



TFT Based Flexible Display 핵심 기술

홍문표, 김동우(고려대학교)

I. 본 문

지난 60년 동안 디스플레이 시장 전반을 장악해왔던 CRT 디스플레이는 불과 10년도 채 안되어서 LCD와 PDP 등 평판디스플레이(FPD : Flat Panel Display) 에게 점점 더 그 자리를 빼앗겨가고 있다. 모니터, 노트북, TV, 휴대용 기기 및 생활용품까지도 FPD가 응용이 되어 이제는 FPD가 없는 세상은 상상할 수 없을 정도이다. 또한, 급속도로 발전해 가는 정보화기술로 인하여 언제 어디서나 쉽게 정보를 얻을 수 있는 유비쿼터스 시대로 접근하고 있는 지금, 휴대가 간편하고 이동성을 가진 휴대용 기기가 인기를 끌고 있다. 이에 따라 더 얇고 더 가벼우며 휴대하기 쉬운 경박형 디스플레이가 휴대용기기의 기본적인 요구사항이 되고 있고, 더 나아가 유비쿼터스 시대를 실현하는 정보기기로서 디자인변형이 자유로우며, 떨어뜨려도 깨지지 않고 유연하면서도 질긴 특성을 바탕으로, 때론 종이처럼 접거나 휘어지거나 두루마리처럼 말을 수 있는 이른바 '플렉서블 디스플레이(Flexible Display)'에 대한 필요성이 점점 대두되고 있어 각 국가별,

기업별로 플렉서블 디스플레이 관련 연구개발 경쟁이 치열하게 전개되고 있다.^[1-5] 이처럼 향후 Display 발전에 있어서 매우 중요한 최근 Thin Film Transistor(TFT) 기반의 Flexible Display에 대해 살펴해보도록 한다.

II. 서 론

플렉서블 디스플레이를 소개함에 앞서 우리는 그 정의를 명확히 할 필요가 있다. 플렉서블 디스플레이를 이해 할 때 기능적인 특성을 바탕으로 다양한 개념으로 받아들여지고 있다. 즉, 혹자는 두루마리 형태로 말 수 있는(Rollable) 디스플레이로, 혹자는 종이처럼 접거나 구부릴 수 있으며(Curved, Bendable) 외곽 디자인이 자유로운 디스플레이로, 또는 기관이 유연성(Flexibility)을 갖고 있어서 깨지지 않는 튼튼한 디스플레이로, 혹자는 플라스틱처럼 얇고 가벼운 기관을 사용하여 가볍고 얇은(Thin & Light) 디스플레이로 이해하기도 한다. 이러한 특성으로 인하여 현재의 모바일 디스플레이를 대체할 수 있는 디스플레이로

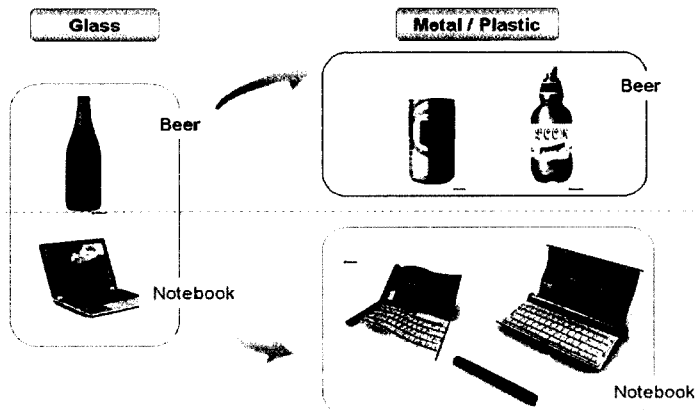
고려되기도 하며, 종이를 대체할 수 있는 e-Paper 개념의 디스플레이로 고려되기도 한다. 다양한 형태로 개발되고 있는 플렉서블 디스플레이의 보다 명확한 기초 정의와 이를 바탕으로 현재의 기술개발현황들을 살펴보도록 하겠다.

1. 플렉서블 디스플레이의 정의

앞서 언급한 것처럼, 플렉서블 디스플레이의 개념은 다양한 의미로 받아들여지고 있으며, 이 때문에 때로는 사용자와 기술개발자가 소통의 문제가 발생하기도 한다. 본장에서는 현재 디스플레이 산업의 근간인 평판디스플레이 기술이 새로운 차원으로 진화 발전한 기술적 의미로서 플렉서블 디스플레이의 개념을 정리하고자 한다.

우선, 플렉서블 디스플레이의 가장 기본적인 정의를 위해서 <그림 1> 과 같이 우리가 즐겨 마시는 맥주를 그 예로 설명하고자 한다.¹⁰⁾ 탄산가스를 많이 함유한 맥주는 초기에는 보관상의 기술적 한계로 유리병 형태로만 판매되었으나, 현대에 이르러 보관성과 이동성에 대한 소비자의 욕구를 충족하기 위하여 캔맥

주나 PET병 형태로도 판매되고 있다. 그러나 중요한 것은 보관 용기에 관계없이 맥주라는 내용물은 변함이 없고, 맥주의 맛과 향기라는 품질은 차이가 있어서는 안 된다. 플렉서블 디스플레이도 맥주와 마찬가지로 기본적인 출발은 유리기판을 기반으로 하는 디스플레이 Device 기술이 Metal Foil이나 플라스틱 Film과 같은 유연한 기판을 기반으로 하는 디스플레이 Device 기술로 변화한 것이다. 그러나, 하드웨어 기술관점에서 기판과 그와 관련된 기술의 변화를 전제로 하나 그 내용물인 디스플레이의 품질인 화질은 기존 유기기판 기반의 디스플레이인 TFT-LCD 또는 AM-OLED와 동일하거나 또는 향상된 수준을 유지하여야 함을 전제로 한다. 즉, 차세대 디스플레이로서 플렉서블 디스플레이가 새로운 전략 사업영역으로 자리매김을 하고, 거대 수익을 창출하기 위해서는 단순히 디스플레이 Device의 외관 형태(Form Factor)의 변화 뿐만 아니라, 현재의 고정세, 고성능 디스플레이 기기의 핵심기술인 TFT어레이 기술이 유연한 기판위에 저원가로 구현된 “저원가-대면적-능동형” 디스플레이로 정의되어야 한다.



