

유기박막트랜지스터의 기술현황 및 전망

송 정 근 (동아대학교 전자공학과)

I. 서 론

유기박막트랜지스터 (organic thin film transistor; OTFT)는 플라스틱 로직의 2010년 4월 OTFT 기반 AMEPD 패널을 장착한 전자책의 출시를 앞두고 상용화 단계에 접어들었다고 볼 수 있지만, 아직도 기본적인 물리현상에 대한 이해와 공정 개선 면에서 연구할 것이 많은 새롭게 부상하는 분야이다.

OTFT에 대한 관심은 유기반도체의 전기적 특성을 화학적으로 제어할 수 있는 기술이 개발되면서 시작되었고, 무기반도체와 같이 전하의 전송과 저장이 가능하게 되면서 확대되었으며, 이것을 스위치 및 메모리 소자에 적용하면서 급속히 증대되었다. 그러나 OTFT를 무기반도체 소자를 대체하여 무어의 법칙을 이어갈 차세대 반도체소자로 개발하는 것은 이론적으로 가능할 지라도 바른 방향은 아니라고 생각된다. OTFT는 무기반도체로써 구현하기 어려운 유기반도체의 고유 특성 즉 어떤 종류의 기판에도 손쉽게 대면적 박막을 성형할 수 있는 점, 그리고 저온 용액공정이 가능한 점을 극대화할 수 있는 분야에 적용한다면 디스플레이, 조명, 태양전지, RFID, 광통신 등에서 새로운 응용분야를 창출할 수 있을 것으로 기대한다.

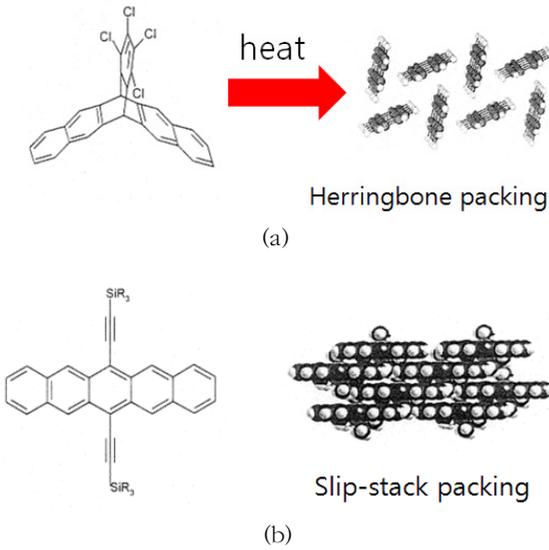
본 논문에서는 상기한 유기반도체의 특성 즉 저온 용액공정의 장점을 극대화하는 연구를 중심으로 최근 OTFT의 연구동향을 살펴보고 응용분야를 전망해 본다.

II. 유기반도체 및 유전체의 기술동향

1. 유기반도체

OTFT의 성능지표로서 인가된 게이트 전압에 대한 드레인 전류의 크기를 결정하는 전계이동도를 흔히 사용하므로 전계이동도는 유기반도체의 중요한 물성 파라미터이다. 전계이동도를 결정하는 가장 중요한 요소는 유기반도체의 분자구조와 이웃한 분자간의 $\pi-\pi$ 중첩도를 높이는 재료의 특성이다. 이와 더불어 넓은 면적에 걸쳐 $\pi-\pi$ 중첩이 이루어지도록 하여 전류의 흐름을 원활히 할 수 있는 박막 공정기술이 더해져야 높은 전계이동도를 얻을 수 있다.

유기반도체로서 단분자와 고분자 등 다양한 재료가 보고되었다. 그 중에서 펜타센 단분자가 전계이동도 $1 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 이상으로 가장 우수한 성능을 나타내고 있다. 그러나 펜타센은 진공증착해야 하므로 용액공정의 장점을 실현할 수 없는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 [그림 1-a]와 같이 펜타센 분자에 용해성 그룹을 부착한 펜타센 전구체를 사용하는 방법이 보고된 바 있다^[1]. 펜타센 전구체 분자는 상온에서는 용액상태이므로 용액공정으로 박막을 쉽게 성형할 수 있고, 열을 가하면 용해성 그룹이 제거되어 펜타센 분자에 의한 결정이 형성된다. 폴리머 비전은 펜타센 전구체를 사용하여 전계이동도 $0.8 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 을 실현하였다^[2]. 금속이 포함된 tetrabenzoporphyrin 전구체는 전계이동도가 $1.3 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 으로 우수한 결과를 보였다^[3].



