



Flexible Display의 연구개발 동향

황진택 · 손준모 · 강인남 · 부용순

1. 서론

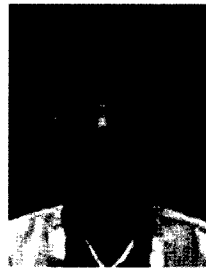
최근 전자공학계의 화두는 ‘無機여 잘 있거라’다. 전기를 통하지 않는다고 여겨왔던 플라스틱과 같은 ‘有機’물이 전자제품의 핵심재료로 사용되는 ‘무기’물인 반도체와 금속의 자리를 넘보고 있다. 유기물이 물고 올 차세대 전자공학의 미래는 flexible한 세상이라고 하는데... 본 고에서는 차세대 디스플레이

레이로 각광받을 것으로 예상되는 flexible display의 전망 및 연구개발 동향에 대하여 살펴보고자 한다. 특히 flexible display의 표시기술 중 실용화에 앞서 있는 OLED의 연구개발 동향 및 이를 구동하기 위한 유기반도체 소자의 연구개발 동향에 대하여 대부분의 지면을 할애하고자 한다.

2. Flexible Display의 전망



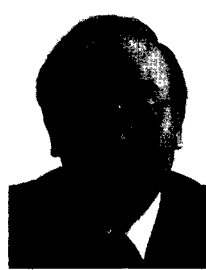
황진택
 1983 ~ 경희대학교 화학과 (학사)
 1987 ~ 한국과학기술원 화학과 (석사)
 1989 ~ 한국과학기술원 화학과 (박사)
 1991 ~ 삼성종합화학연구소 신소재팀 (선임연구원)
 1994 ~ 삼성종합기술원 Electronic Materials Lab. 전문연구원
 현재



강인남
 1988 ~ 부산대학교 화학과 (학사)
 1992 ~ 한국과학기술원 화학과 (석사)
 1994 ~ 한국과학기술원 화학과 (박사)
 1997 ~ 태광산업(주) 중앙연구소 고분자팀
 2000 ~ 삼성종합기술원 Electronic Materials Lab. 전문연구원
 현재



손준모
 1988 ~ 숭실대학교 화학공학과 (학사)
 1992 ~ 동경농공대학 공학부
 1996 ~ 물질생물공학과 (석사)
 1996 ~ 동경농공대학 공학부
 1999 ~ 물질생물공학과 (박사)
 1999 ~ 동경농공대학 VBL Post Doc.
 2000 ~ 삼성종합기술원 Electronic Materials Lab. 전문연구원
 현재



부용순
 1966 ~ 동경공업대학원 (박사)
 1969 ~ 벨기에 레쥬대학 Post-Doc.
 1971 ~ 영국 레딩대학 Post-Doc.
 1973 ~ 후지제록스 Fellow
 2002 ~ 성균관대학교 교수
 현재 삼성종합기술원 Electronic Materials Lab. Lab.장
 2002 ~

The R&D Trend of Flexible Display

삼성종합기술원 Electronic Materials Lab. (Jin Taek Hwang, Jhun Mo Son, In Nam Kang, and Lyonsun Pu, Electronic Materials Lab., SAIT, Mt. 14-1, Nongseo-Ri, Giheung-Eup, Yongin-Si, Gyeonggi-Do 449-712, Korea) e-mail: jthwang@sait.samsung.co.kr

하이비전 방송서비스와 컴퓨터 네트워크를 이용한 화상통신서비스 보급을 비롯해 영상 미디어를 둘러싼 기술혁신이 진전되고 있다. 영상정보 인프라 구축이 급속하게 진행되고 있는 가운데 액정을 이용한 flat panel display(FPD)는 소비전력이 낮고 정밀도도 뛰어나기 때문에 눈부신 발전을 이루고 있다. 그리고 현재 액정 디스플레이는 정지영상 표시를 주로 한 컴퓨터 용도에서 고화질 동영상 표시가 요구되는 TV수상기로의 응용전개가 도모되고 있어 패널 사이즈의 대형화와 표시 고속화를 위한 개발이 서둘러지고 있다.

휴대가 간단하고 언제라도 원하는 영상을 볼 수 있는 디스플레이의 등장인 현실감을 띠게 되었고, 그와 같은 대형·고정밀 FPD의 개발과 더불어 최근 새로운 개념의 표시기술이 주목받고 있다. 수납·휴대성 편리성을 위해 구부릴 수 있는 표시매체를 목표로 하는 시도이며, 그 우승후보는 유기 EL과 전자 페이퍼가 실용화에서 제일 앞서고 있다.

만일 플렉서블하고 동영상에 대응할 수 있는 디스플레이가 실현되면 디스플레이를 접어서 가지고 다닐 수 있기 때문에 언제 어디서나 가볍게 TV방송의 영상서비스를 누릴 수 있게 된다. 물론 그와 같은 디스플레이는 TV 용도로 응용이 제한되는 것은 아니며, 화면사이즈를 불문하고 폭넓은 디스플레이 분야에서 새로운 용도를 창출할 가능성이 있어 그 영향력은 매우 클 것이다. 예를 들면 시트 모양의 경량 디스플레이가 대면적화 된다면 벽에서 스크린처럼 꺼내거나 포스터처럼 벽에 걸어 박진감 넘치는 초대형 화면영상을 즐기는 것도 꿈이 아니다. 따라서 낮은 전력 소모 및 밝은 디스플레이 재료가 적용된 flexible display는 유비쿼터스 방송 서비스를 가능하게 해줄 것이다.

시장조사업체인 디스플레이서치는 최근의 보고서를 통해 flexible display 시장이 현재는 미미하지만, 2010년에는 2,500만개 이상의 제품이 판매되는 1,800만 달러 시장으로 성장할 것이라고 전망했다. 디스플레이서치는 아직 flexible display 구현에 다양한 장애들이 존재하고 있지만, 기술개발과 함께 초기엔 TFT LCD, OLED (유기 EL)와 일렉트로포레틱 (전기영동, Electrophoretic) 기술이 주류를 이루게 될 것이라고 전망했다.

3. Flexible Display 연구개발 동향

3.1 미국의 연구개발 동향

Flexible display 기술은 여러 가지 잠재적인 장점들을 갖고 있다. 즉, 두께와 무게를 크기에 맞추어서 줄이는 방법, 조야함 (ruggedness)과 비선형형틀 요소의 대폭적인 개선, 이전에는 불가능해 보였던 새로운 마켓의 창출 가능성 등이 그것이다. 고성능 (완전색상, 고해상도, 비디오 이미지) flexible display를 가능케 하는 여러 후보 기술 등 중에서 유기물 및 방출 다이오드 (OLEDs)가 개발활동 및 산업화 채용이라는 관점에서 가장 임계 시점에 이를 것으로 보인다. OLED 기술은 기존의 전통적인 LCD에 비해 큰 장점을 지닌 디스플레이의 생산을 가능케 하는 것으로서, 보다 넓은 시계, 밝고 생생한 이미지, 보다 빨라진 응답 속도 및 가벼운 무게 등이 그것이다. 아마 가장 중요한 것은 OLED가 플라스틱이나 금속 포일과 같은 유연한 기판 위에서 생산하기에 보다 적합하다는 것이며, 잠재적으로는 구부리거나 운송을 쉽게 하기 위해 감아 다닐 수도 있다.

LCD와 달리 OLED는 방사성 기술로서 백라이트나 보조광원이 주위를 둘러싸는 반사광이 필요치 않으므로 따라서 보다 얇고, 보다 치밀한 디스플레이가 가능해진다. 궁극적으로 OLED는 LCD를 다양한 제품에서 도전하게 될 것인데, PDA, 디지털 카메라, 데스크톱 모니터, TV 등과 같은 경쟁력 있는 가격이 달성될 것이다. 이미 새로운 휴대폰, 카오디오 시스템 및 다른 가전 제품 등에서 OLED가 포함된 설계가 많이 관심을 끌고 있다.

Flexible display 제품화 속도를 높이기 위해 미국 육군연구소, Natick Soldier Systems Center 및 미국 디스플레이 컨소시엄 등은 flexible display 기술을 주도하기 위해 flexible display initiative (FDI)를 발주해 방사 및 반사 디스플레이와 TFT 백플레인 기술 등을 연구하고 있다.¹

3.2 일본의 연구개발 동향

일본 교토대학교 일본 전신전화 주식회사 (NTT), 파이오니어 주식회사, 히따찌제작소, 미쯔비시화학 및 롬 주식회사의 5개 회사가 차세대 유기계 전자 디바이스 혁신기술의 연구개발에 의한 신산업 창출을 목적으로 한 포괄적 산학융합 얼라이언스의 설립에 합의, 구체적인 연구테마를 결정하고 정식 계약을 체결했다. 교토대학 국제융합창조센터 <이하 "교토 IIC(International Innovation Center)">를 중심으로, 산업-사회의 고도화에 기여하는 획기적

성과를 창출함을 목적으로 업종이 서로 다른 5개 회사가 참가하는 새로운 형태로 진행되고 있다. 한편 5개 회사는 재료, 프로세스, 디바이스, 시스템, 서비스에 있어서 각각 고도의 기술과 지적재산을 가지는 기업으로 각자의 특징을 살려 실용화, 제품화로 이어지는 연구성과를 창출해내는 것을 목표로 하고 있다. “유기계 전자 디바이스”라는 테마 하에 나노테크놀로지, 유기계 및 유기-무기복합 신재료, 차세대 디바이스, 신규 프로세스 등을 키워드로 하는 기술개발을 연구대상분야로 하여 고기능 flexible display의 기반기술 및 개발연구를 선정하여 산학연 연구를 진행중에 있다.²

3.3 국내의 연구개발 동향

Flexible display와 관련하여 현재 국내 업체 중에선 삼성전자가 경희대학교와 a-Si TFT를 기반으로 한 flexible display의 후면판 개발에 협력하고 있으며, 삼성SDI가 국내 중앙연구소와 독일 베를린에서 laser-induced thermal imaging (LIT)로 불리는 레이저 전사공정에 기반을 둔 OLED 후면판을 개발중에 있다. 또한 SDI와 전자부품연구원 및 연세대에서 flexible LCD 및 요소기술인 폴리머 액정소자를 연구개발중에 있다.