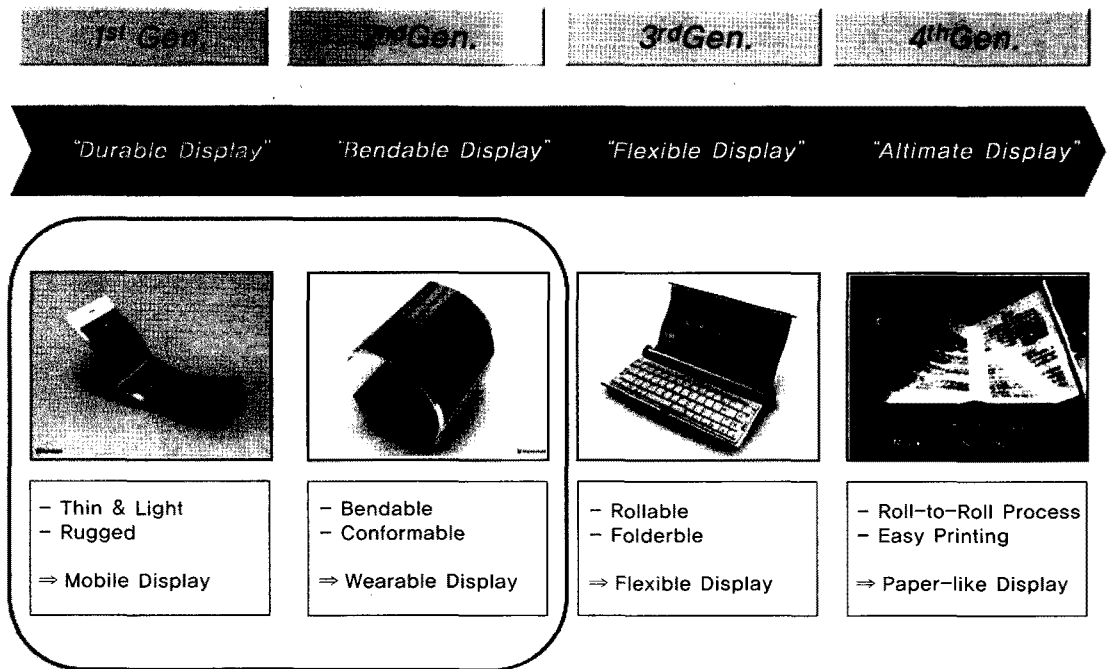
<그림 1> 플렉서블 디스플레이의 기초정의

2. Flexible Display Application

위와 같은 플렉서블 디스플레이의 정의를 만족하는 “진정한 의미의 플렉서블 디스플레이” 기술은 현재의 TFT 어레이 및 디스플레이 기술로는 구현이 어려워 이를 위한 기초연구가 장기간에 걸쳐 지속되어야 한다. 따라서 현재의 평판디스플레이 기술을 기반으로 단기간에 실현이 가능한 디스플레이 기술로부터 좀더 오랜 시간의 연구개발이 필요한 디스플레이 기술을 명확히 구분하여 단계별 개발 전략을 갖는 것이 매우 중요하며, <그림 2>와 같이 단계별 발전방향이 제시 되어 있다.^[6]

플렉서블 디스플레이의 향후 응용분야를 살펴보면 <그림 3 참조>, 앞서 기술한 가볍고 얇고 깨지지 않는다는 장점으로 인하여 휴대폰, PDA, MP3 Player와 같은 중소형 디스플레이

가 채용된 Mobile제품에 우선적으로 적용될 것으로 기대되며, 플렉서블 디스플레이의 대면적화 기술이 확보되면 기존 디스플레이가 적용된 노트북, 모니터, TV 등의 모든 분야에 대체 적용 가능하여, IT산업 전반에 걸쳐 크게 확산 될 수 있을 것이다. 이뿐 아니라, 기존의 유리기판 기반의 디스플레이로는 적용이 제한적이거나 불가능 했던 새로운 영역의 창출이 가능하다. 예를 들어, 신문이나 잡지, 교과서, 서적, 만화와 같은 출판물을 대체할 수 있는 e-Book 분야와 디스플레이를 접거나 말아서 가지고 다닐 수 있어 휴대성이 탁월한 초소형 PC, 실시간 정보 확인이 가능한 스마트 카드 등 새로운 휴대용 IT제품 분야가 새로운 시장으로 떠오를 것이다. 이외에도 유연한 플라스틱 기판을 사용하여 질기고 구부림이 자유로워 여러 디자인을 표현할 수 있어 입고 다닐

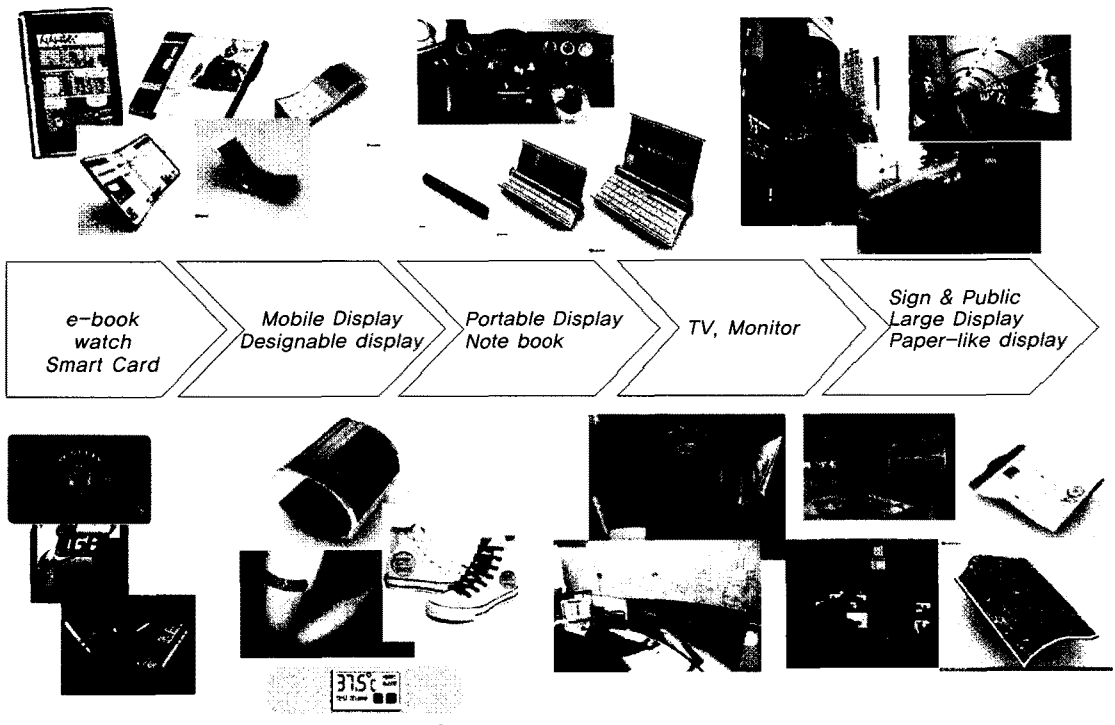


<그림 2> 플렉서블 디스플레이의 발전단계

수 있는 의류용 Fashion, 의료용 진단 분야에 까지도 확대되어 적용될 수 있다. 또한 Roll-to-Roll 공정을 기반으로 한 대면적, 저원가 기술이 실현되면 실내외 광고용 간판 및 각종 장식용 용도로 새로운 수요를 창출 할 수 있을 것이다. 휴대폰에 플렉서블 디스플레이가 채용되는 경우 우선적으로 Glass LCD를 채용한 휴대폰에서 LCD보호용 플라스틱 창을 제거 할 수 있고 휴대폰 자체를 혁신적으로 가볍고 얇게 설계 할 수 있으며, 필요한 경우 휴대폰의 외곽 전체를 고무와 같은 연성의 재료로 설계하여 외력에 의한 변형에 내성이 크고 잘 부셔지지 않는 기기를 개발 할 수 있다. 또한 디스플레이 기능을 극대화한 폰 전체가 디스플레이인 접이식 전화기도 구현 가능하다.