[그림 1] 용액성 단분자 유기반도체; a) 펜타센 전구체를 이용한 용액성 단분자, b) TIPS 펜타센

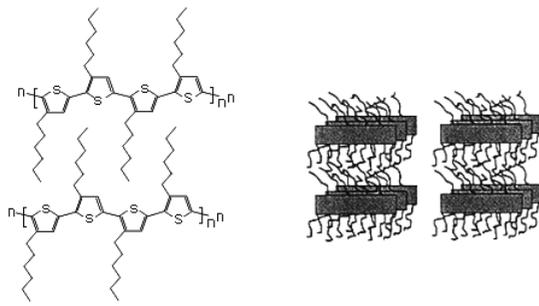
이와 다른 방식의 단분자로서 [그림 1-b]와 같이 펜타센 분자에 silylethynyl이라는 측쇄를 부착한 용액성 분자로서 6,13-bis(triisopropylsilylethynyl) (TIPS) 펜타센이 있다^[4]. TIPS 펜타센은 분자의 용해도를 조절하여 결정 핵자의 형성과 박막의 균일도를 조절할 수 있는 특징이 있다. 전계이동도가 $1 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 로서 용액성 유기반도체로서는 아주 우수한 성능을 나타내었다. 그 이유는 [그림 1-b]에서 보듯이 결정의 형태가 진공증착한 펜타센의 헤링본(Herringbone) 결정구조와 달리 펜타센 분자가 면과 면이 겹침으로써(slip-stack) π - π 중첩도가 증가하기 때문이다. 이와 유사한 분자로서 trithylsilylethynylanthradithiophene (TES-ADT)가 있다. 건조 후 TES-ADT 박막은 약간의 결정성을 보이지만 비정질 특성이 많이 나타나고, 이것을 유기용매 분위기에서 일정온도로 가열하여 결정성을 조절하여 전계이동도가 $1 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 로 증가시킬 수 있지만 결정성을 조절하기 어려운 것이 단점이다^[5].

또 다른 방법으로 유기반도체와 바인더 유전체 고분자를 혼합한 용액을 사용한다. 이 용액을 박막으로 도포하면 유기반도체층이 바인더층으로부터 상분리되어 반도체 층은 박막의 표면에, 그리고 바인더층은 아래에 형성되는데, 한 번의 성형으로 반도체와 유전체층을 동시에 제작

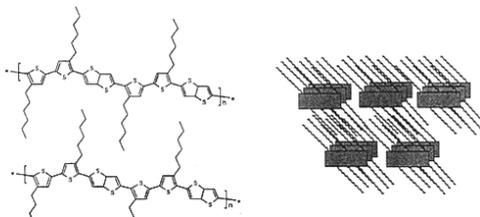
할 수 있어 간단한 공정이 장점이다. 예로서 반도체 고분자와 바인더 유전체 고분자를 혼합한 보고가 있고^[6], TIPS를 바인더 유전체 고분자와 혼합한 사례도 있다^[7]. 전계이동도는 $0.1 \sim 1 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 정도의 범위로써 다소 우수한 특성을 나타내었다. 특히 반도체와 유전체의 계면이 공기 중에 노출되지 않기 때문에 안정성이 우수한 것으로 알려지고 있다^[8].

고분자 유기반도체의 경우 $1 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 정도의 높은 전계이동도를 가지려면 용해성 그룹이 결정화를 방해하지 않으면서 분자 간 π - π 중첩이 스스로 이루어지도록 하여 긴 거리에 걸쳐 전하전송통로가 형성되도록 하여야 한다.