4. 유기 EL의 연구개발 동향

4.1 서론

동영상을 보기에 적합하고 얇고 가볍고 구부릴 수도 있는 욕구를 모두 실현하는 것은 유기 EL 디스플레이라고 생각된다. 왜냐하면 좋은 시인성, 넓은 시야각, 빠른 응답속도라는 디스플레이의 표시 성능이 뛰어나기 때문이며, 게다가 얇고 가볍게 만들 수도 있다. 기판을 고분자 수지를 사용하면 접어 구부리는 것도 가능하여 궁극의 차세대 디스플레이라고 할 수 있다. 실제로 소니나 도시바 등의 대형 전기 메이커를 비롯하여 많은 회사가 유기 EL 사업에 참여하고 있으며, 박막형 디스플레이의 왕자로 군림하는 액정을 대신할 기술로 기대되고 있다.

유기 EL의 가장 큰 특징은 전류를 흐르게 하여 스스로 발광하는 성질의 유기물을 소자에 사용한 점으로 즉 브라운관과 같이 소자 자체가 빛나는 것이다. 이에 비해 액정은 스스로 발광하지 않고, 빛을 통과시키거나 통과시키지 않는 셔터의 역할을 수행할 뿐이다. 액정에는 백라이트를 이용한 투과형

과 외광이 반사되어 빛나는 반사형이 있지만 모두 외부의 빛을 이용한다. 그러면 유기 EL의 표시 성능이 왜 뛰어난가? 이것은 액정의 표시원리와 비교하면 쉽게 이해할 수 있다 (그림 1). 우선 스스로 빛을 내는 유기 EL에 비해 액정은 별도의 광원을 이용한다. 빛이 나오는 방법은 태양과 달처럼 다르다. 상당히 강한 외광으로 빛나게 한다면 모르지만 직감적으로 유기 EL이 밝다고 상상할 수 있다. 콘트라스트 (밝기의 비)에 대해서도 마찬가지이며, 유기 EL은 각 소자가 빛나므로 발광부분과 발광하지 않는 부분의 밝기의 비는 명확하다. 한편 액정은 외광으로 전체를 비추므로 각 소자에서 미묘하게 빛이 새어 버린다. 그러므로 밝은 부분과 어두운 부분의 비가 작아진다.

예를 들면 아파트를 각 방마다 점등시켜 그림을 표시하는 것이 유기 EL이고, 배후에서 전체에 빛을 비추고, 창문의 개폐만으로 그림을 표시하는 것이 액정이다. 그렇게 생각하면 콘트라스트도 유기 EL이 원리적으로 뛰어나다는 것을 이해할 수 있다. 그리고 동영상을 매끄럽게 표시할 때 중요한 응답 속도도 액정보다 빠르다. 유기 EL이 발광하는 장치는 다음과 같다. 전극 사이에 전류를 흐르게 하면 마이너스극에서 전자, 플러스극에서는 정공 (전자가 빠진 상태)이 나온다. 전자와 정공이 결합하면 에너지가 발생하며, 그 에너지가 발광층을 자극하여 빛이 나온다. 전류를 흐르게 하면 바로 발광하는 유기 EL은 형광체에 전자선을 비추어 발광하는 브라운관과 비슷하다. 한편 액정은 전압을 가해 액정분자의 물리적인 나열순서를 바꾸어, 셔터를 개폐한다. 전류 (전자)와 분자가 움직이는 속도를 비교하면 전류 (전자)가 빠른 것은 분명하다.

얇은 두께나 가벼운 무게를 추구하는 데도 유기 EL이 더 유리하다. 액정은 2장의 기판 사이에 액체 액정분자를 흘러 넣어 만드는 데 비해, 유기

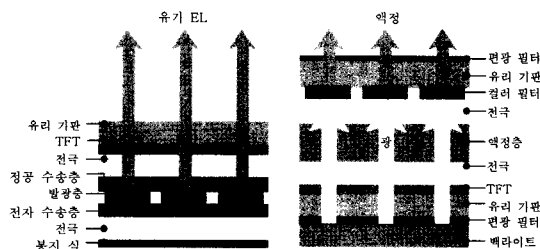


그림 1. 유기 EL과 액정 비교.

EL은 1장의 기판에 각 층을 겹쳐 코팅하여 만든다. 그 덕분에 백라이트형 액정과 비교하면 기판 1장과 백라이트 부분을 가볍고 얇게 할 수 있다. 그리고 구조가 단순해져 대량생산에도 적합하며, 부품수가 적고 제조공정이 단순해져 제조비용도 내려가기 때문이다.

지금까지 살펴 보았듯이 유기 EL은 원리적으로 뛰어난 기술이라는 것을 알 수 있었다. 그러나 궁극적인 풀컬러 flexible display와 같은 상품을 유기 EL로 실현하려면 힘든 산맥을 몇 개나 넘을 필요가 있다. 우선 유기 EL용 박막 트랜지스터(TFT) 기판의 개발은 필수다. TFT 기판은 각 소자마다 트랜지스터 회로를 박막 위에 만들 수 있으며, 목적하는 소자를 확실히 점등하거나 끄거나 할 수 있는 이점이 있다. TFT 기판을 이용한 디스플레이를 액티브형이라고 한다. 그에 대해 소자 전체에 도선을 세로와 가로로 격자 모양으로 깔아 한 라인으로 통합해 제어하는 방법이 패시브형이다. 액티브형은 유기 EL이건 패시브형보다 액티브형이 더 표시능력이 높다. 특히 대화면이고 고정세인 디스플레이일수록 그런 경향은 강해진다.

4.2 유기 EL Device의 연구개발 동향³

세이코엠펜은 2001년 6월에 액티브형 유기 EL 디스플레이의 시험제작품을 공개했다. 표시성능은 해상도 100 dpi (도트/인치), 크기는 2.8인치, 26만 색 풀컬러를 자랑한다. 화면은 작지만 밝고 선명한 영상을 분명하게 알 수 있다. 도시바, 東北파이오니어 등은 2003년에 TFT를 채용한 액티브형 컬러 유기 EL 디스플레이의 양산화를 예정하고 있다. 크기는 몇 인치 정도이며, 용도는 휴대전화나 휴대정보단말기(PDA)가 중심이다. 그리고 TV 등도 시야에 넣은 10인치를 넘는 디스플레이도 빠르면 소니가 2003년, 도시바가 2005년경에는 양산할 계획을 세웠다. 단 이런 계획은 유기 기판의 경우 얇고 가볍고 마음대로 구부러지는 디스플레이를 만들려면 기판을 글래스에서 플라스틱 필름 등의 부드러운 수지로 바꿀 필요가 있다. 파이오니어는 용도 개발의 일환으로 글래스 기판 대신 필름을 사용하는 유기 EL 디스플레이를 만드는 연구개발을 진행해 왔다.

파이오니어와 자회사인 東北파이오니어는 타사보다 먼저 유기 EL 사업에 매달려 왔다. 東北파이오니어는 1997년에 단색 패시브형 유기 EL 디스플레이 양산화에 세계에서 제일 먼저 성공하여 이

미 파이오니어의 카스테레오, 모토로라의 휴대전화 등에 탑재했다. 파이오니어종합연구소가 개발한 필름 상태의 유기 EL 시작품의 경우 해상도 160×120도트, 단색(청색), 3인치의 패시브형으로 두께는 약 0.2 mm, 무게도 구동 IC를 포함해도 3 g밖에 되지 않는다. 자유자재는 아니지만 어느 정도 구부릴 수도 있다. 손으로 만져 보면 얇은 책받침 같은 느낌이 든다. 초보자가 보면 기판을 글래스에서 수지로 바꾸는 것은 쉽다고 생각할지도 모른다. 발광층에 사용하는 유기 EL 재료는 수분이나 산소에 매우 약하다. 산소나 수분이 발광층 등에 부착되면 화학반응을 일으켜 분자구조가 미묘하게 바뀌고 발광하지 않게 되는 경우도 있다. 최근에는 유기 EL 재료 자체도 진보했으므로 10년 전에는 몇 분도 가지 않았던 수명이 지금은 5,000~1만 시간 정도가 되었다. 단 그래도 수분이나 산소가 침투해 버리면 유기 EL 재료의 열화는 피할 수 없다. 수분이나 산소의 침투를 막기 위해서는 유기 EL 재료의 상하좌우를 수분이나 산소를 통과시키기 어려운 물질로 완전하게 감쌀 필요가 있다. 東北파이오니어가 양산화하고 있는 제품에서도 글래스 기판은 수분이나 산소를 통과시키지 않으므로 아무 것도 필요없지만 그 이외의 부분은 금속 봉지 캔을 설치하여 수분이나 산소의 침투를 막았다. 즉 파이오니어의 시험제작품과 같이 얇게 구부러지도록 하려면 기판을 플라스틱 필름으로 바꾸고 금속 봉지 캔도 박막으로 만들 필요가 있다. 플라스틱도 수분이나 산소를 통과시키므로 기판도 막으로 뒤덮어야만 한다. 이 막의 개발이 어렵다. 그것은 수분이나 산소를 통과시키지 않는 정밀도가 매우 높기 요구되기 때문이다. 수분이 통과하기 어렵다는 것은 하루 1 m² 당 이동량으로 표현된다. 수분이 많은 장소와 수분이 전혀 없는 장소를 나누고 하루동안 놓아 두어 몇 그램의 물이 이동하는가로 측정한다. 이 단위를 사용하면 포테이토칩 등 스낵과자에 사용하는 필름은 10⁻¹의 정밀도, 액정은 10⁻²~10⁻³의 정밀도로 수분을 통과시키지 않으면 된다. 그에 대해 유기 EL은 10⁻⁵~10⁻⁶. 현격하게 차이나는 정밀도가 요구된다. 파이오니어에서는 이 방습막의 개발에 일반적으로 사용하는 이산화규소가 아니라 질화실리콘을 사용했다. 그 결과 산소나 수분을 더 통과시키지 않고, 막 자체의 구멍도 잘 뚫리지 않는 성질을 가진 막의 개발에 성공했다. 이 막으로 전체를 덮었으므로 필름 상태로 만들 수 있었다.

