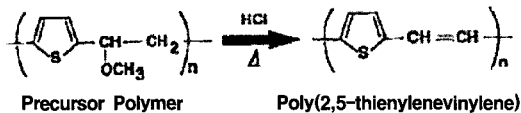


그림 1. 고분자 전구체의 poly(2,5-thienylenevinylene) (PTV)으로 전환 반응.

으나, 이 방법은 부분적인 도핑으로 낮은 on/off 비를 가지고 고분자화되는 동안 부분적인 cross-linking으로 이동도가 감소한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 용액으로 필름형성 후 반도체로 전환할 수 있는 가용성 전구체가 많이 연구되었다. 고이동도의 저분자 pentacene 전구체를¹² 비롯하여 oligo-thiophene과 polythienylenevinylene¹³ transistor가 개발되었다. **그림 1**은 200 °C에서 고분자 전구체로부터 poly(2,5-thienylenevinylene) (PTV)로의 전환하는 예이다.¹⁴ 다른 흥미로운 예로서 킬레이트와 가용성 그룹의 역할을 하는 루이스 산을 사용하는 n-채널 사다리 고분자의 성막으로, 필름 형성 후 루이스 산을 세정으로 제거한다.¹⁵ 그러나 이러한 전구체를 이용한 반도체 전환 방법은 고이동도를 달성하기 위하여 전구체의 반도체 전환 온도가 125 °C 이상으로 높고, 저가격의 플라스틱 기판을 적용하기에 어려울 수 있으며, 추가 가열공정은 공정시간을 늘리는 단점이 있다. 따라서 우수한 반도체 특성이 확보될 수만 있다면 가용성 고분자를 직접 성막하는 것이 바람직하다.

한편, 많은 고분자들과 올리고머들은 용액으로부터 직접 성막되어 질 수 있고, 특히 고분자는 대면적에서 우수한 균일도를 가진 박막을 형성할 수 있지만, 넓은 범위의 분자배열질서를 좋은 상태로 유지하기가 쉽지 않다. 최근 regioregular poly(3-hexylthiophene) (P3HT)와 그 유도체로^{16,17} 용액코팅하여 0.1 cm²/V-s 이상의 이동도를 얻었고 많은 P3HT 트랜지스터가 발표되었다. 반면, 올리고머는 컬럼 (column) 또는 승화를 통하여 쉽게 정제할 수 있지만, 결정화되기 쉬우므로 대면적에 균일한 필름을 성막하기 어렵다. 최적화된 성막조건으로 높은 이동도를 보이는 다양한 올리고머들이 보고되었다.¹⁸

용액 성막으로는 스핀-코팅과 용액-캐스팅 방법이 주로 사용된다. 스핀-코팅은 용매 증발이 비교적 빨리 일어나므로 용매-캐스팅보다 분자가 정렬배열할 시간이 적게 허용된다. 높은 분자정렬배열 경향을 가지는 재료는 스핀-코팅으로도 매우 높은 이동도를 얻을 수 있다.¹⁶ 예를 들어 80% regioregularity를

가지는 P3HT는 스핀-코팅에서는 thiophene 고리의 평면이 기판의 표면에 평행하게 배향하는 반면 (**그림 2 (b)**), 용액-캐스팅에서는 기판표면에 수직으로 배향하고 이때의 이동도가 10배 이상 증가한다 (**그림 2 (a)**). 그러나 만약 regioregularity가 95% 이상이 되면 스핀-코팅과 용액-캐스팅 방법이 비슷한 이동도를 보여준다.¹⁶

따라서 용액성막에 있어 반도체 농도, 용매증발속도, 용매의 종류, 반도체 용해도, 기판 표면의 성질 등은 반도체 필름의 막질에 중요한 영향을 미친다. 고분자 반도체에 있어 분자량과 분자량분포 또한 박막의 형태에 많은 영향을 준다. 스핀-코팅 P3HT의 경우 분자량이 증가함에 따라 이동도가 다소 커지는 경향을 보였다.¹⁹

Langmuir-Blodgett (LB) 기술은 유기반도체 박막을 적층하는 다른 가능한 방법이다. LB막은 정돈된 amphiphilic 분자 어레이로서 물 표면에 블레이