레이인 접이식 전화기도 구현 가능하다.

또한 일반 통신기기와는 다르게 저장된 정보를 읽고 때로는 쓰는 기능이 위주인 e-Book의 경우 일부 유리기판 기반의 디스플레이를 이용한 초기 제품이 출시되어 있지만 아직 시장이 활성화 되지 못한 신규 시장이다. 휴대성을 생명으로 하는 e-Book제품의 특성 상 내구성이 강한 플렉서블 디스플레이가 채용될 경우 시장이 빠르게 성장 할 것으로 기대된다. 플렉서블 기반의 e-Paper 기술이 적용된 e-Book의 경우 가볍고 얇은 특징 외에도 일반 책과 같이 접거나 말아서 휴대 할 수 있고, 소비전력이 매우 적어 종이 출판물을 대체 할 수 있다.



〈그림 3〉 Organic Device를 기반으로 한 플렉서블 디스플레이 어플리케이션별 발전 전망

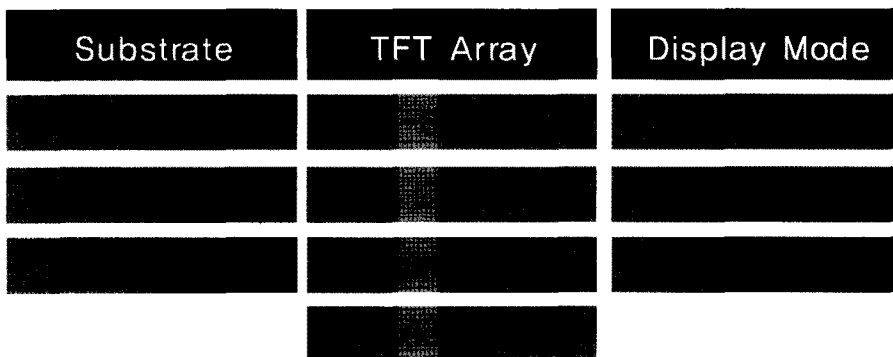
3. Thin Film Transistor Electronic 기반의 Flexible Display

플렉서블 디스플레이의 하드웨어로서 패널 관점에서 보면 크게 1) 기판기술, 2) 구동소자 기술, 3) 표시소자 기술로 구분 할 수 있으며, 플렉서블 디스플레이를 구현하기 위한 각각의 개별적 요소기술은 <그림 4> 와 같다.

플렉서블 디스플레이의 정의에서 알 수 있듯이 유연한 기판기술은 플렉서블 디스플레이의 원초적인 출발점이다. 즉, 현재의 유리기판 기반의 디스플레이에서 기판만 유연한 플라스틱 기판이나 Metal Foil로 교체하면 1차적 의미의 플렉서블 디스플레이가 실현된다. 예를 들어 TFT-LCD를 플라스틱 기판으로 만들면 플렉서블 TFT-LCD가 되는 것이다. 매우 단순한 이야기지만 바위 위에 저택을 짓는 것과 물위에 수상가옥을 짓는 것만큼이나 기술적으로는 전혀 다른 이야기가 된다. 특히, 반도체 기술 기반의 능동형 구동 (Active Matrix) 소자를 유연한 기판 위에 마이크론 단위의 범위에서 정밀하게 형성하려면, 습기와 산소에 대

해 차단 기능이 필요하고, 온도가 가해져도 수축되거나 이완되지 않는 탁월한 성능의 기판이 개발 되거나, 현재의 유연한 기판의 물성한계 범위 내에서 구동소자를 쉽게 형성하는 새로운 구동소자 기술이 확보 되어야 하나 2가지 모두 쉽게 얻어질 수 있는 기술이 아니다. 즉, 플렉서블 디스플레이를 위한 기판기술과 능동형 구동소자 기술은 서로 직접적으로 연관되어 있으며, 현재 플렉서블 디스플레이를 현실화 하는데 가장 큰 장애물이고 많은 연구기관과 회사에서 집중적으로 연구자원을 투입하는 영역이다.

유연한 기판의 경우 0.1mm 이하의 매우 얇은 유리판과 금속박판, 플라스틱 필름이 주로 검토되고 있으며, 얇고 깨지지 않는 특성 때문에 금속박판이나 플라스틱 필름이 주로 연구되고 있으나, 아직 플렉서블 디스플레이를 구현 하는데 필요한 성능을 충분히 만족하는 기판은 확보되지 않고 있다. 또한, 능동형 구동소자의 경우 TFT-LCD나 AMOLED용 Backplane에서 주로 사용하는 비정질 실리콘 박막트랜지스터 (a-Si TFT)와 저온 다결정 실리콘 박막



<그림 4> 플렉서블 디스플레이 패널 구현을 위한 기본기술

트렌지스터 (Low-Temperature Poly-Si) 기술이 1차적으로 개발되고 있으며, 최근 상대적으로 저온공정이 가능하고 용액공정이 용이한 유기 반도체를 이용한 유기 박막트렌지스터 (OTFT; Organic Thin-Film Transistor) 기술이 미래의 플렉서블 디스플레이용 구동소자 기술로서 활발히 연구되고 있다. 그러나 디스플레이의 표시 품질을 확보하는데 필요한 소자의 성능 및 신뢰성이 아직 부족한 상황이다.