단 이것을 액티브형으로 만들게 되면 또 하나의 난관이 기다리고 있다. 필름 위에 TFT 기판을 만드는 것이다. TFT 기판을 제조할 때의 처리온도는 일반 글래스 기판이 800도, 최근 화제인 저온 폴리실리콘도 400도 정도는 필요하다. 플라스틱 필름의 내열성은 200도 정도이므로 TFT 기판을 한창 만드는 중에 녹아 버린다. 플라스틱 필름이 녹지 않는 온도에서 TFT 기판을 만드는 제조 프로세스를 개발해야 한다. 궁극의 접근으로 TFT 기판 자체를 유기물로 만드는 방법이 있다. 최근 1~2년, 필립스나 벨연구소 등이 플라스틱으로 트랜지스터를 만드는 데 성공했다는 획기적인 연구발표도 나왔다. 유기물로 트랜지스터를 만들 수 있다면 TFT 기판을 유기물로 만드는 것도 꿈은 아니다. 유기물로 TFT 기판이 실현되면 지금의 반도체 공장은 필요없다. 화학반응으로 물질을 무한하게 만들 수 있고, 인쇄나 잉크젯 기술 등을 사용하여 획기적으로 대량을 저렴하게 제조할 수 있게 된다. 처리온도가 저온이므로 에너지 소비도 적다. 모두 유기물 디스플레이를 만들 수 있으면 지금보다 훨씬 많은 제품에 「정보의 창」을 달 수 있게 된다.

4.3 유기 EL 재료 연구개발 동향⁴⁻¹²

유기 EL은 발광층을 형성하는 유기재료의 특성에 따라 저분자 방식과 고분자 방식으로 구분된다. 저분자 방식은 유기 발광 재료의 특성을 파악하기 쉽기 때문에 기술적으로 큰 어려움 없이 개발이 가능하다는 장점을 지니고 있으나, 진공 열증착 (thermal evaporation) 또는 기상 증착 (vapor phase deposition) 등 진공 장비를 이용한 건식공정을 거쳐야 하므로 대화면의 구현이 어렵고 생산성이 낮다는 단점을 지니고 있다. 이러한 방식은 미국의 Eastman Kodak사가 원천 특허를 지니고 있으며, 일본과 한국, 대만 등 아시아 지역을 중심으로 개발이 활발히 이루어지고 있다. 고분자 방식은 polymer light emitting diode (PLED) 또는 polymer electroluminescence display (PELD) 라고 불리며 저분자 유기물에 비하여 기계적인 강도와 열적 안정성이 높다. 고분자 유기 EL은 고분자 유기 재료를 적절한 용매에 녹인 후에 스핀코팅, 잉크젯프린팅 등의 방법으로 박막을 형성함으로써 초기의 투자비가 적고 생산성이 높으며 구동전압이 낮고 발광색상의 변화를 줄 수 있는 방법이 매우 다양하여 대화면 디스플레이와 flexible display의 구현에 용이하다. 그러나, 아직까지는 고분자의 순도를 높이기 쉽

지 않고 양산 가능한 패터닝 기술을 확보하기가 어려워 신뢰성 확보가 미흡한 상태이다. 이 방식은 영국의 CDT (Cambridge Display Technology)가 원천특허를 지니고 있으며, 주로 미국과 유럽 기업들을 중심으로 개발이 이루어지고 있다.

4.3.1 저분자 재료 연구개발 동향

먼저 저분자형 유기 EL에 대해 간단히 설명한다. 유기 EL 소자는 **그림 1**과 같은 단면의 구성이 일반적이다. 음극과 양극 사이에 정공주입층, 정공수송층, 발광층, 전자수송층 등의 유기층을 적층한 구성이다. 각각의 막 두께는 10~60 nm 정도의 초박막으로, 전체적으로도 0.2~0.3 μm 밖에 되지 않는다. 2~10 V 정도의 저전압을 인가하면 발광층이 고휘도로 발광한다. 원리적으로는 발광 다이오드와 같고 양극에서 주입된 정공이 정공주입층, 수송층을 지나 발광층 안으로 운반된다. 한편 전자는 음극에서 전자수송층에서 발광층으로 운반되어 전자와 정공은 발광층에서 결합하고 발광에 이른다. 발광층은 호스트 재료에 dopant가 첨가되어 형성되는 것이 보통으로, 호스트 재료는 전하 수송이나 재결합 기능을 보유하는 한편, dopant는 발광 기능을 보유하도록 기능을 분리하고 있다. 유기 EL에서는 그 재료에 따라 소자의 발광색, 수명, 효율 등의 성능이 결정될 것으로 생각되며 최근 십여년간 실용화를 지향한 개발이 이루어져 왔다. **표 1**에 현재의 저분자 발광재료의 성능을 소개한다.

폴컬러에 이용되는 청색, 적색 재료는 최근 몇년간 고성능화가 진전되었다. 실용화를 위한 수명이 달성하기 곤란하다고 생각되던 순청 영역에서도 초기 500 nit에서 반감수명 1만 시간이 실현되었다. 적색에서는 개발경쟁 결과 초기 500 nit에서 반감수명 1만 시간 이상의 재료가 등장했다. 적색에서 문제가 되었던 저효율은 형광방식으로 4 cd/A 이상이 실현되었고 실용화 성능 수준에 도달했다. 이렇게 소형 디스플레이용으로 적색 및 청색 재료는 수명, 효율 모두 충분한 성능에 도달했다고 생각된다. 지금까지 앞섰던 녹색 재료에서는 효율 면에서는 합격이지만 최근 적색, 청색과의 균형을 고려하면, 휘도를 더 향상시켜야 한다는 의견이 나오고 있다. 최근 형광방식에서는 보고 예가 적으므로 분명하지 않지만 적색, 청색과의 균형을 고려한 경우에는 적어도 초기 1,000 cd/m^2 에서 1만 시간 이상의 수명이 필요할 것이다.

고효율화 면에서 주목받고 있는 것이 인광방식이

표 1. 저분자 발광재료의 성능

| 발광색 | 연구기관 | 방식 | 효율 (cd/A) | 시감효율 (lm/W) | 초기휘도 (nit) | 수명 (hr) | 색도좌표 X | 색도좌표 Y |
|-----|--------------------|----|-------------|-------------|------------|---------|--------|--------|
| 순청 | 파이오니어 | 형광 | 3.9 | 2.2 | 100 | 1만 | 0.143 | 0.118 |
| | 이데미즈 | 형광 | 6.0 | - | 500 | 1만 | 0.15 | 0.16 |
| 청색 | 이데미즈 | 형광 | 12 | 6.0 | 1000 | 1만 | 0.174 | 0.334 |
| | UDC | 인광 | 9 | - | - | - | 0.14 | 0.23 |
| | 프린스턴대·UDC 千歳과기대 | 인광 | $\phi=57\%$ | 6.3 | - | - | 0.16 | 0.29 |
| 녹색 | 파이오니어 | 형광 | 16 | 10 | 300 | 1만 | 0.282 | 0.672 |
| | NEC | 형광 | ~20 | - | 300 | 1만 | 0.32 | 0.62 |
| | 규슈대/파이오니어 | 인광 | 59 | 38 | 500 | 수백 | 0.30 | 0.635 |
| | 파이오니어 | 인광 | 25 | - | 818 | 3300 | 0.303 | 0.629 |
| | UDC | 인광 | 33 | 17 | 600 | 1만 | 0.31 | 0.64 |
| 황색 | 이데미즈 | 형광 | 9.3 | 5.3 | 1000 | >15000 | 0.459 | 0.518 |
| 오렌지 | 이데미즈 | 형광 | 11 | 6.9 | 1000 | >16000 | 0.56 | 0.43 |
| | UDC | 인광 | 28 | 12 | - | - | 0.60 | 0.40 |
| 적색 | 파이오니어 | 형광 | 2.6 | 1.4 | 250 | 1만 | 0.620 | 0.377 |
| | 이데미즈 | 형광 | 4.2~5.9 | 3.7~4.2 | 1000 | 1만 | 0.63 | 0.37 |
| | 산오·코닥 | 형광 | 2.8 | 1.0 | 560 | 8천 | 0.65 | 0.35 |
| | 도레이 | 형광 | 4.5 | - | 200 | 12000 | 0.65 | 0.34 |
| | UDC | 인광 | 14 | 6.3 | 300 | 1만 | 0.65 | 0.34 |
| | 파이오니어 | 인광 | 3.2 | 1.0 | 135 | 3만 | 0.66 | 0.32 |
| | TDK | 형광 | - | 4 | 500 | >1만 | 0.32 | 0.35 |
| 백색 | 마쓰시타전공/ 아미가타대 | 형광 | 10 | 10.8 | - | - | 0.30 | 0.38 |
| | COVION | 형광 | ~7 | ~4.3 | - | - | 0.34 | 0.40 |
| | 이데미즈 | 형광 | 11 | 6.8 | 1000 | 1만 | 0.31 | 0.34 |

다. 여기에서는 자세하게는 다루지 않지만 원리상 형광방식의 3~4배의 효율을 달성할 수 있다. 녹색에서는 프린스턴대학, 유니버설디스플레이 (UDC) 사 등보다 소자 구성을 개량한 결과, IDW '02에서 효율 33 cd/A, 초기 600 nit에서 반감수명 1만 시간이 달성되었다고 보고되었다. 기 발표된 형광재료의 수명, 효율을 넘기 시작한 것이 인상적이다. 또 수명 면에서는 개량의 여지가 있다고 생각되는데 전자주입층측의 개량으로 50 cd/A 이상의 매우 높은 효율이 여러 연구기관에서 보고되었다. 적색에 관해서도 UDC사에서 색도 좌표 (0.65, 0.34)에서 효율 14 cd/A, 초기 300 nit에서 반감수명 1만 시간이 보고되었다. 형광법이 4~6 cd/A인 데 대해 2배 이상의 효율이 달성되었다. 이렇게 고효율인 면

에 주목해 녹색, 적색을 인광으로, 수명을 고려해 청색을 형광으로 구성된 디스플레이가 삼성 SDI사와 UDC사에서 공동으로 보고되었다. 대형을 지향하려면 형광방식에서는 적색, 녹색의 효율이 충분하지 않다는 의견이 있어 인광방식에서는 더 고휘도이고 장수명을 목표로 한 개발이 실시될 것으로 예상된다.