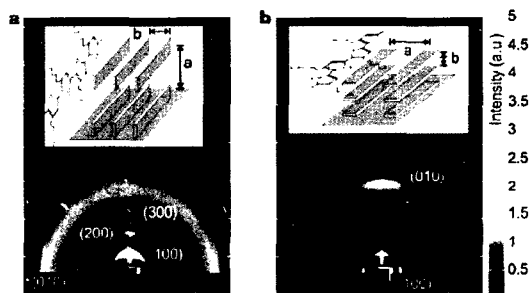


그림 2. TFT 기판에 대한 P3HT의 2가지 다른 배열의 wide-angle X-ray scattering image. SiO₂/Si 기판 위 (a) 96%, (b) 81%의 regioregularity를 가진 P3HT; 스핀-코팅, 70~100 nm 두께.

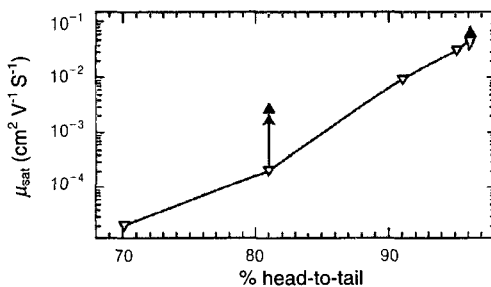


그림 3. 스핀-코팅 (역삼각형)과 용액-캐스팅 (삼각형)으로 성막된 top-contact P3HT TFT (채널 폭 W=1.5 mm, 채널 길이 L=75 μm)들의 regioregularity에 따른 상온에서 이동도 변화.

드로 수축시켜 형성한 다음 단일막 또는 다중막으로 기관 위에 전사 (transfer) 되어진다. LB막에서 대개 분자들이 잘 배열되는 성질을 이용하여 OTFT의 제작에 적용되었다. Amphiphilic 고분자는 아니지만 P3HT와 같은 고분자도 사용되었는데, 공기-물 계면에서 잘 정돈된 P3HT 단분자 필름이 형성되기는 어려웠다. 거의 이방성이 없는 필름이 형성되어 용액-캐스팅에 의한 이동도와 거의 비슷한 크기를 보여주었다.²⁰

2.2 유기고분자 반도체 패터닝 방법

2.2.1 잉크젯 프린팅 (Ink-jet Printing)

잉크젯 프린팅은 고해상도의 그림이나 텍스트를 프린팅하는 보편화된 기술로서, OTFT에서도 특별히 조합된 고분자 용액을 카트리지에 주입해서 간단히 프린트할 수 있다. 고해상도 잉크젯 프린팅 기술을 이용한 전-고분자 TFT가 발표되었다.²¹ **그림 4**에서 보듯이 소스, 드레인, 게이트 전극이 polystyrene sulfonic acid가 도핑된 전도성 poly(3,4-ethylenedioxythiophene) (PEDOT/PSS) 수용성 잉크로 프린트 되었다. 게이트 절연막은 스피코팅 polyvinylphenol (PVP), 반도체 층은 poly(9,9-dioctylfluorene-co-bithiophene) (F8T2) 이다. 잉크젯을 이용한 가장 작은 패터닝폭은 표면패턴 없이 대개 25 μm 이고, 더 작은 크기는 hydrophobic dewetting 패턴이 사용된다. 수계 PEDOT/PSS 방울이 1/2로 분리되어 사이에 작은 틈을 형성하는 기술을 이용하여 채널 길이에 대한 프린팅 해상도를 200 nm 까지 낮추었다.²² PARC의 Street 그룹에서는 acoustic 잉크젯 프린팅을 이용하여 소스-드레인 패턴 위에 regioregular polythiophene 고분자를 적층하여 이동도 0.1 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 과 10^6 에 가까운 on-off 전류비

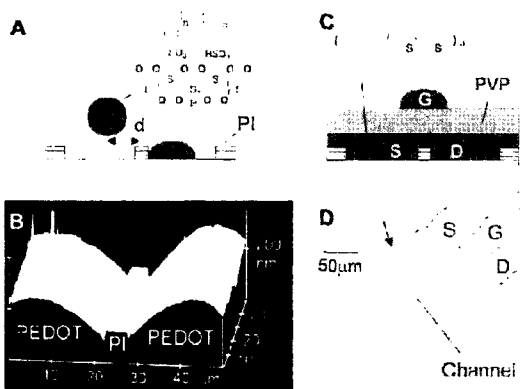


그림 4. 고해상도 잉크젯 프린팅 diagram (5 μm 채널 길이).