4. 실리콘 반도체 TFT를 기반으로 한 플렉서블 디스플레이 발전 동향

비정질 실리콘 (a-Si) TFT기술을 기반으로 한 플렉서블 디스플레이의 경우, 일본의 Sharp 사가 이 분야에서 가장 먼저 연구를 시작하여 플라스틱 LCD의 개발결과를 꾸준히 발표하고 있고, 특히 a-Si TFT 공정의 마진을 키우기 위한 고내열의 플라스틱 기판을 일본의 기관 회사인 Sumitomo Bakelite와 공동으로 개발하여 좋은 성과를 발표하고 있다. 삼성전자는 PES와 같은 범용 기판을 사용하기 위하여 저온의 a-Si TFT 제조 공정을 개발하는데 성과를 보이고 있으며, 최근에는 TFT제조 공정을 130℃까지 낮추는데 성공 하였다. 이와 같은 성과를 바탕으로 7인치의 Full-Color LCD 디스플레이를 선보였으며, 전기영동 (Electrophoretic)기술을 이용한 A4용지 크기의 플라스틱 e-Paper를 선보이기도 하였다. LG, Philips LCD의 경우 내열특성이 큰 Metal Foil (Stainless Steel Foil) 위에 a-Si TFT 구동 소자를 형성 후 E-Ink사의 전기영동 기술을 적용한 14인치급 e-Paper를 발표 하였다.

한편, 상대적으로 저온 다결정 실리콘 (LTPS)

TFT 기술에 강점을 보이고 있는 Sony나 Seiko-Epson의 경우 LTPS 를 이용하여 유리기판 위에 LTPS TFT Array 구동 소자를 만든 후 기판을 플라스틱 기판으로 전사 (Transfer) 시키는 기술을 개발하고 있다. 삼성 SDI는 LTPS가 갖고 있는 공정 온도상의 한계로 내열특성이 큰 Metal Foil (Stainless Steel Foil) 위에 LTPS 구동 소자를 직접 제작 후 이를 이용하여 OLED 디스플레이를 구동한 4.1인치 플렉서블 디스플레이를 선보였다.

실리콘 TFT를 기반으로 하는 플렉서블 디스플레이의 경우, 기존의 a-Si TFT 기반의 LCD 기술에서 기판만 유리기판을 플라스틱 필름 또는 Metal Foil로 전환 하는 기술은 오랜 기간의 연구결과가 축적되어 있고, 주로 TFT-LCD, 특히 중소형 TFT-LCD 생산에 강점이 있는 한국 및 일본의 디스플레이 회사에서 시도되는 기술로 이미 성능과 양산성이 검증된 a-Si TFT기술을 다양한 표시소자 기술 (LCD, 전자종이 및 OLED)에 적용할 수 있다는 장점이 있어, 가장 사업화에 근접되어있다.

5. 유기반도체 TFT를 기반으로 한 플렉서블 디스플레이 발전 동향

좀 더 플렉서블 디스플레이가 지향하는 원형에 가까운 접근으로는, 향후 Roll to Roll 공정을 도입 하고자 할 때 기술적 장애가 적고 제조원가를 낮출 수 있도록, 고가의 반도체 공정을 최대한 배제한 프린팅 공정 기반의 유기 반도체 TFT(Organic TFT, OTFT)를 사용하는 방법이 있다. 이 경우 OTFT의 성능이 아직은 a-Si TFT의 성능에 미치지 못하여 LCD나 OLED 소자를 구동하기는 어려우나, 전자종

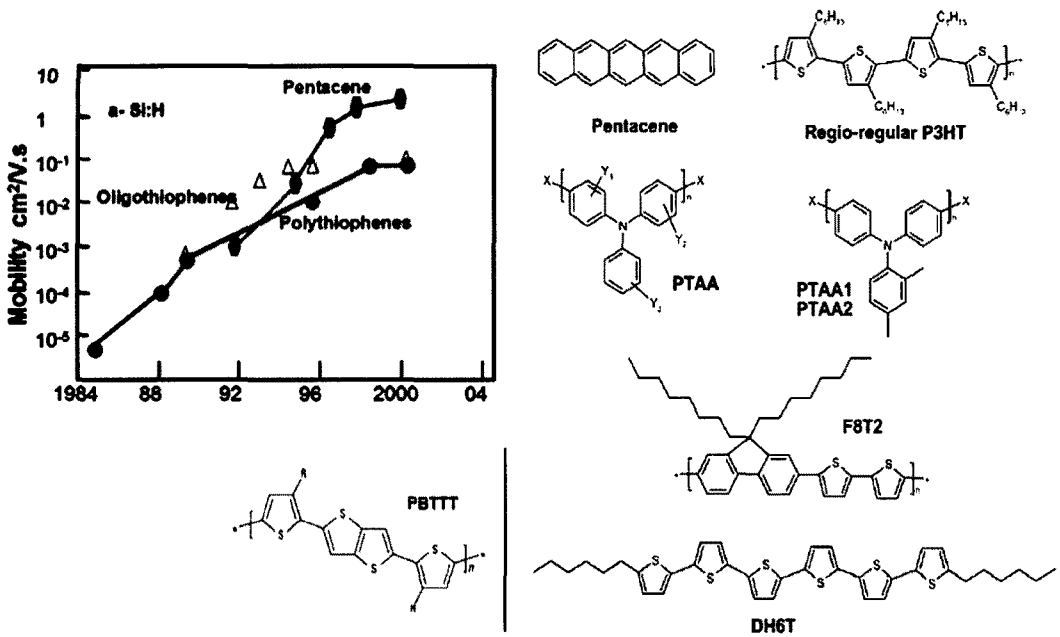
이는 구동이 가능하며, OTFT의 경우 공정온도를 100°C 이하로 낮출 수 있어 플라스틱 기판의 선택의 폭이 가장 크다는 장점이 있다. 하지만 전자종이가 가지고 있는 상품성의 제약을 그대로 가지고 있으며, 이 기술이 적용된 제품이 시장에 출시될 때 a-Si TFT 기술이 적용된 플렉서블 전자종이와 같은 시장을 놓고 경쟁할 것으로 예상된다. 최근 유럽계 회사인 Plastic Logic과 Polymer Vision이 가장 왕성한 연구활동을 선보이고 있다.

그러나, 5년 이상 장기적인 관점에서 보았을 때, 플렉서블 디스플레이의 가장 적합한 기술 개발 방향은 결국, 생산성과 가격 및 디스플레이의 성능에 달려있다. 그러므로 플렉서블 디스플레이의 중요 특성인 가볍고, 얇고, 유연함을 갖기 위해서는 범용 플라스틱 기판이 유리 할 것으로 판단되며, 구동소자는 상온·상압공정이 가능하고 프린팅 방법을 통해 대량 생산이 가능한 OTFT 소자가 가장 적합 할 것으로 예상된다. 디스플레이 모드인 경우 박형화에 유리하고 휘어져도 표시특성의 차이가 적은 OLED 모드가 동화상과 자연 색감이 요청되는 고급 제품용으로 사용 될 것으로 기대되며, 낮은 가격이 중요한 범용 제품에는 일부 동영상의 처리가 가능하고 색의 구현이 가능하도록 성능이 개선된 Color e-Paper가 채용 될 것으로 예상된다. 이 경우, 기판과 구동소자와 디스플레이 모드가 모두 유기물인 전유기 디스플레이 (All Organic Display)가 구현되나 각각의 기술이 아직은 해결해야 할 문제가 많아 지속적인 기술개발 노력이 있어야 한다.