한편 형광방식에서는 가일층의 장수명화에 진전이 있었다. 지금까지 얻은 결과에서는 황색, 오렌지색, 백색에서 초기 1,000 nit 수명 1만 시간 이상을 달성할 수 있다. 적색에서도 현재의 인광방식에서는 얻기 힘든 수명을 실현했다. 상품화에는 재료의 장수명이 필수이므로 형광재료를 통해 한동안은 실용화가 진행될 것으로 생각된다.

백색에 관해서는 지금까지 에리어 컬러 디스플레이용으로 개발되어 왔다. 구동중의 색 변화가 없는 점에서 초기 1,000 nit 수명 1만 시간 이상의 재료가 보고되었다. 최근 산요전기에서 15 cd/A의 고효율인 백색과 컬러 필터를 조합한 풀컬러 디스플레이가 올해 업계 쇼에서 발표되었다. 또 이데미즈에서도 백색과 색 변환을 조합한 풀컬러 디스플레이가 공표되었다. 이들은 대형 기판에서의 제조나 고정세 디스플레이를 목표로 하며 적색, 녹색, 청색 3색을 구분 도포하는 방법으로는 실현하기 어려운 영역을 목표로 하고 있다. 이러한 배경에서 백색 재료의 개발은 앞으로 가속될 것으로 예상된다.

4.3.2 고분자 재료 연구개발 동향

고분자 재료는 측쇄를 선택하여 발광 파장을 선택할 수 있다. 또 측쇄에 전기전도성이 다른 기(基)를 부여할 수도 있고 단층이고 발광효율이 높은 도전성 고분자의 개발도 기대할 수 있다. 용매를 통한 가용성을 부여하기 위해서도 측쇄를 부여하는 경우가 있다. 유기 EL에 이용되는 고분자계 발광재료의 예를 그림 2에 소개한다.

고분자계 발광재료의 대표적인 것은 그림 2와 같이 폴리파라페닐렌 비닐렌 유도체 (PPV), 폴리알킬티오펜유도체 (PAT), 폴리파라페닐렌유도체 (PPP)계, 폴리플루오렌유도체 (PDAF)계, 카바졸유도체 (PVK)로 분류된다.

PPV는 오렌지색 발광을, PAT는 적색, PPP는 청색 발광을 나타내고 PDAF는 청색 발광을 나타낸다. PVK는 청색 발광을 나타내는데 종종 정공 수송 재료로 저분자계 색소를 도핑해 발광층을 형성할 때의 호스트 재료로 이용된다. 폴리파라페닐렌비닐렌

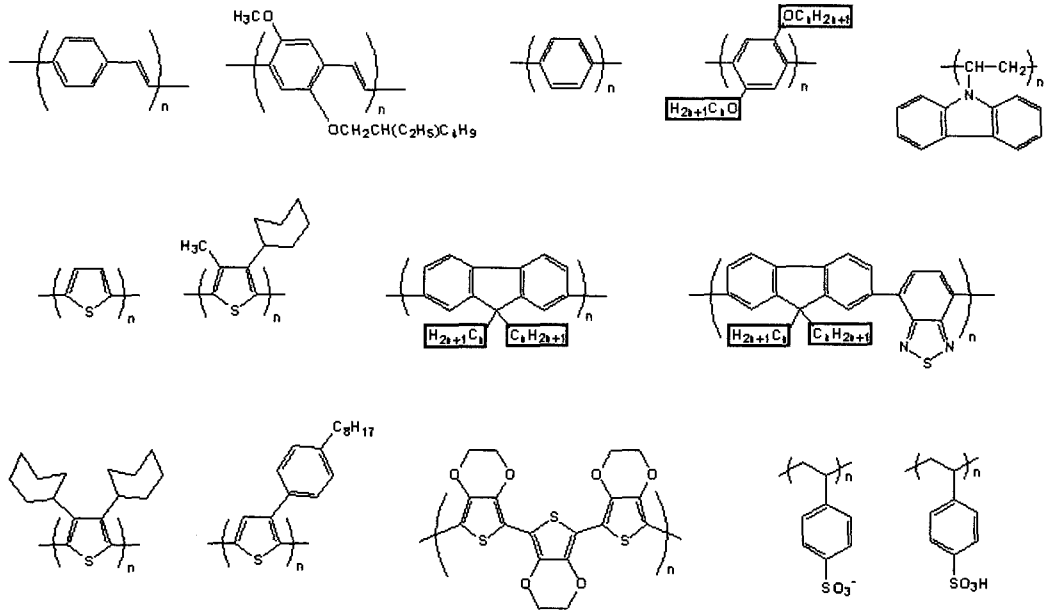


그림 2. 고분자 발광 재료.

(PPV)을 통해 폴리머를 이용해 가장 먼저 저전압으로 황색 EL이 보고되었는데 그 재료는 전구체를 기관 위에 제막하고 후열처리를 실시 고분자화할 필요가 있었다. 그 후 용매에 가용인 도전성 고분자로 하기 위해 측쇄를 도입한 폴리파라페닐렌유도체 (MEH-PPV)가 개발되었다. 폴리알킬티오펜 (PAT), poly(3-cyclophenyl-4-methylthiophene); PCHMT, poly(3,4-dicyclohexylthiophene); PDCHT, poly(3-(4-octylphenyl)thiophene); POPT, 폴리디알킬플루오렌 (poly(9,9-dialkylfluorene); PDAF), 폴리알킬플루오렌바이티오펜의 코폴리머(PFBT) 등의 폴리머 재료도 열처리를 통한 고분자화 등을 거치지 않고 스펀코트법으로 간단히 박막화할 수 있어 소자 제작도 쉬워졌다.

특히 가장 먼저 청색 EL로 보고된 PDAF는 그 후 플루오렌유도체의 높은 발광효율이 다시 주목받게 되었다. 그림 3에 시판되고 있는 플루오렌유도체의 예를 발광색과 함께 제시한다.

그림 3과 같이 고분자계 발광재료의 특징은 고분자 골격은 같아도 측쇄의 차이나 공중합체를 형성하여 발광 파장을 제어할 수 있다는 데 있다. 플루오렌 골격을 가진 고분자로 청색에서 적색까지의 발광파장을 커버할 수 있다. 고분자 재료를 이용해 그림 4와 같은 적층 구조를 통해 발광효율이 높아진다. 적층 구조를 제작하는 방법으로는 다른 용매를 이

용해 토대 고분자가 녹지 않도록 하여 적층할 필요가 있다. 정공 수송층을 그림 2에 고분자 정공 수송 재료로 제시하는 수용성 술폰산 poly(ethylenedioxythiophene)/poly(sulfonic acid); PEDOT/PSS를 이용해 열 처리한 후 그 위에 다른 유기 용매 등에 녹는 고분자 발광층을 적층하여 발광의 고효율화가 이루어지고 있다. 이들 고분자 안에 저분자계 색소, 삼중항에서의 인광 발광을 하는 인광 재료를 도핑하고 고휘도화, 고효율화를 지향하는 시도도 이루어지고 있다. 고분자 발광재료도 저분자계 발광재료와 마찬가지로 공기중의 산소나 수분에 따라 열화하므로, 질소가스 등의 불활성 가스를 봉입한 후 수지로 봉지하고 소자를 열화시키는 가스의 침입을 저지하여 고분자계 재료로 10,000시간 정도의 소자 수명이 실현되었다.