를 얻었다.²³ 최근 고해상도 잉크젯 프린팅 기술은 5 μm 채널길이의 전체-고분자 TFT회로 제작이 가능하도록 한다.³¹

2.2.2 스크린 프린팅 (Screen Printing)

스크린 프린팅은 비교적 단순한 프린팅 방법으로 프린팅 회로 보드 (PCB) 제작에 많이 사용된다. 기관 표면 위에 스크린 마스크를 대고 특수 제작된 잉크를 발라서 원하는 패턴을 형성하는 방법이다. 스크린 프린팅은 재현성이 있는 가장 작은 패턴크기는 75 μm 이다. 전도성 잉크로 100 μm 의 채널길이를 가진 소스-드레인과 게이트 전극을 패터닝하는데 사용되었다.²⁴

2.2.3 레이저 열전사 프린팅 (Laser Thermal Transfer Printing)

레이저 이미징 (또는 thermal imaging)이라 불리는 이 건식공정은 LCD의 컬러필터의 제작에 사용되고 있으며, 대면적 프린팅이 가능하다. 고분자 또는 고분자 nanoparticle composite을 포함하는 다양한 재료들을 이 방법으로 전사할 수 있다. 이 방법의 장점은 고체의 막의 용제전사 (ablative transfer)에 의하여 용매 친화성 문제를 피할 수 있어, 대면적, 고해상도, OTFT의 전극으로 전도성 고분자의 건식 프린팅에 사용된다.²⁵ 레이저 프린팅 공정은 **그림 5**에서와 보듯이 두개의 필름 (하나는 다층 donor로써, 다른 하나는 receiver로 작용)을 진공에서 붙인 다음, 얇은 흡수층에서 적외선 레이저 빔의 빛이 열로 변하게 된다. 주위의 재료들이 분해되면서 발생하는 가스 버블이 receiver 필름 위에 전도성 막을

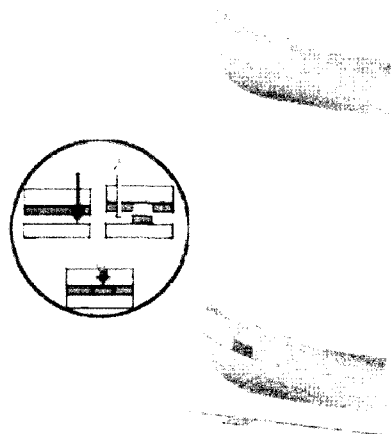


그림 5. 레이저 프린팅 공정.

밀어서 붙게 한다. 그 다음 donor와 receiver 필름을 분리하면 패턴이 형성된 전도막이 receiver에 남는다. 3,4,9,10-perylene-tetracarboxylic dianhydride (PTCDA)의 excimer laser ablation (ELA)에 의한 유기반도체 박막을 만들었다.²⁶ 박막 전도도는 laser ablation의 조건에 크게 의존한다.

2.2.4 마이크로컨택트 프린팅 (Microcontact Printing)

스크린 프린팅과 잉크젯 프린팅은 기술적 측면에서 organic electronics의 다양한 영역에서 개발 및 응용되고 있다. 하지만 잉크젯 프린팅은 고해상도 표면 dewetting pattern을 사용하지 않고는 소스-드레인사의 간격과 같은 미세 패턴을 프린팅하는 것은 매우 어렵다. 엘라스토머릭 스탬프와 몰드를 사용하는 소프트 리소그래피 (soft-lithography)라고 하는 새로운 고해상도 리소그래피 방법이 알려졌다. Organic electronics에서 소스-드레인 전극 패턴을 위해 이 방법이 여러 그룹에 의해 사용되었다.²⁷ 마이크로컨택트 프린팅은 소프트 리소그래피법의 가장 일반적인 예이다. 이 공정의 분자전사 원리는 기판과 스탬프 사이에서 접촉시 표면에서 분자간 nanoscale interaction에 의한 물리적 또는 화학적 변화가 발생하여 스탬프로부터 기판으로 재료의 전사가 일어나게 한다.