초기에 연구된 고분자들은 비정질 반도체로서 전계이동도가 $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 정도 이었는데, 비정질 고분자 네트워크에서 전하전송 통로상의 에너지 무질서를 최소화하도록 고분자를 설계하여 전계이동도를 $10^2 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 로 높일 수 있었다. 이러한 예로서 polytriarylamine (PTAA)^[9,10]와 polyfluorene 계열의 고분자^[11]가 있다. 보다 발전된 고분자로는 위에서 언급한 자기정렬이 가능한 공액성 고분자가 있는데, 이들은 [그림 2]와 같이 고분자들이 면대면으로 자기정렬하고 층간의 간격은 측쇄 길이만큼 분리되어 결정 박막을 형성한다. 대표적인 고분자로서 [그림 2-a]의 poly-3-hexylthiophene (P3HT)가 있으며, 전계이동도가 $0.1 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 이상으로 우수한 성능을 나타내었다^[12,13]. 그러나, P3HT는 대기 안정성이 좋지 못하고 예상과 달리 [그림 2-a]에서 보듯이 측쇄의 교차배열(interdigitation)에 의한 자기정렬 결정화가 잘 되지 않는다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 면대면 자기정렬 기능을 유지하면서 이온화 에너지를 증가시켜 대기 안정성도 개선하기 위하여 고분자 백본의 화학구조를 변형한 분자들이 소개되었다. 예로서 poly(3,3'-dialkyl-quaterthiophene) (PQT)^[14], poly(2,5-bis(3-tetradecylthiophene-2yl)thieno[3,2-b]thiophene (pBTTT)^[15]가 있다. 후자의 경우 [그림 2-b]와 같이 측쇄의 밀도를 감소시켜 상하 분자의 측쇄 간 교차배열이 잘 이루어지도록 함으로써 전계이동도를 $0.7 \sim 1 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 로 향상시킬 수 있었다. 최근에 보고된 Benzothiadiazole^[16]과 cyclopentadithiophene^[17]은 전계이동도가 $1.4 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 으로 최고의 성능을 나타내었다.



(a)



(b)

[그림 2] 고분자 유기반도체; a) P3HT, b) pBTTT

n형 반도체는 게이트 유전체의 선택이 중요하다. 대부분의 유기 반도체는 전자 친화력이 3.5 ~ 4 eV로써 SiO₂를 게이트 유전체로 사용할 경우 유전체 표면의 실라놀 그룹이 전자와 반응하여 트랩 역할을 하므로 전자층이 형성될 수 없어 소자로서 동작하지 못한다^[18]. 따라서 n형 반도체를 작동 시키려면 이러한 전자 트랩을 제거한 게이트 유전체를 사용하는 것이 중요하다. 본질적으로 대부분의 유기 반도체는 적절한 게이트 유전체, 소스/드레인 전극, 그리고 산소와 수분 등의 외부 환경으로부터 보호되면 전자와 정공 모두 전송할 수 있는 양극성 (ambipolar) 특성을 나타낸다^[19].