5. 유기 트랜지스터 디스플레이의 연구개발 동향^{13,14}

5.1 서론

종이처럼 가볍고 구부릴 수 있는 디스플레이가 실현될 날이 다가오고 있다. 그 열쇠를 쥐고 있는 「가볍고 부드러운 트랜지스터」의 개발이 최근 급진전되고 있기 때문이다. 그 트랜지스터는 Si가 아니라 유기물로 만들어지며, 우선은 thin film transistor

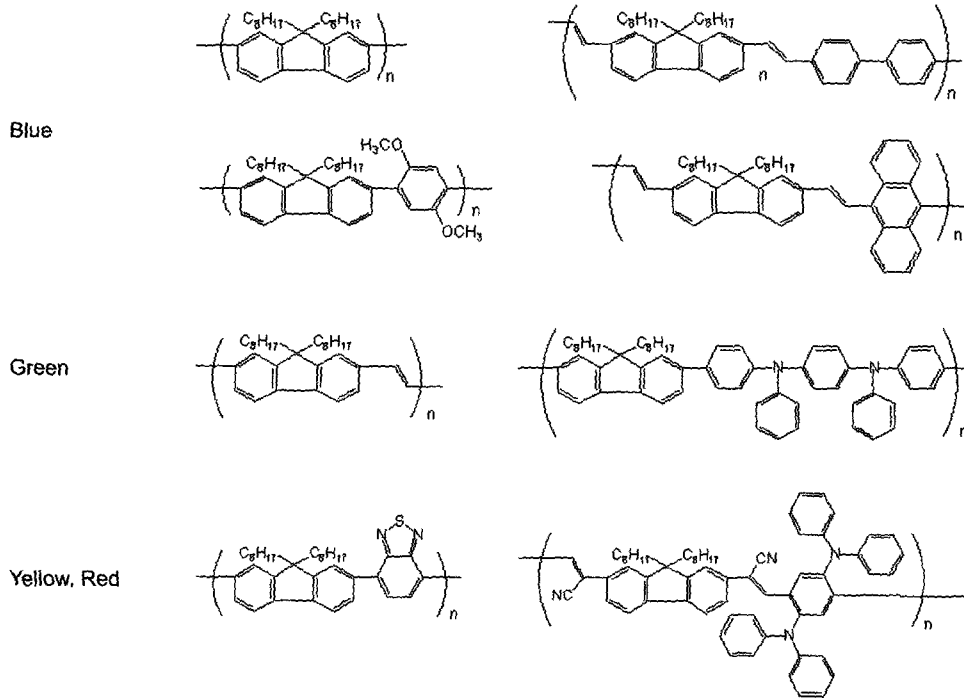


그림 3. 플루오렌계 발광재료.

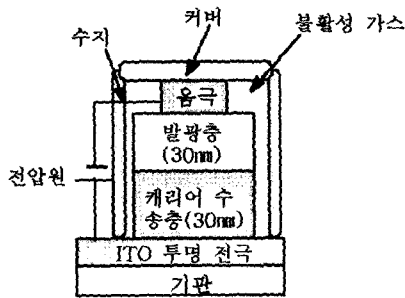


그림 4. 고분자 발광소자의 소자 구조의 예.

(TFT), 그리고 주변회로도 대체해 나갈 예정이다. 이미 동작주파수는 TFT에 이용할 수 있는 수준에 달했다. 「유기 EL 패널은 사실은 지금 상태는 반제품이다. 진짜 위력을 발휘하는 것은 「유기 트랜지스터」에 의한 TFT와 조합했을 때다. 그 때 LCD의 대체를 능가하는 새로운 애플리케이션이 탄생한다」 (한 대형 반도체 메이커의 기술담당자).

휴대전화나 휴대형 정보기기 (PDA)의 표시장치로 유기 EL 패널이 많은 기대를 받고 있다. 그러나 그 진짜 힘은 이제부터 드러날 것이라고 생각하는 전문가가 많다. 그 힘이란 가볍고 구부러거나 등글게 말 수 있는 디스플레이를 실현할 수 있는



그림 5. 미래 유기 트랜지스터의 보급으로 지하철 내 풍경의 변화.

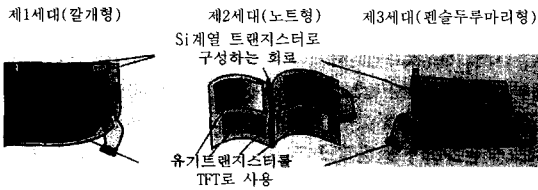
것이다 (그림 5). 액정 패널은 등글게 하면 콘트라스트비가 저하되어 표시할 수 없게 된다는 문제를 일으킨다. 액정을 봉지한 부분이 변형되어 빛의 투과를 올바르게 제어할 수 없게 되기 때문이다. 그러나 유기 EL 패널이라면 이러한 문제는 적다. 구부릴 수 있는 디스플레이를 위해 장래가 촉망받는

것도 그 때문이지만, 현재로서는 기술적으로 해결해야 할 것이 매우 많다.

5.2 유기 트랜지스터의 연구개발 동향 및 응용

유기 트랜지스터는 일반적으로 플라스틱 기관 위에 유기물을 증착 또는 도포하여 제작한다. 유기물은 주로 분자간 힘 (van der Waals force)으로 결합하므로 Si 결정과 같은 원자결합 물질보다 유연성이 풍부하므로, 예상되는 용도는 앞에서 말한 대로 우선 디스플레이이다 (그림 6). 동작주파수가 몇 헤르츠인 유기 트랜지스터라면 정지영상을 표시하는 전자페이퍼의 TFT에 사용할 수 있다. 동작주파수를 1 kHz로 높이면 동영상 표시 대응 TFT를 만들 수 있다. 이렇게 되면 동영상을 표시하는 전철 천장에 매달린 광고도 실현될 것이다. 단 TFT를 유기 트랜지스터로 대체하는 것만으로는 기존의 디스플레이와 휴대성에서 큰 차이가 없다. 주변회로까지 유기화해야 비로소 획기적인 디스플레이라고 할 수 있다. TFT뿐만 아니라 드라이버 회로 등의 주변회로까지 유기 트랜지스터로 제조하려면 동작주파수를 1 MHz 정도까지 더 높일 필요가 있다. 그래서 두루마리처럼 둥글게 말 수 있는 디스플레이가 실현된다. 드라이버 회로는 디스플레이 표시부 하부와 한쪽 측면에 배치되어 있으므로 단단한 Si계 트랜지스터로 드라이버 회로를 만드는 동안은 디스플레이를 신문지처럼 둥글게 말 수는 없다. 즉 둥글게 말아 가지고 다닐 수 있는 대화면 TV 수장기를 실현하려면 유기 트랜지스터로 1 MHz의 동작주파수를 달성하는 것이 하나의 관문이 된다.

트랜지스터의 「유기화」는 우선 TFT부터 시작된



| 화상표시방식 | 단순 매트릭스 방식 (일부 액티브 매트릭스 방식) | 액티브 매트릭스 방식 | 액티브 매트릭스 방식 |
|-------------------------------|--------------------------------|---------------------|-------------|
| 작동주파수 (Hz) | 1~수K | 1M | 200M |
| 캐리어 이동도 (cm ² /Vs) | <10 ⁻³ | 10 ⁻³ ~1 | 1~100 |
| 적용회로 | TFT | 화소구동회로 | 그래픽묘화회로 |

그림 6. 작동주파수 향상과 더불어 변화하는 디스플레이.

다. 작동주파수가 1 MHz에 달하면 화소에 전압을 공급하는 구동회로까지, 200 MHz가 되면 화상데이터를 생성하는 그래픽묘화회로로 적용범위가 확대된다. 여기에까지 이르면, 디스플레이 안에서 Si계 트랜지스터를 없앨 수 있다. 트랜지스터의 동작주파수는 반도체 재료의 캐리어 이동도가 높아질수록 향상된다. 그래서 유기 트랜지스터 연구자 등은 캐리어 이동도가 높은 유기 반도체 재료 탐구에 여념이 없다. 유기 반도체는 Si에 비해 캐리어의 이동도가 일반적으로 낮다. 그러나 신재료의 개발이나 유기 반도체 재료의 제조기술 개선으로 캐리어 이동도는 속도가 떨어지지 않고 증가하고 있다 (그림 7). 지금은 시판하는 디스플레이를 탑재하는 Si TFT와 동등한 캐리어 이동도를 갖춘 유기 반도체가 나타나고 있다. 캐리어 이동도의 향상에 따라 동작주파수도 해마다 높아지고 있다. 2001년 9월에는 일본의 치바 대학이 30~40 kHz로 동작하는 유기 트랜지스터를 발표했으며, 2005년 전후에는 1 MHz 동작이 실현될 것이라고 예상된다.

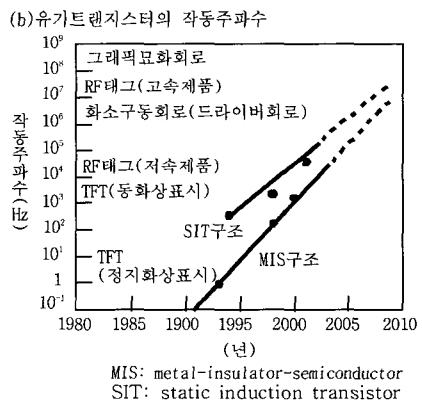
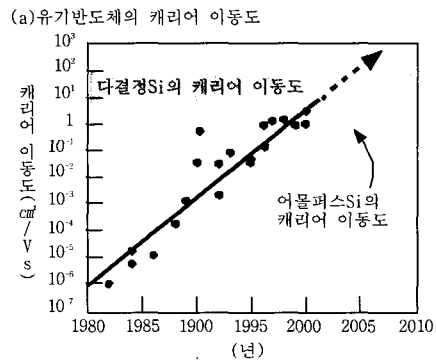


그림 7. 해마다 향상하는 캐리어 이동도.

유기 트랜지스터에 의한 TFT를 사용한 디스플레이의 시험제작 사례도 늘어나고 있다. 미 Lucent Technologies, Inc.는 미 E-ink Co.과 공동으로 정지영상을 표시하는 전기영동현상을 사용한 디스플레이를 2000년 11월에 시험제작했다 (그림 8(a)). 네덜란드 Royal Philips Electronics사는 유기 트랜지스터에 의한 TFT를 사용한 액정 디스플레이의 시험제작 사례를 2000년 9월에 발표했다 (그림 8(b)). 현재로서는 동영상 표시에 대응하는 디스플레이를 시험제작한 메이커는 없다. 그러나 앞에서 말한 대로 유기 트랜지스터의 성능은 이미 동영상을 표시할 수 있는 수준에 달했으므로 시험제작품의 등장은 시간 문제라고 생각하는 기술자는 많다.