6. Organic Thin Film Transistor

플렉서블 디스플레이의 가장 큰 기술적 장애가 되는 TFT Array는 기본적으로 박막형태의 반도체로서 화상 정보전달의 매개체이며, 일반적으로 실리콘을 기본 재료로 하여 만들어진다. 그러나 실리콘 반도체 재료는 가볍고, 구부리고, 접을 수 있는 플렉서블 디스플레이를 만들기에 만족스럽지 못한 재질이기 때문에 실리콘이 아닌 다른 부드러운 재질의 반도체를 새로 개발할 필요성이 제기된다. 부드러운 박막 형태의 반도체 재료로서는 유기물에서 반도체 재료를 찾을 수밖에 없어, 유기 저분자의 반도체 박막 재료 또는 고분자의 플라스틱 반도체 박막 재료를 찾기 위하여 1980년대부터 다양한 유기 재료를 대상으로 연구가 추진되어 왔다.^[7-9]

저분자 재료로서는 최근 Pentacene, TIPS Pentacene, F-TES-ADT가 부각되고 있으며 고분자 플라스틱 재료로서는 thophene계의 전도성 고분자인 P3HT(poly-3-hexylthiophene)과 F8T2(poly-dioctylfluorene-co-bithiophene)등이 부각되고 있다.^[9-10] 이러한 유기 박막 형태의 반도체를 이용한 TFT를 유기TFT(OTFT)라 한다. OTFT는 1964년 CuPc를 이용하여 처음 제작하였으나 성능이 나쁘고 연구에 큰 진전이 없다가 1983년 Polyacetylene으로 이동도 $7 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{Vsec}$ 를 보고함으로써 관심을 끌기 시작하였고, 1992년 Pentacene으로 이동도를 $2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vsec}$ 으로 개선하였으며, 그 후로 지속적인 개발이 진행되어 2003년 Pentacene으로 이동도를 3M에서 $5 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$ 으로, 삼성전자에서 $7 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$ 으로 획기적으로 개선하였다.

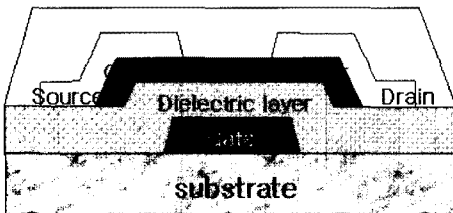


〈그림 5〉 대표적인 p형 유기반도체의 종류와 화학구조 및 소자특성(이동도)의 향상추이

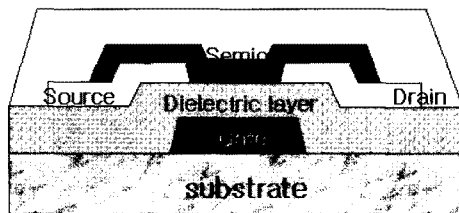
현재 OTFT는 단위소자의 수준을 넘어서 디스플레이를 구동하기 위한 Backplane용의 TFT Array 수준으로 개발되고 있다. 지금까지의 연구 성과로는 저급 디스플레이에 사용되는 기존의 비결정질 실리콘 반도체 (a-Si TFT)를 능가하는 성능의 유기TFT 시제품이 보고되었으나 아직 다결정실리콘 반도체 (Poly-Si TFT)의 성능에는 미치지 못하고 있다. 그러나, OTFT는 유기 재료로 반도체를 제조할 경

우 유연성이외에도 저온(60~150°C)에서 공정이 가능하며, Spin coating이나 Printing 또는 Evaporation이 가능하므로 저가격으로 대면적 기판에 적용이 가능하여 생산 코스의 대폭 절감을 기대할 수 있는 장점이 있다. OTFT의 기본구조는 아래 그림과 같이 실리콘 TFT와 유사한 구조의 FET(Field Effect Transistor)의 구조이다.

OTFT의 실용화를 위해서는 증폭률이 크고,



Bottom Gate/ Top Contact 구조



Bottom Gate/ Bottom Contact

〈그림 6〉 Schematic of 유기TFT

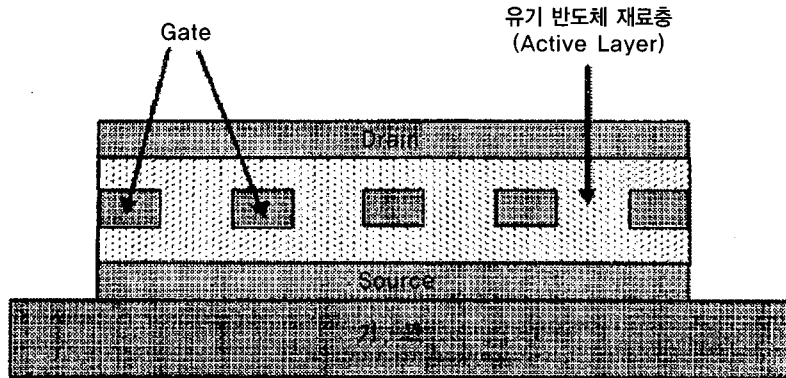
높은 On/Off 전류비, On 상태의 낮은 Channel 저항, 높은 동작주파수 등이 필요하며 이의 달성을 위한 핵심 조건 중의 하나는 높은 캐리어 이동도를 가진 반도체재료의 개발이다. 기존의 실리콘계 반도체의 이동도에 있어서는 다결정 실리콘 (poly-Si)은 $100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 정도이고, 비정질 실리콘(a-Si)은 $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 정도이다.

이에 비해 개발 중인 유기 반도체재료인 저분자계 Pentacene 다결정은 Bottom Contact 구조 기준으로 $0.1 \sim 1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, F8T2는 $0.02 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 수준에 달하고 있어 저분자계 유기 반도체가 이미 a-Si TFT 수준에 달했음을 알 수 있다. 현재 OTFT는 아직은 기초기반 연구단계에 머물고 있으나 그 발전 속도는 가속화 되고 있으며 특히 1997년 미국 펜실바니아 대학의 Pentacene의 진공증착법에 의한 제조방법이 제안된 이후 미국의 IBM사, Bell Laboratories, MIT 등과 일본의 산업기술총합연구소 및 Pioneer사, 한국의 삼성전자 및 전자통신연구원(ETRI) 등의 적극 참여로 비약적인 발전을 하여, 현재 삼성전자에서 발표한 펜타신 기반의 유기TFT의 경우 캐리어 이동도 $7 \sim 2.5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 및 On/Off 비율 약 108에 달해 일부 성능은 a-Si TFT의 성능을 초과 하였으며, 최근 생산공정에 있어서도 Ink-Jet, 스크린 프린팅 등의 저가의 생산공정의 가능성이 입증되고 있다.