마이크로 컨택트 프린팅의 해상도는 스탬프의 제작을 위해 사용되는 엘라스토머의 modulus와 관련이 있다. 수십 나노미터의 작은 패턴 사이즈가 마이크로 컨택트 프린팅으로 만들어 질 수 있다. Polydimethoxysilane (PDMS) 스탬프의 소프트 리소그래피법은 gold 소스-드레인 전극의 에칭 마스크로 사용되는 self-assembled monolayer (SAM)을 선택적으로 도포하는데 사용되었다.²⁸ 포토리소그래피법의 phase-shift mask로서 PDMS 스탬프를 사용하여 0.1 μm 의 채널길이를 가진 gold 소스-드레인 전극을 형성했다.²⁹ 고분자 전극의 선택적 용액도포는 micromolding in capillaries (MIMIC)으로 달성했다.³⁰

2.3 용액 공정을 이용한 유기TFT 능동구동디스플레이

Philips에서는 2001년 유리기판 위에 Au 소스-드레인, 게이트 전극을 포토리소그래피법으로 형성하고 고분자 반도체로 polythienylenevinylene을 사용하여 박막트랜지스터를 형성하고 그위에 PDLC를 올려서 2.1인치 OTFT-PDLC 디스플레이를 개발하였다. 해상도는 96 \times 64 라인, 화소크기는 500 μm \times 500 μm 이고, TFT 특성은 이동도가 0.001

$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, on/off 전류비가 10^3 이다.³²

이후 Philips는 Polymer Vision이라고 하는 회사를 설립하여 플라스틱 기판을 기반으로 하는 전자 페이퍼 사업을 본격적으로 진행하고 있다. 그림 7에 보는 바와 같이 전자페이퍼를 위한 4.7" e-Ink 디스플레이를 개발하였다. 고분자 반도체를 사용한 것은 아니지만, 플라스틱 기판위에 펜타센을 스퍼코팅공정을 통하여 성막하였고, 해상도는 85 ppi (320 \times 240), 픽셀크기는 300 \times 300 μm , 개구율 77%의 유기 TFT 어레이를 제작하였다. 그 위에 전기영동디스플레이 필름을 라미네이션하여 디스플레이 두께 300 μm , Curvature Radius 2 cm의 플렉시블 전자페이퍼를 개발하였다.³³ 전계 이동도는 0.02 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, W/L은 140/5 μm 이었다.

Cambridge 대학의 Cavendish Lab에서 분리된 벤처 기업인 Plastic Logic은 P3HT나 F8T2 등의 폴리티오펜계 재료를 채용한 고분자 박막트랜지스터 어레이를 시험제작하고 있다. 캐리어 이동도는 최대 0.02 cm^2/Vs 로 펜타센에 비해 현저히 뒤떨어 지기



그림 6. Philips의 2.1" OTFT-PDLC.



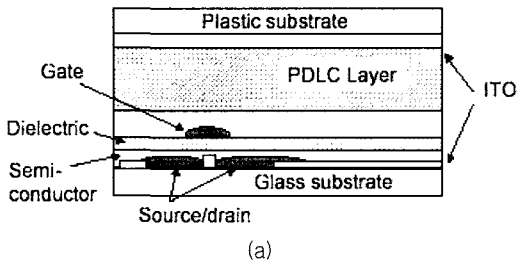
그림 7. Polymer Vision의 4.7" OTFT e-Ink 디스플레이.