동작주파수를 높이기 위해 각 연구기관이 취하는 접근은 주로 두 가지로 갈라진다. 캐리어 이동도가 높은 유기 반도체 재료의 개발부터 착수하는 접근과 트랜지스터 구조의 연구부터 매달리는 접근이다. 이것들은 상반되는 것은 아니다. 기본적으로는 성과의 조합으로 동작주파수의 향상을 더욱 지향할 수 있다. 이 중 대다수의 연구기관이 채용한 것은 재료 개발부터 진행하는 방법이다 (<측량할 수 없는 유기재료의 가능성, 초전도현상도 일으킨다> 참조). 유기 반도체 재료는 크게 나누어 저분자계와 고분자계의 두 계통으로 나눌 수 있는데 (표 2), 특히 연구가 활발한 것은 캐리어 이동도가 특별히 높

아 주목받고 있는 저분자계 펜타센이다. 「결정화하여 캐리어 이동도를 $3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 정도까지 높일 수 있다」(미 IBM Corp.)고 한다. 현재 연구가 진행되는 다른 유기 반도체 재료에 비해 뛰어난 값이다.

단 이것은 어디까지나 단결정에서의 값이며, 캐리어 이동도는 펜타센의 결정상태에 깊이 의존하며 단결정으로는 높지만 다결정 상태, 그리고 아몰퍼스 상태가 됨에 따라 캐리어 이동도는 극단적으로 낮아져 버린다. 즉 펜타센을 사용해 높은 캐리어 이동도를 실현하고자 하는 연구개발에서는 어떻게 단결정에 가까운 성질의 박막을 간단히 형성할 것인가가 초점이다.

실온에서 펜타센을 증착한 것만으로는 일반적으로 아몰퍼스 상태가 된다. 배열이 다양하므로 펜타센 막 안을 흐르는 캐리어가 격렬하게 산란되어 이동도는 낮다. $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 전후로 가열하여 결정화 처리하면 다결정 상태가 되고, 캐리어 이동도는 두 자리 이상 개선된다. 단 단결정에는 많이 미치지 못한다. 결정입자 안에서는 단결정 수준의 캐리어 이동도지만 결정 입자계에서는 캐리어가 산란되기 때문이다. 그리고 높은 캐리어 이동도를 실현하려면 단위면적당 결정입자 수를 줄여 결정입자계를 줄일 필요가 있다. IBM사나 일본의 산업기술종합연구소는 펜타센의 결정입자의 크기가 증착할 때 토대 재료에 강하게 의존하는 데 주목했다. 트랜지스터 구조가 일반적인 아몰퍼스 Si를 사용한 TFT와 거의 같은 metal-insulator-semiconductor (MIS) 구조의 경우, 펜타센의 토대는 게이트 절연막이다 (그림 9). 즉 게이트 절연막의 재질이나 표면 처리를 더 연구하여 결정입자 지름을 크게 했다.

IBM사는 게이트 절연막의 표면을 화학적으로 처리하여 단결정에 가까운 펜타센을 얻었다. 게이트 절연막 표면에 있는 불순물을 핵심으로 펜타센의 결정입자가 성장하는 것을 밝혀 낸 것이 화학처리의 발상으로 이어졌다고 한다. 구체적으로는 시클로헥산이라는 유기재료를 분자 한 층분만큼 게이트 절연막 표면에 도포했다. 그 결과 결정입자의 폭을 $0.5 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 로 넓힐 수 있었다고 한다. 이 값은 「표면처리를 하지 않는 경우의 20~100배에 해당한다」(IBM사). 이 결정입자의 크기는 현행 액정 패널에 사용하는 TFT의 채널 길이에 가깝다. 즉 채널 영역에 존재하는 결정입자를 많게 해도 몇 개에 머무른다. 캐리어를 산란하는 결정입자의 계면이 적어져, 캐리어 이동도가 높아진다. 실제로 IBM사가 개

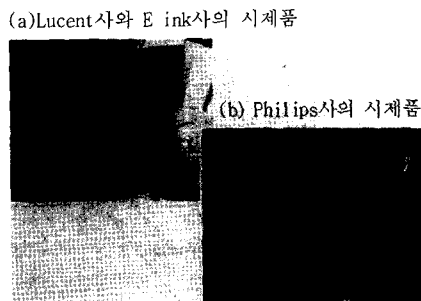


그림 8. 유기 트랜지스터의 시제품.

표 2. 각종 유기 반도체 재료의 결정상태와 캐리어 이동도

| 재료명 | 저분자계 | | 고분자계 | | 무기계(참고) |
|-------------------------------------|---|---------------------------|-----------------|------|--|
| | 펜타센 | CuPc | P3HT | F8T2 | Si |
| 캐리어 이동도 (cm^2/Vs) | $0.1 \sim 1$ (단결정) 9.4×10^{-5} (아몰퍼스) | 2×10^{-5} (아몰퍼스) | $0.05 \sim 0.1$ | 0.02 | ~ 1000 (단결정) 100(다결정) 1(아몰퍼스) |

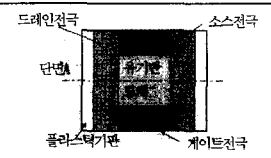
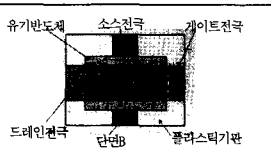
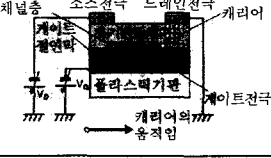
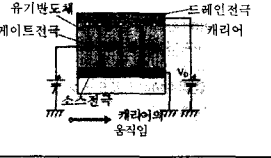
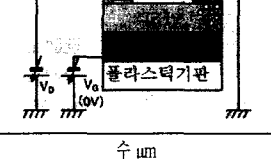
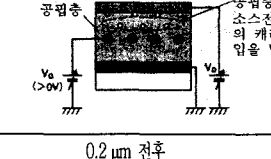
| | MIS구조 | SIT구조 |
|--|---|---|
| 트랜지스터의 외관 (표면 쪽) |  |  |
| 작동시켰을 때 캐리어의 움직임 (MIS 구조는 단면A, SIT구조는 단면B) |  |  |
| 정지했을 때 캐리어의 움직임 (MIS 구조는 단면A, SIT 구조는 단면B) |  |  |
| 시험제작을 마친 트랜지스터의 채널 길이 | 수 μm (패터닝크기로 결정된다) | 0.2 μm 전후 (유기반도체의 두께로 결정된다) |
| 드레인 전류 | 작다 | 크다 |
| 누전 | 작다 | 크다 |

그림 9. 누전의 억제를 중시하는 MIS구조와 작동속도를 중시하는 SIT 구조.

발한 방법에 따른 펜타센의 캐리어 이동도는 단결정 상태에 가까운 약 $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 에 달했다.

유기트랜지스터의 구조는 주로 MIS 구조와 static induction transistor (SIT) 구조의 두 종류로 나뉜다. MIS 구조는 정지 시의 소비전력을 억제하는데 우수하다. 작동정지 시에 캐리어가 흐르는 영역인 채널층이 거의 완전하게 사라져, 드레인 전극에서 소스 전극으로 흐르는 캐리어 수가 급감하기 때문이다. 한편 SIT 구조는 작동주파수를 높이기 쉽다는 것과 드레인 전류량이 크다는 점에서 MIS 구조보다 뛰어나다. 그러나, 소비전력이 MIS 구조보다 커져 버린다. 작동을 정지하는 경우, 게이트 전극 주변에 공핍층을 형성하여 드레인 전극에서 소스 전극에 달하는 캐리어의 흐름을 끊는 고안을 하고 있지만, 공핍층을 통한 캐리어유입 억제효과가 MIS구조보다 약해 소스에 도달하는 캐리어가 많다.

한편 일본의 산업기술종합연구소는 게이트 절연막의 재질을 펜타센이 부착되기 쉬운 폴리메틸메타크릴레이트(PMMA)로 바꾸어 캐리어 이동도를 높였다 (그림 10). IBM사는 시클로헥산 도포 공정을 추가했지만 이 연구소가 제안하는 방법에서는 게이트 절연막의 재료 변경뿐이다. 제조공정 수가 늘어나지 않는 특징이 있다고 한다. 게이트 절연막에 SiO_2 를 사용한 경우에 비해 캐리어 이동도는 약

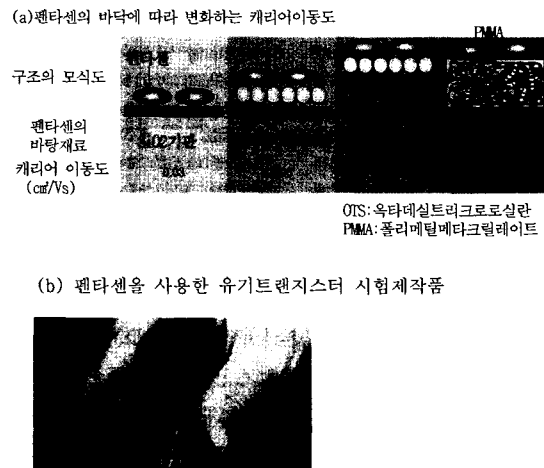


그림 10. 펜타센의 형성조건과 캐리어이동도 향상의 관계.

10배인 $0.28 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 가 되었다. 펜타센이 게이트 절연막 표면에 부착되기 쉬우므로 가로 방향의 성장속도가 높아져 결정입자 지름을 크게 할 수 있을 것으로 본다. 그 후 펜타센의 성장조건을 조정하여 얻은 최신 성과에서는 캐리어 이동도 $0.6 \sim 0.7 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 를 달성했다.