위 기술한 바와 같이 Pentacene, TIPS-Pentacene, F-ADT-TES 등의 저분자계 재료의 연구 성과가 가시화되는 한편, Polythiophene계를 중심으로 한 고분자계 플라스틱 재료에서도 성과를 보이고 있다. 고분자계의 유기 반도체 재료는 저분자계에 비해 저가 생산공정 개발 기대가 모아지고 있다. 예를 들면 Ink-Jet 법이나, 스크린 인쇄법으로 roll형태로 감은 플라스

틱 필름 기판에 연속공정 방식으로 고분자 반도체 재료를 인쇄하기만 하면 OTFT를 대량 생산할 수 있는 장점을 가진다. Cambridge대학이나 Seiko-Epson사, Philips사 등은 전술한 P3HT나 F8T2 등의 Polythiophene계 고분자 플라스틱 재료를 사용하여 전술한 대량생산 방법으로 OTFT 시제품 생산에 성공했다. 캐리어 이동도는 $0.02 \sim 0.1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 로 정지화상이나 낮은 수준 동영상에 적용 가능하여 e-Paper기반의 e-Book 등에 사용하여 기존 인쇄물을 대체하는 시장에 도전하기 시작했다. 그러나 기존의 실리콘계 반도체는 작동주파수는 200MHz에 달하여 LTPS TFT의 경우 화상데이터를 생성하는 그래픽 구동 회로에까지 적용되고 있기 때문에 유기 반도체가 이 수준에 달하면 유연성의 장점을 무기로 실리콘계 반도체 시장의 완전 대체에 도전할 수 있게 될 것이다.

현재의 재료적인 한계를 바탕으로, 동작주파수를 높이기 위한 연구에 있어서도 캐리어 이동도가 높은 특성을 가진 새로운 재료의 개발이 주종을 이루고 있으나, 또 다른 방법으로 TFT의 구조를 변경하여 동작주파수를 높여려는 연구가 추진되고 있다. 이는 기존 TFT의 구조를 SIT(Static Induction Transistor) 구조로 변경하여 캐리어가 이동하는 거리를 최소화함으로써 재료 자체의 캐리어 이동도가 낮더라도 동작주파수는 10배 이상 높일 수 있는 효과를 달성하는 방법이다. 기존의 TFT 구조에는 기판의 표면위에 가로 방향으로 Source, Gate, Drain 전극을 펼쳐 놓는데 비해 SIT 구조는 위 그림과 같이 이들을 수직방향으로 배열해 놓은 구조를 가지며, 캐리어의 이동거리는 유기반도체 재료 층의 박막 두께에 해당하는 정도로 줄일 수 있다.



자료 : Pioneer R&D VOL. 15(2), P.64, 2005

(Source : Pioneer)

〈그림 7〉 Schematic of Static Induction Transistor(SIT) 구조의 유기TFT

기존의 TFT 구조의 OTFT 에서는 채널 길이가 수 μm 정도이나, 일본의 Chiba 대학에서 제작한 SIT 구조의 유기TFT에서는 $0.2\mu\text{m}$ 정도로 줄일 수 있었으며, 캐리어 이동도가 $2 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{Vs}$ 로 낮은 유기반도체를 사용해도 동작주파수 2.3kHz 를 달성할 수 있었고, 현재 1MHz 달성이 가능한 OTFT 개발을 추진하고 있다. 그러나 SIT 구조는 동작정지 상태에서도 Source와 Drain 간의 누설 전류가 발생하는 문제를 해결해야 하는 과제를 안고 있다. SIT 구조에서는 동작정지 상태에서의 캐리어의 흐름을 멈추기 위하여 게이트 전극에 역전압인 플러스 전압을 인가하여 공핍층을 확대함으로써 캐리어의 흐름을 끊는 방법을 택하고 있다. 그러나 공핍층의 확대가 불충분하면 누설전류가 급격히 증가하는 문제를 보인다.

고분자계 OTFT 에서는 고분자의 배열과 구조적 질서를 높이면 캐리어 이동도가 높아진다는 것이 밝혀졌다. P3HT(poly-3-hexylthiophene)의 캐리어이동도는 $0.045 \sim 0.1 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 수준인데 head-to-tail 위치규칙성(regioregularity)과 microcrystallinity 를 높이면

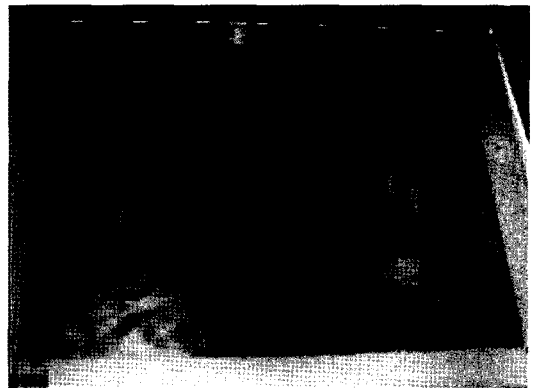
$0.2 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 정도로 향상됨을 보였다. 또한 P3HT의 thiophene 고리의 배향도 캐리어 이동도에 영향을 미치는 것으로 나타나 thiophene 고리가 기판에 수직 배향한 경우가 수평 배향한 경우보다 10배 이상의 캐리어 이동도를 보인다고 보고되었다. F8T2(poly-dioctylfluorene-co-bithiophene)도 자기조립 액정 상태에서 $0.02 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 정도의 높은 캐리어 이동도를 보인다. 이와 같은 고분자재료의 진전이 이루어진다면, 잉크젯 공정과 같은 저가의 인쇄법을 사용하여 TFT를 제작할 수가 있으며, 대규모의 투자가 불필요한 Roll-to-Roll 공정이 가능한 장점이 있다. 일반적으로 유기TFT는 TFT의 반도체를 유기재료로 대체한 소자를 의미하지만 궁극적으로는 게이트 절연막 및 도전체 모두가 유기재료가 사용될 것이다. 현재 유기반도체 재료로는 Pentacene, 6T, CuPC, ADT, F-CuPC, Perylene, PTCDA, TIPS-Pentacene, F-TES-ADT 등이 개발되어 사용되고 있으며, 유기물 절연체로는 Polyvinylphenol(PVP), BCB, Polyimide, Acryl, Parylene C, PMMA, CYPE, 유기물 전도체로

는 PEPOT, PEPOT:PSS 등이 사용되고 있다. 또한, 플렉시블 디스플레이의 투명전극용으로 탄소나노튜브 복합체를 이용한 전극이 활발히 개발되고 있다.