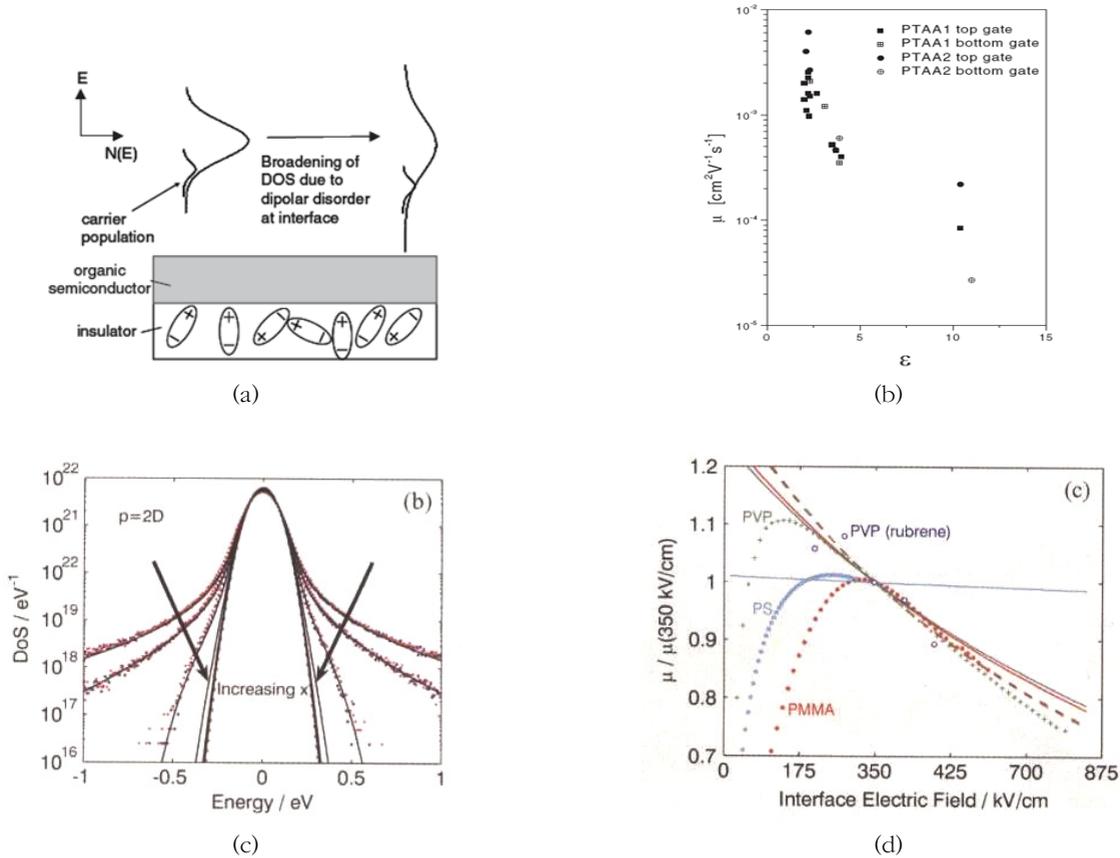
신뢰도 측면에서는 p형이 n형보다 훨씬 우수하다. p형 반도체는 수 개월간 동작하지만 n형은 단 몇 시간 만에 열화되는 경우가 많다. 이것은 일반적으로 n형 반도체에 있는 음 전하를 띤 라디칼 음이온이 산소와 수분이 있으면 불안정해지기 때문이다^[20]. 이러한 대기 안정성을 확보하려면 전자 친화력이 4.3 eV 이상 되어야 한다고 보고된 바 있다^[21,22]. 이것은 perylene-diimide 코어 주변에

cyano 그룹 혹은 fluorinated 측쇄와 같은 전자흡인기를 부착하여 구현할 수 있다. 이러한 분자들은 용액공정이 가능하며 n형 반도체로서 전계이동도가 $10^{-2} \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 이고 대기 안정도도 우수한 것으로 보고되었다^[23]. 현재는 제품에 적용하기 위해서는 성능과 대기 안정도 측면에서 n형보다 p형 반도체를 선택하는 것이 바람직하지만, 분자 특성을 조절할 수 있는 유기화학의 기술이 탁월하므로 조만간 성능과 대기 안정도 모두 뛰어난 n형 반도체가 개발될 것으로 기대한다.

2. 유기유전체

OTFT에서 유전체는 게이트 전극으로 채널의 캐리어가 누설되는 것을 방지하는 역할을 하므로 누설전류와 파괴전계가 중요한 성능지표이며, 각각 $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 이하, 1 MV/cm 이상이어야 디스플레이에 적용할 수 있다. 그리고 용액성 유기반도체를 사용할 경우 유전체는 유기반도체의 유기용매에 대한 내화학성도 중요한 성능지표이다. 이외에도 OTFT에서 캐리어는 좁은 채널 영역에서 반도체/유전체의 계면 가까이 붙어 이동하고, 따라서 유전체 전하특성의 영향을 직접적으로 받으므로 유전체의 유전율도 중요한 성능지표이다. 특히 반도체가 비정질이고 유전체의 유전율이 클 경우 유전체 고분자들의 쌍극자가 채널의 캐리어에 더 큰 영향을 준다. [그림 3-a]에서 보듯이 유전체 고분자들이 무질서하게 분포되어 있으므로 채널 전하에 미치는 그 영향도 무질서하여 비정질 유기반도체의 에너지 무질서도는 더 증가하게 된다. 따라서 상태밀도의 에너지 분포 (DOS)가 에너지 갭으로 더 깊어져서 전계이동도가 감소한다^[24].