이렇게 점차 펜타센의 캐리어 이동도는 높아지고

있다. 그렇지만 앞에서 말했듯이 디스플레이 주변 회로를 유기화할 수 있는 1 MHz의 동작주파수를 지향하게 되면 1 μm 를 밑도는 채널 길이가 필요해진다. 이것을 유기 반도체 재료의 도포 공정에서 실현하는 것은 매우 어려운 일이라고 생각되었었다. 그러나 최근 트랜지스터 구조를 바꾸지 않고 서브미크론의 채널 길이를 실현하는 미세 가공기술의 후보가 두 가지 부상해 왔다. 소프트 리소그래피라는 방법과 잉크젯 프린터 기술을 응용하는 방법이다. 소프트 리소그래피는 Lucent사의 Bell Laboratories나 미 Massachusetts Institute of Technology 등이 개발중인 기술이다. 미세한 패턴을 새겨 넣은 웨이퍼의 불룩부분에 유기 재료를 부착시키고 이것을 플라스틱 기판에 도장을 찍듯 인쇄한다. 이미 Lucent사는 이 방법으로 채널 길이 1 μm 의 유기 트랜지스터를 시험제작했다. 서브미크론의 가공에도 도전한다고 한다.

잉크젯 프린터 기술을 응용하는 방법에서는 채널 길이 5 μm 의 유기 트랜지스터가 등장했다 (그림 11). 채널 길이 1 μm 를 밑도는 유기 트랜지스터는 아직 보고되지 않았지만 미세 가공기술의 비장의 카드로 기대하는 유기 반도체 기술자는 많다. 이 기술은 용매에 녹인 도전성 고분자 재료를 잉크젯 프린터의 헤드 원리를 이용해 분사하고, 미세 영역에 소스나 드레인, 게이트라는 전극을 형성하는 것. 단 「번지는 현상」이 생기는 소스 전극과 드레인 전극이 단락될 가능성이 높아진다. 그래서 세이코엡손과 영국 University of Cambridge는 두 전극 사이에 채널 길이의 폭을 가진 폴리이미드계 분리용 패턴을 만들었다. 폴리이미드는 도전성 고분자의 용액을 칠하므로 채널 부분에는 부착되지 않고 전

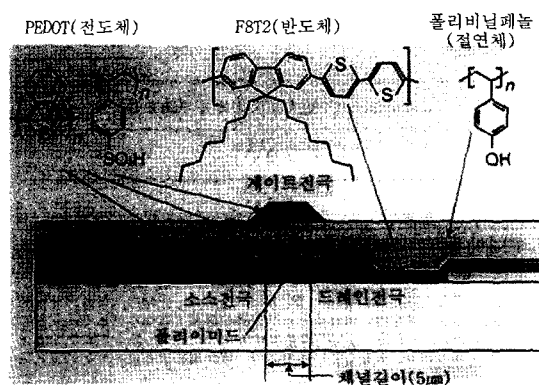


그림 11. 잉크젯으로 미세한 가로형FET를 시험 제작.

극의 단락을 막는다.

펜타센 등의 저분자계 재료의 연구가 가속되는 한편, 폴리티오펜계를 중심으로 한 고분자계 재료에 주목하는 연구 그룹도 있다. 고분자계 재료는 저분자계 재료만큼 캐리어 이동도는 높지 않지만 양산성을 높이기 쉽지 않을까 기대되고 있다. 고분자계의 유기 반도체 재료는 저분자계에 비해 고농도의 용액을 만들기 쉽기 때문이다. 고농도라면 장시간 증착을 하지 않아도, 예를 들면 스크린 인쇄 기술을 사용해 도포하기만 하면 유기 반도체로 충분한 막 두께를 얻을 수 있다. 롤지처럼 1장으로 이어진 플라스틱 기판을 사용하여 연속적으로 대량의 유기 트랜지스터를 인쇄할 수도 있다. 이미 Cambridge대학이나 세이코엡손, Philips사 등은 P3HT나 F8T2라는 폴리티오펜계 재료를 채용한 고분자계 유기 트랜지스터를 시험제작하고 있다. 캐리어 이동도는 크게 해도 0.02~0.1 cm^2/Vs 로, 앞에서 말했듯이 펜타센에 비해 분명히 뒤떨어진다. 그러나 높은 동작주파수는 요구하지 않지만 대량이고 저렴하게 TFT를 제조하고자 하는 저가격 디스플레이 용도를 중심으로 응용범위는 넓다고 한다.

단결정에 가까운 유기 반도체나 미세 가공기술을 사용하지 않아도 1 MHz 동작의 유기 트랜지스터를 만드는 방법도 보고 되고 있으며, 또한 재료 개발이 진행되는 한편, 트랜지스터 구조를 연구하여 동작주파수를 높이기 위해 매달리는 연구기관도 있다. 그 선두를 달리는 것이 치바 대학이다. MIS 구조에서 SIT 구조로 바꾸어 동작주파수를 높이는 데 주력하고 있다. SIT 구조는 MIS 구조에 비해 세 자리 이상이나 동작주파수가 높다. 현재로서는 누설 전류가 크다는 결점도 있지만 1 MHz 동작에 최초로 도달하는 유기 트랜지스터는 SIT 구조라고 한다. SIT 구조의 개요는 다음과 같다 (그림 9). 우선 플라스틱 기판 위에 소스 전극을 형성하고 그 위에 유기 반도체를 적층한다. 그 위에 띠 모양의 게이트 전극을 만들고, 다시 유기 반도체 막을 형성한다. 마지막으로 드레인 전극을 만든다. 이 구조에서 캐리어는 드레인 전극에서 띠형 게이트 전극의 틈새를 빠져 나가 소스 전극으로 흐른다. 즉 기판 면에 대해 수직 방향으로 캐리어가 움직인다. 그러므로 세로형 FET라고 하는 경우도 있다. 이에 대해 일반적으로 사용되는 MIS 구조는 기판 면에 대해 수평 방향으로 캐리어가 흐르므로 가로형 FET라고 하는 경우가 있다. SIT 구조에서의 채널 길이

는 유기 반도체의 막 두께가 된다. 치바 대학이 시험제작한 SIT 구조의 유기 트랜지스터는 막 두께가 0.2 μm 정도다. 채널 길이가 몇 μm 라는 MIS 구조의 트랜지스터와 비교하면 채널 길이가 매우 짧다. 이 짧은 채널 길이로 인해 캐리어 이동도가 $2 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 로 낮은 아몰퍼스 상태의 유기 반도체를 사용해도 동작주파수 2.3 KHz를 실현할 수 있었다(그림 12). 덧붙여 말하면 MIS 구조로 동등한 동작주파수를 얻으려면 게이트 길이 1 μm , 캐리어 이동도 0.01 cm^2/Vs 가 필요하다.

치바 대학은 SIT 구조에 캐리어 이동도가 높은 펜타센을 조합하는 연구도 진행하고 있다. 캐리어 이동도가 약 $1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ 다결정 상태보다 상당히 작은 아몰퍼스 상태의 펜타센을 사용하여, 동작주파수 30~40 KHz를 달성했다. 이제까지 사용했던 유기 반도체 재료인 「CuPc」에 비해 약 10배로 높일 수 있었다. 만일 캐리어 이동도가 1 cm^2/Vs 인 단결정에 가까운 펜타센을 사용했다고 하면 동작주

파수는 단순 계산으로 100 KHz를 넘는다. 이 대학은 펜타센을 결정화해서까지 동작주파수를 높이는 데는 소극적이다. 유기 반도체를 결정화하면 디스플레이를 구부리는 등, 외부에서 가해지는 응력으로 트랜지스터 특성이 변화할 가능성이 높다. 아몰퍼스 상태라면 특성이 극단적으로 바뀌는 일은 없을 것이다. 실용화를 고려하면 디스플레이의 형상 변화에 따라 특성이 바뀌지 않는 방법을 선택해야 한다. 우선 SIT 구조에서 동작주파수를 1 MHz 이상으로 높이기 위해 아몰퍼스 상태에서 캐리어 이동도가 높은 유기 반도체 재료를 탐색한다고 한다. 단 실제로 외부에서 응력이 가해져 트랜지스터 특성이 변화할 것인지 여부는 현재로서는 확인되지 않았으며, 아직 논의가 계속되고 있다. 캐리어 이동도는 산란 요인의 크기로 결정되며, 산란 요인에는 응력으로 인한 분자간 거리의 변동 외에도 분자의 열진동이 있다. 열진동의 영향은 일반적으로 매우 크므로 응력으로 인한 변화는 사라져 버릴 것이라는 의견도 있다.

SIT 구조의 이점은 동작주파수가 높다는 것뿐만 아니라, 유기 EL 패널용 TFT로 사용하면 제조공정을 간략화할 수 있는 가능성도 있다. 복합형 유기 발광 트랜지스터라고 하는 구조를 채용하면 현행 액정 패널이나 유기 EL 패널에 비해 제조공정수를 대폭 줄일 수 있다고 한다. 복합형 유기 발광 트랜지스터는 유기 EL 소자 안에 직접 유기 트랜지스터를 삽입한 구조가 된다 (그림 13(a)). 구체적으로는 유기 EL 소자의 정공수송층을 SIT 구조의 트랜지스터로 대체한다. 유기 EL층의 제조공정에 게이트 전극과 유기 반도체막의 제조공정을 추가하기만 하면 액티브 매트릭스 방식의 유기 EL 패널이 완성된다 (그림 14). 이 기술을 더욱 연장하면 동영상 표시할 때 한 프레임분의 시간만큼

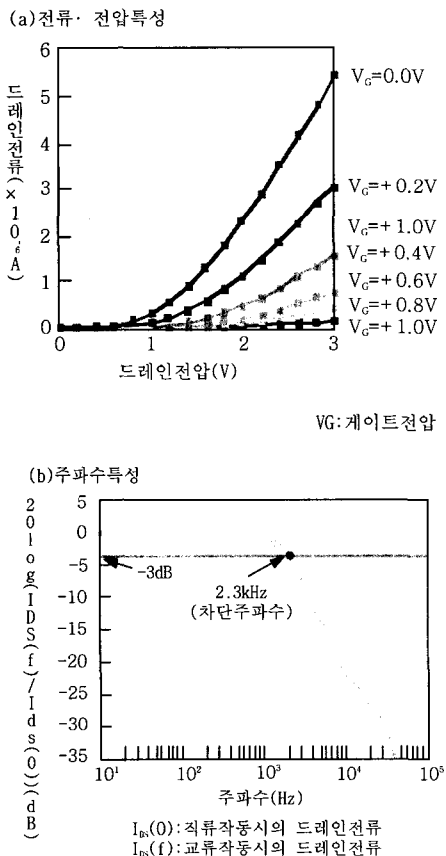


그림 12. SIT 구조의 유기트랜지스터의 전극특성.