OTFT는 현재 AM 방식의 전자종이 및 LCD를 구현하기 위한 백플레인이 성공적으로 개발되고 있다. 또한 OTFT는 이러한 디스플레이 분야의 응용뿐만 아니라 향후 전자태그, 유기전자 회로, disposable 전자회로, 유기물 센서, 유기물 메모리 소자 등의 핵심소자로 사용될 것으로 예상된다. OTFT 관련 가장 왕성한 연구성과를 보여 주었던 Penn. State Univ.에서는 Pentacene을 이용한 OTFT를 이용하여 LCD를 위한 Active Matrix Backplane을 제작한 바 있다. Philips사에서는 2002년 고분자형 유기반도체를 이용한 OTFT로 PDLC 디스플레이 모듈 (64×94 pixels)를 구동하였으며, 2004년에는 E-Ink사의 전자종이와 결합하여 4.7인치 QVGA (320×240 pixels) 전자종이를 개발하였다. 영국의 Cambridge 대학에서도 고분자형 OTFT를 이용하여 전자종이를 구동을 시험하였고, 이 학교를 기반으로 설립된 벤처회사인 Plastic Logics사에서도 2005년 고분자형 유기TFT 백플레인을 제작하고, E-Ink사의 전자종이와 결합시켜 능동구동형 전자종이 디스플레이를 제작하였다. 175 μ m PET 플라스틱 기판을 사용, Polyfluorene 기반의 고분자형 반도체와 절연막을 이용하였으며, 전극으로 PEDOT/PSS 폴리머 재료를 이용하여 잉크젯 방식을 사용하여 제작하였다. 제작된 OTFT의 특성으로는 이동도가 0.01cm²/Vs, 문턱전압이 -5V, On/Off ratio가 10⁴으로 저분자인 Pentacene을 이용한 OTFT에 비해서는 성능이 떨어지나 진공공정 대신

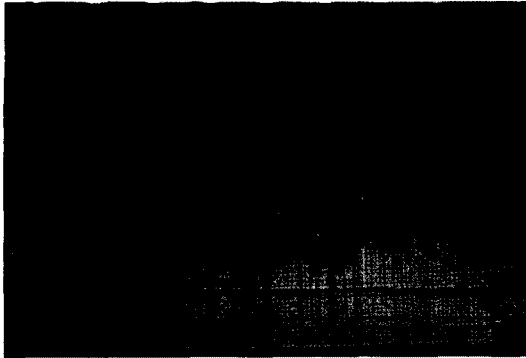
간단한 프린팅 공정을 사용하여 저원가 기술에 대한 가능성을 제시하였다. 이때 만들어진 플렉서블 전자종이는 5mm bending의 조건에서 소자가 잘 동작되어 플렉서블 디스플레이가 현실화 될 수 있음을 보여 주었고, 2007년 Venture Capital로부터 2천5백만 달러의 투자를 받아 E-Ink 기술을 접목한 전자종이 모듈을 양산한다고 발표 하였다.

한국의 삼성전자에서는 2005년에 유리기판 상위에 15인치 XGA급 유기TFT-LCD 모듈 개발하였으며, (이동도: ~1cm²/Vs, On/Off Ratio: 106), BLU는 기존의 기술을 사용하였다. 국내에서는 프린터에 과제인 차세대 디스플레이 개발사업에서 2003년부터 10년간 AOD 사업을 포함하는 디스플레이 전 분야에 대한 연구 개발사업 (약100억/년)이 진행 중이다. 여기에 포함된 OTFT 기술, OLED 기술, 플렉시블 디스플레이용 소재기술 등이 학계, 산업계, 연구계가 공동으로 관련기술을 개발하고 있다. 경희대에서는 2005년에 PES 기판상에서 a-SiTFT와 같은 수준의 OTFT를 제작하였는데, Organic CVD 방법에 의하여 펜타신 (pentacene)의 반도체층을 증착하였으며, 게이



(Source: Samsung Electronics)

〈그림 8〉 15인치 OTFT-LCD (Samsung)



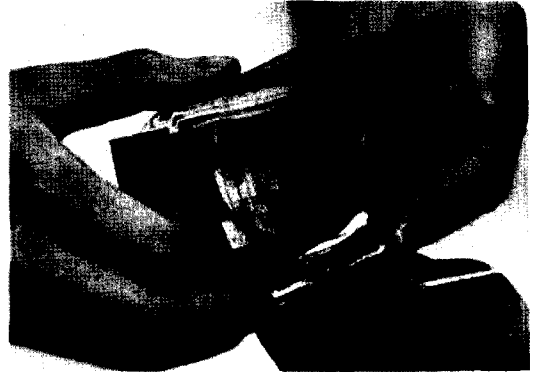
(Source: www.lpl.com)

〈그림 9〉 15인치 OTFT Display (XGA급)

트 절연막으로 cross-linked PVP를 사용하였다. 제작된 소자의 이동도는 $1.8\text{cm}^2/\text{Vs}$ 을 얻었으며, 어레이 수준에서 좋은 결과를 얻었다.

실리콘과 같은 무기물을 사용하지 않고 액체 형태의 유기 반도체재료를 사용해 프린팅 방식으로 생산단가를 대폭 낮추면서도 대화면 컬러 구현이 가능한 LCD 기술이 2007년 7월 LG Display의 LCD기술진에 의해 개발됐다. 고해상도(15인치 XGA급) 풀 컬러 디스플레이 동영상을 구현했다. 액체형 유기반도체를 이용한 LCD는 네덜란드와 영국에서 흑백 화면을 구현할 수 있는 기술만 개발된 상태로 컬러 기술 개발은 이번이 처음이다. 지식경제부 측은 “향후 해상도를 높인 SXGA급 기술을 개발하고 플라스틱 기판 위에 공정 적용을 추진, 상용화가 가능한 LCD 방식의 플렉서블 디스플레이를 개발할 계획”이라며 “이를 통해 차세대 디스플레이시장 형성을 앞당길 수 있을 것으로 예상된다”고 밝혔다.

2007년 5월에 소니는 플라스틱 필름상에 유기TFT와 유기 EL 소자를 집적화 하는 기술을 개발해, 세계 최초로 유기 TFT에 의해 풀 컬러 유기 EL 디스플레이를 구동시키는 것에 성공했



(Source: Sony Electronics)

〈그림 10〉 Photograph of the flexible AMOLED display driven by pentacene TFTs.