쌍극자의 영향은 [그림 3-b]와 같이 유전체의 유전율에 대한 비정질 유기반도체 PTAA의 전계이동도를 살펴보면 잘 알 수 있다. 쌍극자 크기가 증가할수록 즉 유전율이 증가할수록 전계이동도는 감소함으로써 쌍극자의 영향을 확인할 수 있다. 그러나 이러한 쌍극자의 영향은 계면으로부터 멀어질수록 급격히 감소한다. [그림 3-c]는 간단한 시뮬레이션으로 계면으로부터 거리에 대한 DOS를 나타낸 것으로 계면으로부터 반도체 벌크 쪽으로 거리가 멀어질수록 DOS의 폭의 확대가 급속히 감소하는 것을 볼 수



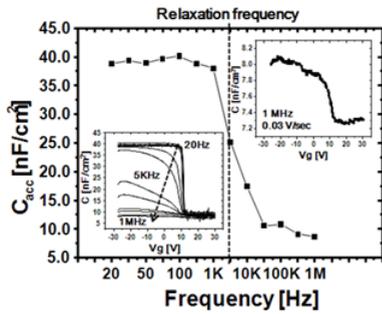
[그림 3] a) 유전체 고분자의 쌍극자 영향에 의한 유기반도체 DOS의 퍼짐 현상, b) 유전체 유전율과 PTAA 유기반도체의 전계이동도의 관계, c) 계면에서 반도체 벌크 방향의 거리에 대한 DOS의 변화, d) 전계 크기와 전계이동도의 관계

있다^[25]. 이러한 거리에 대한 영향은 전계이동도와 전계의 관계 그래프에서도 확인할 수 있다. [그림 3-d]에서 전계이동도는 전계가 증가할수록 급격히 감소하였는데, 이것은 전계가 증가할수록 캐리어는 계면으로 더 가까워지므로 쌍극자의 영향을 더 많이 받기 때문이다. 이와 같이 고유전율 유전체의 쌍극자 영향이 미치는 거리가 짧기 때문에 채널을 계면으로부터 분리할 수 있는 작은 공간을 채널과 계면 사이에 삽입할 수 있으면 그 영향을 제거할 수 있다. 최근 pBTTT를 사용하여 계면에 자기조립된 측쇄 영역을 채널을 계면으로부터 분리시키는 공간으로 활용하여 유전율의 영향을 받지 않는 전계이동도를 보고한 사례가 있다^[26].

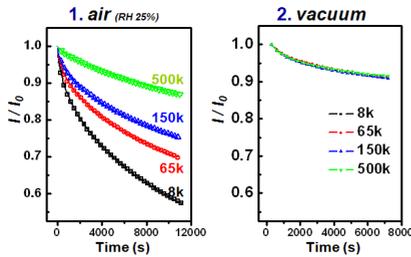
유기물 게이트 유전체는 공기 중 수분을 흡수하여 OTFT의 불안정한 전기적 특성과 열화의 원인이 될 수 있다^[27]. PVP 유전체의 경우 내포되어 있는 OH 페놀기가

수분을 흡착하고 0.1 q 전자 전하량 정도의 음전하를 띠게 된다. 이러한 전하는 유전체의 벌크와 계면에 존재함으로써 채널과 게이트 전극의 전하에 영향을 주어 새로운 캐패시턴스 효과를 만든다. 따라서 [그림 4-a]와 같이 채널이 형성되는 누적상태의 캐패시턴스가 이론보다 증가하고, 더욱이 증가량은 게이트 전압의 주파수가 증가함에 따라 감소하기 때문에 성능의 불안정을 초래한다.