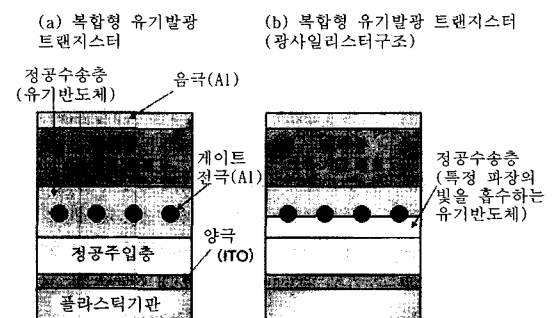


그림 13. 유기EL에 적용 가능한 SIT구조.

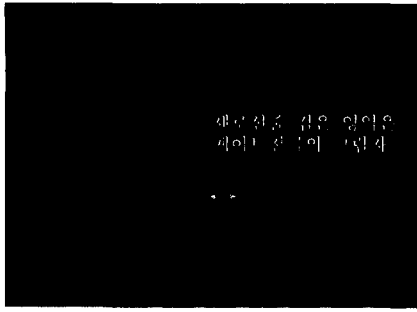


그림 14. 자 모양으로 발광이 보이는 복합형 유기발광 트랜지스터.

유기 EL 소자의 발광을 자립적으로 지속할 기능도 담을 수 있다고 한다. 유기 EL이 스스로 발하는 빛을 이용하므로 「광사일리스터 구조」라고 한다 (그림 13(b)).

5.3 향후 과제 및 전망

유기 트랜지스터의 구조에 있어서 SIT 구조는 MIS 구조에 비해 이점이 많기는 하지만 누설 전류를 억제한다는 커다란 과제가 남아 있다. SIT 구조에서는 캐리어의 흐름을 멈출 경우에 게이트 전극에 플러스 전압을 인가한다. 이렇게 하여 게이트 전극 주변부의 유기 반도체 막 안에 공핍층을 넓혀, 드레인 전극과 소스 전극간 캐리어의 흐름을 끊는다. 그러나 공핍층의 확대가 불충분하면 누설 전류가 급격히 증대한다. 띠 모양의 게이트 전극의 간격이 넓으면 공핍층의 틈새가 생기기 때문이다. 지금까지 발표된 SIT 구조의 유기 트랜지스터는 띠 모양의 간격이 40 μm 정도로 넓었다. 앞으로는 미세 가공기술을 구사하여 띠 모양의 간격을 좁혀 누설 전류를 줄일 예정이다.

구미의 유기 트랜지스터, 유기 디바이스 구동소자에 관한 연구배경에 입각하여, 유기 재료의 특성을 활용한 새로운 디바이스 구조, 새로운 동작 메커니즘에 기초한 연구 테마를 넓은 분야부터 연구개발하는 것이 급선무다. 현시점에서 유기 트랜지스터의 과제와 해결책에 대해 도식화한 것을 그림 15에 소개한다. 지금까지의 과제를 해결할 수 있는 기술로 크게 세 가지를 들 수 있다.

1) 재료 물성 향상과 신재료의 탐색에 관해서는 테트라센, 안트라센, 펜타센 등의 단결정화와 고순도화, 나아가서는 페로프스카이트계 층상 물질이나 도핑 기술을 통해, 높은 전류밀도와 고속동작이 가능해지고 있다. 이미 아몰퍼스 실리콘에 필적하는 캐리어 이동도를 가진 유기 TFT, 나아가서는 TFT

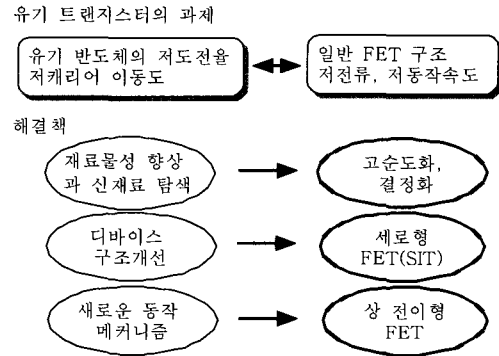


그림 15. 유기 트랜지스터의 과제와 해결책.

구조 소자를 통한 초전도나 레이저 발진 소자도 실현되기에 이르렀다. 또 유기 반도체 액정은 그 흥미로운 물성 (액정성, 배향성, 이방성 등) 외에, 높은 캐리어 이동도가 보고되었고 적절한 소자 구조와 재료 프로세스를 적용하여 앞으로 새로운 전개가 기대되는 재료계이다.

2) 디바이스 구조의 개선의 하나로 세로형 구조를 들 수 있다. 세로형 구조의 특징으로는 유기 반도체의 문제점이었던 고속 응답과 대전력화를 세로형 FET(정전 유도 트랜지스터: SIT)로 하면 개선할 수 있다는 점이다. 예를 들면 단결정 실리콘 SIT에서는 반도체 위에 선 모양이나 빗살 모양의 게이트 전극을 제작한 후, 반도체 결정을 재성장할 필요가 있고, 재성장막의 결함 등이 소자 특성에 커다란 영향을 미친다. 그 반면, 유기 재료 소자에서는 유기 EL 소자 등에서 아몰퍼스 구조가 나온 특성을 나타내므로 유기 재료계에서도 재성장에서 문제점이 적다. 이미 유기 반도체 증착막을 이용한 세로형 FET, 유기 EL 소자와 조합한 유기 발광 트랜지스터의 동작이 확인되었다. 3) 새로운 동작 메커니즘을 이용한 소자 개발은 가로형 FET에서도 대면적, 경량, 유연성, 저렴하다는 유기 재료의 본질적인 특징 이외에, 게이트 전압 제어를 통한 전기적 스위칭 현상 (전류 스위칭, 전하이동착체의 금속-절연체 전이현상 등)이라는 무기 반도체에는 볼 수 없는 새로운 기능을 기대할 수 있다. 예를 들면 도너 억셉터 적층 구조 FET는 도너 억셉터 계면층의 전하 이동량이 게이트 전압에 따라 변조되어 동작할 것으로 예상된다. 즉 게이트 전계를 통한 전하 이동 변조는 근접한 분자간 전하이동이므로 고속동작을 기대할 수 있고 금속-절연체 전이에 기초한 커다란 전류 on/off 비와 대전류 제어를 기

대할 수 있다. 또 지금까지의 캐리어 농도의 제어를 중심으로 한 무기계 전자 디바이스의 연장선상에서 예상되는 트랜지스터의 동작한계를 타파할 신형 디바이스 개념이 될 수 있다. 이상의 기술을 통해 유기 트랜지스터의 소자 특성을 크게 개선할 수 있다면 실용적 유기 디바이스로 응용될 가능성은 높다. 또 유기 초박막이 유망시되는 디스플레이 소자나 스마트 카드, 정보 태그 등에 응용할 때도 그 파급효과는 크다.

6. 맺음말

앞으로 flexible display를 개발할 때 유기 박막의 특성에 적합한 소자 설계가 중요하다고 생각한다. 특히 유기 디바이스의 최대 특징인 경량, 유연성, 저비용 프로세스를 활용하기 위해서는 인쇄기술, 잉크젯 방식, 자기 조직화 기술이라는 유기물에 적합한 프로세스 기술의 확립이 필요할 것이다. 또 유기물은 공기, 빛 및 수분에 노출되면 화학적 성질이 변하기 때문에 소자 성능, 안정성이라는 문제점을 해결할 필요가 있고, 재료 개발과 재료 물성 평가 및 전극/유기막 계면, 캐리어 전도기구 (charge transfer mechanism) 등의 기초적인 평가기술을 확립하는 것이 중요하다. 이처럼 유기전자공학은 새로운 미래를 열어주긴 하지만 아직은 가야할 길이 멀다. 앞으로 이 문제를 해결하는 것이 유기전자공학의 큰 관건이다.

참고문헌

1. http://www.eet.com/printableArticle?doc_id=OEG20030326S0037.
2. <http://release.nikkei.co.jp/detail.cfm?relID=28557>.
3. *Nikkei Business*, p. 56, October 22 (2001).
4. M. Fukuda, K. Sawada, S. Morita, and K. Yoshino, *Synth. Met.*, **41**, 855 (1991).
5. M. Rehahn, A. D. Schlüter, G. Wegner, and W. J. Feast, *Polymer*, **30**, 1054 (1989).
6. U. Scherf and K. Mullen, *Makromol. Chem. Rapid Commun.*, **12**, 489 (1991).
7. M. Kreyenschmidt, F. Uckert, and K. Mullen, *Macromolecules*, **28**, 4577 (1995).
8. S. Setayesh, D. Marsitzky, and K. Mullen, *Macromolecules*, **33**, 2016 (2000).
9. G. Klärner, M. Davey, W. Chen, J. Scott, and R. Miller, *Adv. Mater.*, **10**, 993 (1998).
10. J. C. Scott, S. A. Carter, S. Karg, and M. Angelopoulos, *Synth. Met.*, **85**, 1197 (1997).
11. S. A. Carter, M. Angelopoulos, S. Karg, B. J. Brock, and J. C. Scott, *Appl. Phys. Lett.*, **70**, 2067 (1997).
12. Y. Cao, G. Yu, C. Zhang, R. Menon, and A. J. Heeger, *Synth. Met.*, **87**, 171 (1997).
13. 高分子, 2002년 2월호, p.79-81.
14. *Nikkei Electronics*, p. 55, October 8 (2001).