다. 종래의 유기 EL 디스플레이는 경질인 유리 기판상에 실리콘 반도체 재료를 사용한 TFT를 형성해, 그 위에 유기 EL의 발광소자를 적층시키는 수법이 취해지고 있었다. 특히, 게이트 소스와 드레인 전극은 유기 은(Ag) 혼합물, 게이트 유전막은 OTS(Octadecyltrichlorosilane)를 갖는 PVP(Poly-4-Vinylphenol), 유기 반도체는 펜타신(Pentacene)이다. 유기TFT캐리어 이동도는 $0.12\text{cm}^2/\text{Vs}$ 이며, 픽셀간의 편차가 거의 없다고 소니는 주장한다. 전극 패터닝은 리소그래피 기술로 처리되지만 스핀 코팅은 유기 은(Ag)막과 게이트 유전막 형성 용액에 사용된다. 소니는 나프타신(Naphthacene) 기반의 유기 반도체로 다양한 솔루션 애플리케이션을 확대하기 위해 연구 중이며, 인쇄 기술을 활용하는 패턴 메이킹 방법을 개발 중이다. 이번 발표된 것은 플라스틱 필름상에 형성하는 것으로 유연성이 풍부해, 접어 구부리는 일도 가능해지고 있다. 유기 TFT 구동 유기 EL 디스플레이로서는 세계 최초의 풀 컬러 표시를 실현하고 있으며, 해상도도 세계 최고인 160×120 화소 (80ppi/화소 사이즈 318um)를 실현하고 있다. 또, 접어

구부린 상태로 풀 컬러의 동영상 표시하는 일도 가능하다.

향후 차세대 Display 분야의 첨단 기술을 선점하기 위한 Organic Display Device와 그에 필요한 공정 기술 개발에 대한 수많은 연구들이 각 회사별로 지속적으로 진행될 것이다. OTFT 분야에서는 Soluble Process를 이용한 저원가, 고성능의 OTFT 소자의 개발 및 그에 필요한 공정의 개발에 대한 연구를 진행되고 있으며, OTFT 재료의 평가와 신규 재료 개발을 통해 Display 생산업체가 양산을 위해 필요로 하는 차세대 TFT 소자에 대한 종합적인 해결책이 마련될 것이다.

7. Organic Electronics 기반의 Flexible Display 기술 응용과 기대효과

평판디스플레이 산업이 CRT 디스플레이 산업을 대체해 나간 지 10년도 채 안되어서 평판디스플레이를 대체할 또 다른 차세대 디스플레이인 '플렉서블 디스플레이'가 거론되면서 또 다시 디스플레이 산업의 기술 혁신을 예고하고 있다. 플렉서블 디스플레이의 가장 큰 경쟁력은 디스플레이 제품의 유연화, 박형화, 경량화뿐 아니라 대면적화가 가능하다는 것이며, 이러한 특성을 만족하는 기술 및 제품을 개발하는 방향으로 연구가 진행되고 있다. 이미 한국, 일본, 미국 및 유럽 등의 주요 평판 디스플레이 업체 및 관련 업체들이 플렉서블 디스플레이와 관련하여 활발한 연구 활동을 벌이고 있으며 몇몇 업체들은 상용화 제품을 생산할 계획도 가지고 있어, 2008년 말에는 e-Book 시장을 중심으로 본격적인 시장이 형성될 것으로 예상되고 있다. 특히 Organic TFT

를 기반으로 한 플렉서블 디스플레이가 제대로 자리 잡기 위해서는 성능면에서는 기존 디스플레이와 최소한 동등해야 하며, 원가 경쟁력을 갖춰야 하며, 기반 기술이 완성되어야 하고, 생산 공정성 확보가 우선되어야만 한다. 이뿐 아니라 신규 어플리케이션이 창출되고 플렉서블 디스플레이가 기존 디스플레이를 대체해 나갈 수 있을 때, 플렉서블 디스플레이가 진정으로 차세대 디스플레이로 자리매김할 수 있을 것이다. Organic Electronic을 기반으로 하는 플렉서블 디스플레이는 경박 단소 특성과 저원가 및 대면적화 생산 가능과 같은 점에 초점을 맞춘다면 10년 뒤에 우리 생활에 플렉서블 디스플레이가 깊숙히 들어와 있을 듯하다.

참고문헌

- [1] H. Sirringhaus, P. J. Brown, R. H. Friend, M. M. Nielsen, K. Bechgaard, B. M. W. Langeveld-Voss, A. J. H. Spiering, R. A. J. Janssen, E. W. Meijer, P. Herwig, and D. M. De Leeuw, *Nature*, 401, 685 (1999).
- [2] H. E. Katz, *Chem. Mater.*, 16, 4748 (2004).
- [3] M. L. Chabinyc and A. Salleo, *Chem. Mater.*, 16, 4509 (2004).
- [4] V. Podzorov, S. E. Sysoev, E. Loginova, V. M. Pudalov, and M. E. Gershenson, *Appl. Phys. Lett.*, 83, 3504 (2003).
- [5] P. F. Baude, D. A. Ender, M. A. Haase, T. W. Kelley, D. V. Muyres, and S. D. Theiss, *Appl. Phys. Lett.*, 82, 3964 (2003).
- [6] 플렉서블 디스플레이 기술 및 시장동향 (2007~2017), 디스플레이뱅크

- [7] D. J. Gundlach, T. N. Jackson, D. G. Schlom, and S. F. Nelson, Appl. Phys. Lett., 74, 3302 (1999).
- [8] R. C. Haddon, X. Chi, M. E. Itkis, J. E. Anthony, D. L. Eaton, T. Siegrist, C. C. Mattheus, and T. T. M. Palstra, J. Phys. Chem. B, 106, 8288 (2002).
- [9] FJMZ Heringdorf, M. C. Reuter, and R. M. Tromp, Nature, 412, 517 (2001).
- [10] H. Sirringhaus, N. Tessler, and R. H. Friend, Science, 280, 1741 (1998).
- [11] Z. Bao, A. Dobabalapur, and A. J. Lovinger, Appl. Phys. Lett., 69, 4108 (1996).

저자소개



홍 문 표

1987년 2월 B.S 한양대학교 원자력공학과 공학사
 1989년 7월 M.S 한양대학교 중성자 물리학 이학석사
 1995년 5월 Ph.D University of Wisconsin-Madison, Engineering Physics
 1995년 12월~2006년 2월 삼성전자 LCD총괄 LCD 연구소 그룹장/수석연구원
 2000년 3월~2005년 8월 성균관대학교 전자공학과 겸임교수
 2006년 2월~현재 고려대학교 디스플레이반도체물리학과 부교수

주관심 분야 : Flexible Device (Display, Photovoltaic), Organic Electronics, Advanced Plasma Process & Equipment



김 동 우

2003년 2월 고려대학교 물리학과 이학사
 2005년 8월 고려대학교 대학원 응용물리학과 이학석사
 2005년 9월~현재 고려대학교 대학원 응용물리학과 박사과정중
 2005년 9월~현재 고려대학교 디스플레이반도체물리학과 시간강사

주관심 분야 : Plasma Device, 유기 반도체 소자.