그리고 이러한 수분의 흡수가 문턱전압 열화의 한 원인이 될 수 있다^[28]. Polystyrene (PS) 고분자 유전체를 사용한 OTFT를 진공과 공기 중에서 각각 바이어스 스트레스를 인가하였을 때 [그림 4-b]와 같이 진공 소자들의 전류는 변화가 없었으나 공기 소자들은 고분자의 분자량이 작을수록 문턱전압이 이동하여 전류가 감소하였다. 이것은 고분자의 분자량이 작을수록 수분이 흡착하기 용이한 고분자 말단의 밀도가 증가함으로써 유전체의 수분 흡수



(a)



(b)

[그림 4] a) PVP/펜타센 캐패시터의 주파수에 대한 변화, b) Polystyrene 유전체의 분자량 및 환경에 대한 OTFT의 문턱전압 이동에 의한 전류감소

량이 증가하여 변화가 크게 나타난 것이다. 이것은 유기 유전체의 수분 흡착이 성능의 불안정 및 열화의 원인이 될 수 있음을 보여준 것이다. 따라서 소자의 신뢰도를 높이려면 OH 폐놀기가 없고 분자량이 큰 고분자를 유전체로 사용하는 것이 유리하다는 것을 알 수 있다.

III. OTFT의 응용 및 전망

OTFT의 응용에 대해서 살펴본다. OTFT 기술은 성능과 공정 측면에서 플라스틱 기판에 제작하는 능동형 전기영동 디스플레이 (AMEPD)에 가장 적합하다.

사람들은 음악과 영화와 같은 비디오/오디오 정보를 디지털 신호로 변환하여 사용하지만 글자는 아직도 종이에 인쇄된 매체를 선호한다. 이것은 어떤 조명하에서도 읽을 수 있고, 가볍고 구부릴 수 있어 휴대하기 용이하기 때문이다. 전자책이 이러한 요건을 갖추려면 반사형, 쌍안정성, 높은 명암비, 그리고 구부릴 수 있도록 플라스틱 기판에 제조할 수 있어야 한다. OTFT는 용액공정과 저온

공정이 가능하므로 상기 요건을 만족하는 전자책에 가장 적합한 구동소자이다.

전자책에서 요구되는 구동소자의 성능은 LCD와 OLED에 비교하여 상대적으로 높지 않다. OTFT는 스캔 시간 동안 캐패시터의 전압을 원하는 크기로 충전할 수 있도록 충분한 전류를 공급할 수 있는 전계이동도, 한 프레임의 스캔이 완료되는 동안 그 전압을 유지할 수 있도록 누설전류가 충분히 작아야 한다. 전계이동도는 구동방식, 픽셀구조 등 복잡한 관계가 있지만 일반적으로 $10^{-2} \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 이상이면 충분하다.

OTFT로 구동하는 AMEPD의 시제품은 여러 번 소개되었다. 첫 사례는 2001년 Lucent와 e-ink 사가 34x34 해상도의 시제품을 발표하였다 [그림 5-a] [29]. 폴리머 비전은 5인치 크기에 QVGA 해상도, 반경 7.5 mm로 구부릴 수 있고 흑백의 16 그레이 레벨의 AMEPD 패널을 장착한 전자책을 선보였다 [그림 5-b] [30]. 플라스틱 로직은 e-ink사와 함께 대면적 A5 크기에 120만개의 OTFT로 150 ppi 해상도를 구현한 전자책을 출시할 예정이다 [그림 5-c]. 플라스틱 로직사는 독일 드레스덴에 생산공장을 설립하고 2010년 4월에 가볍고 내구성이 좋으며 종이책의 느낌을 나타내는 전자책 출시 계획을 발표하였다. 이와 같이 OTFT 기반의 AMEPD 패널을 장착한 전자책은 최근 10년간 큰 발전을 거듭하여 상용화 단계에 이르렀다. 전자책이 출시되면 OTFT의 첫 적용사례가 되어 OTFT의 시장이 본격적으로 형성될 것으로 예상된다.

OTFT는 AMLCD와 AMOLED의 구동소자로도 주목을 받고 있다. 유리 기판을 사용하는 AMLCD에서는 이미 a-Si TFT가 성공적으로 사용되고 있으므로 OTFT가 그렇게 매력적으로 받아들여지지 않는다. 다만 현재 사용하는 진공공정을 인쇄공정으로 대체하여 제조비용을 1/3 정도 축소할 수 있다면 아니면 플라스틱 기판을 사용하여 기계적 내구성을 강화할 수 있으면 OTFT를 적용할 것이다.