는 하지만, 높은 동작주파수가 요구되지 않고, 대량으로 저렴하게 TFT를 제조하고자 하는 저가형 디스플레이 용도를 중심으로 응용범위는 넓을 것을 기대하고 있다. Plastic Logic은 그림 7과 8에서와 같이 잉크젯 프린팅 기술을 이용해 채널길이 5 μm 의 유기박막트랜지스터 back plane을 제작하였고, 그 위에 PDLC 또는 Gyricon Media의 전기영동필름을 적층하여 플라스틱 능동구동 디스플레이를 시험 제작하였다.³⁴

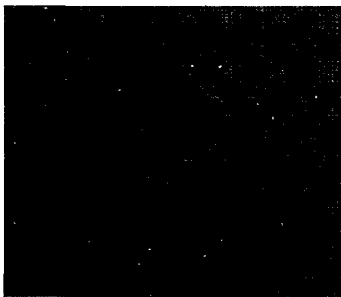
이는 앞서 설명한 바와 같이 잉크젯 분사기술을 이용해 PEDOT 라는 고분자재료를 뿜어 부착시켜, 게이트전극과 소스전극, 드레인 전극을 형성하였다. 소스전극과 드레인전극 사이에 PEDOT가 잘 붙지 않는 폴리이미드로 형성한 패턴을 설치한다. 이것으로 소스전극과 드레인전극간 미세 패턴이 형성되게 한다. 유기반도체에는 F8T2를 이용하였다. TFT 어레이의 이동도는 $0.02 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, on 전류는 $4.5 \times 10^{-7} \text{ A}$, on-off 전류비는 10^3 수준이었다.

3. 결론

앞에서 고분자 반도체의 박막특성 및 성능, 고해상



(a)



(b)

그림 8. Active matrix PDLC display. (a) pixel의 단면그림, (b) 4 Hz 구동그림.



그림 9. Plastic Logic의 printed polymer TFT e-Paper prototype.

도 패터닝 방법, 고분자 능동구동 소자 및 이를 이용한 능동구동 디스플레이의 다양한 예를 살펴 보았다. 고분자 반도체의 전계 이동도와 on-off 전류비 등의 소자성능은 고분자의 미세구조를 control할 수 있는 자기 조직화 기술의 발전과 새로운 박막 형성 기술의 발전에 달려 있다. 최근 고분자 TFT의 단위소자 특성은 비정질 실리콘 TFT의 특성에 근접하고 있다. 아직은 상업화를 위해서는 신뢰성을 바탕으로 한 유기반도체의 특성 개선뿐만 아니라, 현재의 화학기상증착, 포토리소그래피, 건식시각공정 등의 값비싼 반도체 공정을 대체할 수 있는 안정된 유기 반도체 저원가 공정개발이 이루어져야 한다. 그러나 고분자 반도체의 패터닝은 프린팅과 용액공정에 의해 저원가 공정을 적용한 값싼 일렉트로닉 디바이스를 대량으로 생산할 수 있는 무한한 가능성을 가짐으로써, 기존의 실리콘 소자와 차별화된 중요한 장점을 지니고 있다. 따라서 향후 유기고분자 박막 트랜지스터에 관한 연구는 전망이 매우 밝으며 많은 좋은 결과가 나올 것으로 예상된다.

참고문헌

1. Fuchigami, A. Tsumura, and H. Koezuka, *Appl Phys Lett.*, **63**, 1372 (1993).
2. M. V. D. Auweraer, F. C. d. Schryver, P. M. Boersenberger, and H. Bassler, *Adv Mat.*, **6**, 1992 (1994).
3. H. Rirringhaus, R. J. Wilson, R. H. Friend, M. Inbasekaran, W. Wu, E. P. Woo, M. Grell, and D. C. Bradley, *Appl Phys Lett.*, **77**, 406 (2000).
4. J. Paloheimo, H. Stubb, P. Yli-Lahti, P. Dyrekelev,