AMOLED는 위와 상황이 다르다. AMOLED는 필요한 전류 크기가 AMLCD에 비하여 크고 2개 이상의 트랜지스터를 사용해야 하고 전계이동도는 $1\text{--}3 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$, 그리고 픽셀을 구성하는 소자들의 문턱전압이 동일해야 하며 또한 스트레스에 대해서 열화되지 않아야 하는 등 소자의



(a)



(b)



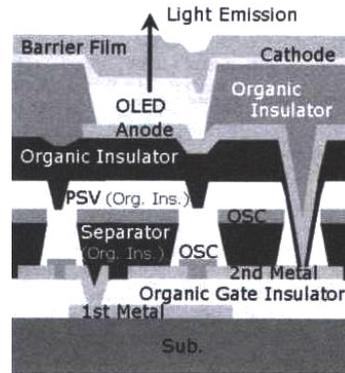
(c)

[그림 5] OTFT 기반의 AMEPD 패널 사례; a) Lucent의 최초 패널, b) 폴리머 비전의 전자책, c) 플라스틱 로직의 전자책

요구조건이 훨씬 까다롭다. 현재 이러한 요건을 만족스럽게 충족하는 소자는 없는 실정이다. a-Si TFT는 전계이동도가 이에 미치지 못하며, poly-Si TFT는 전계이동도는 우수하나 레이저 어닐링으로 a-Si을 단결정화해야 하므로 대면적 디스플레이에 적용하기에는 성능의 균일도 확보의 어려움과 큰 제조비용이 문제이다. OTFT는 상기한 바와 같이 전계이동도 $1 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 이상의 새로운 유기반도체들이 소개되고 있고, 더욱이 OLED와 동일한 유기소재와 유사한 제조공정을 사용하므로 공정의 집적화 및 호환성 측면에서 AMOLED에 적용될 가능성이 더 많다고 생각한다. 다만 바이어스 스트레스에 대한 신뢰도의 연구가 더 이루어져야 하며, 특히 플라스틱 기판을 사용할 경우



(a)



(b)

[그림 6] a) 소니의 OTFT 기반 AMOLED 패널, b) 단위 픽셀의 단면도

OLED에 적합한 내투습/내산소 특성이 우수한 보호재가 없으므로 상용화를 위해서는 이 문제를 시급히 해결해야 한다. 그러나 최근 소니는 2007년에 의미있는 시제품을 소개하였다. 플라스틱 기판에 OTFT로 구동하는 QQVGA급 풀컬러 AMOLED (2.5 인치, 80 ppi) 패널을 제작하여 OTFT 기반의 AMOLED의 가능성을 보여 주었다 [그림 6]^[31].

IV. 결 론

OTFT의 성능과 신뢰도가 급속히 개선되고 있는데, 이것은 소자의 물리현상에 대한 이해가 깊어짐에 따라 이를 근거로 우수한 성능의 신 유기소재를 합성하게 되고, 또한 재료의 순도를 향상시킴으로써 이루어지고 있다. 현재의 성능은 대체적으로 a-Si TFT에 버금가는 정도이고, 2010년에 OTFT를 기반으로한 AMEPD 패널을 장착한 최초의 상용화 제품으로서 전자책이 출시될 정도로 개선

되었다. 유기재료 고유의 특성인 150 °C 이하의 저온 용액공정기술을 잘 활용하면 플라스틱 기판에 대면적 코팅과, 동일한 유기재료를 사용하는 기능이 다른 여러 종류의 소자를 동일기판에 쉽게 집적할 수 있으므로 새로운 응용분야를 창출할 수 있을 것으로 기대한다. 아직 이러한 응용은 개념 확인 단계이며 상용화에는 이르지 못하고 있는데, 상용화를 위해서는 성능이 더 개선되어야 하고, 신뢰도 문제가 해결되어야 한다. 이러한 문제들은 원하는 분자들을 마음대로 합성할 수 있는 유기화학의 기술에 힘입어 조만간 해결될 것으로 기대한다.

참고 문헌

[1] Adv. Mater. 1999, 11(6), 480-483.
 [2] E.Huitema, in Proc.3rd Global Plastic Electron.Conf. Showcase, Frankfurt, Germany, 2007.
 [3] S. Aramaki, R.Yoshiyama, M.Sakai, and N.Ono, in Proc.Soc.Inf.Display(SID) 2005 Dig., 2005, pp.296-299.
 [4] J.E.Anthony, Chem.Rev., Vol.106, No.12, pp.5028-5048, 2006.
 [5] T. Minakata and Y.Natsume, Synth.Metals, Vol.153, No.1-3, pp.1-4, 2005.
 [6] S.Goffri, et. al., Nature Mater, Vol.5, No.12, pp.950-956, 2006.
 [7] J. Veres, in Proc. Mater. Rs. Soc. Spring Meeting 2006, San Francisco, CA, 2006.
 [8] K. Cho, Adv. Mater. 2009.
 [9] J. Veres, et.al, Adv. Funct. Mater., Vol.13, No.3, pp.199-204, 2003.
 [10] J. Veres, et.al, Chem. Mater., Vol.16, No.23, pp.4543-4555, 2004.
 [11] H. Sirringhaus, Adv. Mater., Vol.17, No.20, pp.2411-2425, 2005.
 [12] H. Sirringhaus and et. al., Nature, Vol.401, No.6754, pp.685-688, 1999.
 [13] Z. Bao, et.al, Appl. Phys. Lett., Vol.69, pp.4108-4110, 1996.
 [14] B. S. Ong, et.al, J. Amer. Chem. Soc., Vol.126, No.11, pp.3378-3379, 2004.
 [15] I. McCulloch, et.al, Nature Mater., Vol.5, No.4, pp.328-333, 2006.

[16] M. Zhang, et.al, J. Amer. Chem. Soc., Vol.129, No.12, pp.3472, 2007.
 [17] H. N. Tsao, et.al, Adv. Mater., Vol.21, No.2, pp.209, 2009.
 [18] L. L. Chua, et.al, Nature, Vol.434, No.7030, pp.194-199, 2005.
 [19] J. Zaumseil and H. Sirringhaus, Chem. Rev., Vol.107, No.4, pp.1296-1323, 2007.
 [20] D. M. deLeeuw, et.al, Synth. Metals, Vol.87, No.1, pp.53-59, 1997.
 [21] T. D. Anthopoulos, et.al, Appl. Phys. Lett., Vol.90, No.12, 2007.
 [22] B. A. Jones, et.al, Chem. Soc., Vol.129, No.49, pp.15 259-15 278, 2007.
 [23] B. Yoo, et.al, Adv. Mater., Vol.19, No.22, p.4028, 2007.
 [24] J. Veres, et.al,Adv. Funct. Mater., Vol.13, No.3, pp.199-204, 2003.
 [25] T. Richards, et.al, J. Chem. Phys., Vol.128, No.23, p.234 905, 2008.
 [26] N. Zhao, et.al, Advanced Materials, Vol.21, published online.
 [27] C.K. Song, et.al, APL, Vol.94, May, 2009.
 [28] 미투고; 포항공대 화학공학과 조길원 교수 연구결과
 [29] J. A. Rogers, et.al, Proc. Nat. Acad. Sci. USA, Vol.98, No.9, pp.4835-4840, 2001.
 [30] E. Huitema, in Proc. 3rd Global Plastic Electron. Conf. Showcase, Frankfurt, Germany, 2007.
 [31] I.yagi, et.al, in Proc. soc. inf. display(SID)07, Long Beach, CA 2007, pp.1753-175

저 자 약 력

송 정 근



- 1980년 : 서울대학교 전자공학과 학사
- 1984년 : 서울대학교 전자공학과 석사
- 1992년 : Ph.D. Univ. of Cincinnati, ECE, USA
- 1992년~현재 : 동아대학교 전자공학과 교수
- 관심분야 : 유기소자, Flexible Electronics & Displays