- and O. Inganas. *Thin Solid Films*, **210-211**, 283 (1992).
5. P. Dyreklev, G. Gustafsson, O. Inganas, and H. Stubb, *Sol State Comm.*, **82**, 317 (1992)..
 6. F. Cacialli, R. Daik, P. Dounis, W. J. Feast, R. H. Friend, N. D. Haylett, C. P. Jarrett, C. Schoenenberger, J. A. Stephens, and G. Widawski, *Philos. Trans. R Soc. London Ser. A*, **355**, 707 (1997).
 7. K. Pichler, R. H. Friend, K. A. Murray, A. B. Holmes, and S. C. Moratti, *Mol Cryst Liq. Cryst.*, **256**, 671 (1994).
 8. H. Sirringhaus, N. Tessler, and R. H. Friend, *Science*, **280**, 1741 (1998).
 9. A. Ullmann, J. Ficker, W. Fix, H. Rost, W. Clemens, I. McCulloch, and M. Giles, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **665**, C7. 5.1 (2001).
 10. G. H. Gelinck, T. C. T. Geuns, and D. M. Dleeuw, *Appl Phys Lett.*, **77**, 1487 (2000).
 11. B. Crone, A. Dodabalapur, Y.-Y. Lin, R. W. Filas, Z. Bao, A. LaDuca, , R. Sarpeshkar, H. E. Ktz, and W. Li, *Nature*, **403**, 521 (2000).
 12. A. Afzali, C. D. Dimitrakopoulos, and T. O. Graham, *Adv Mater*, **15**, 2066 (2003).
 13. A. R. Murphy, J. M. J. Frechet, P. Chang, J. Lee, and V. Subramanian, *J. Am. Chem. Soc.*, **126**, 1596 (2004).
 14. H. Fuchigami, A. Tsumura, and H. Koezuka, *Appl. Phys. Lett.*, **63**, 1372 (1993).
 15. A. Babel and S. A. Jenekhe, *J. Am. Chem. Soc.*, **125**, 13656 (2003).
 16. H. Sirringhaus, P. J. Brown, R. H. Friend, M. M. Nielsen, K. Bechgaard, V. B. M. W. Langeveld, A. J. H. Spiering, R. A. J. Janssen, E. W. Meijer, P. Herwig, and D. M. de Leeuw, *Nature*, **401**, 685 (1999).
 17. Y. H. Kim, S. K. Park, D. G. Moor, W. K. Kim, and J. I. Han, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43**, 3605 (2004).
 18. C. D. Sheraw, T. N. Jackson, D. L. Eaton, and J. E. Anthony, *Adv. Mater.*, **15**, 2009 (2003).
 19. J. R. Kline and M. D. McGehee, *Adv. Mater.*, **15**, 1519 (2003).
 20. G. F. Xu, Z. Bao, and J. T. Groves, *Langmuir*, **16**, 1834 (2000).
 21. H. Sirringhaus, T. Kawase, R. H. Friend, T. Shimoda, M. Inbasekaran, W. Wu, and E. P. Woo, *Science*, **290**, 2123 (2000).
 22. J. Z. Wang, Z. H. Zheng, H. W. Li, W. T. S. Huck, and H. Sirringhaus, *Nat. Mater.*, **3**, 171 (2004).
 23. K. E. Paul, W. S. Wong, S. E. Ready, and R. A. Street, *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 2070 (2003).
 24. Z. Bao, *Adv Mat.*, **227**, 227 (2000).
 25. G. B. Blanchet, Y. L. Loo, J. A. Rogers, F. Gao, and C. R. Fincher, *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 463 (2003).
 26. S. Nishio, H. Sato, and T. Yamabe, *Appl. Phys. A*, **69**, S711 (1999).
 27. M. Leufgen, A. Lebib, T. Muck, U. Bass, V. Wagner, T. Borzenko, G. Schmidt, J. Geurts, and L. W. Molenkamp, *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 1582 (2004).
 28. J. A. Rogers, Z. Bao, A. Dodabalapur, and A. Makhija, *IEEE Electron Devices Letters*, **21**, 100 (2000).
 29. J. A. Rogers, A. Dodabalapur, Z. Bao, and H. E. Katz, *Appl Phys Lett.*, **75**, 1010 (1999)..
 30. S. Beh, I. T. Kim, D. Qin, Y. Xia, and G. M. Whitesides, *Adv Mat.*, **11**, 1038 (1999).
 31. Sirringhaus, T. Kawase, R. H. Friend, T. Shimoda, M. Inbasekaran, W. Wu, and E. P. Woo, *Science*, **290**, 2123 (2000).
 32. E. A. Huitema *et al*, *Nature*, **414**, 599 (2001).
 33. G. H. Gelinck *et al*, *Nature Materials*, **3**, 106 (2004).
 34. H. Sirringhaus *et al.*, *SID03 Digest*, 1084 (2003).