Flexible OLED 기술 동향

추혜용
한국전자통신연구원
기반기술연구소 책임연구원

1. 서 론

반도체 기술, 나노기술 그리고 정보통신기술의 급격한 발달과 이들 기술간의 융합으로 정보저장, 정보처리, 통신기기들의 소형화가 이루어지고 있다. 또한 이러한 기술의 발전을 바탕으로 언제 어디서나 정보를 접할 수 있는 유비쿼터스 (ubiquitous) 시대의 도래를 맞이하고 있다. 기술 및 문화의 변화에 따라 디지털 컨버전스에 부응하는 전자정보기기와 인간의 인터페이스 역할을 하는 디스플레이의 중요성이 부각되고 있다. 특히, 인터넷, IMT-2000, PDA 등 정보 이용 환경의 고도화로 경박단소형, 저소비전력 및 천연색 동영상 구현 등이 가능한 모바일 디스플레이의 수요가 급증하고 있다.

디스플레이는 진공관 시대를 시작으로 높은 해상도의 고화질과 대면적 그리고 실감영상 등의 고성능화를 추구하며 발전해 왔다. 여기에 이동의 편리함을 더하여 고해상도로 동영상을 보여줄 수 있을 만큼의 고화질로써, 종이처럼 얇고 가벼워 이동이 용이하며, 필요에 따라 펼칠 수도 접거나 말 수도 있어 대면적 특성을 함께 만족시킬 수 있는 플렉시블 디스플레이를, 더 나아가 종이형 (paper-like) 디스플레이를 필요로 하고 있다(그림 1). 그림 2의 플렉시블 디스플레이 상상도에서와 같이 가까이로는 유선형 핸드폰이나, 손목형 디스플레이로 나아가 곡면형 디스플레이, 벽지형 디스플레이, 두루마리 디스플레이, 더 나아가서는 입는 디스플레이로 응용될 것으로 기대하고 있다.

플렉시블 디스플레이는 핸드폰, PDA, 노트북, TV 등으로 폭 넓게 사용되고 기존 LCD를 근간으로 하는 플렉시블 LCD 기술과 이미 간단한 응용분야에서 상용화를 이끌어낸 전자종이 기술 그리고 얇고 가벼우며, 빠른 동화상의 정보 제공이 가능한 OLED를 기반으로 하는 플렉시블 OLED 기술이 가장 유력한 후보기술로 여겨지고 있다. 이 글에서는 이들 기술중에서 기존의 OLED를 근간으로 하여 플렉시블 OLED를 가능하게 하는 기술과 플렉시블 OLED 디스플레이를 위하여 해결해 나가야 할 기술들 그리고 현재 국내·외의 연구동향에 대하여 살펴보고자 한다.

2. 플렉시블 OLED를 가능하게 하는 기술들

OLED는 양극과 음극사이에 두께가 100 ~ 200 나노미터 정도의 발광특성을 갖는 유기 반도체 박막이 있는 구조로 구성되어 있다. 이러한 OLED에 순방향의 전압을 인가하면 양극에서는 유기층의 HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) 준위로 정공이

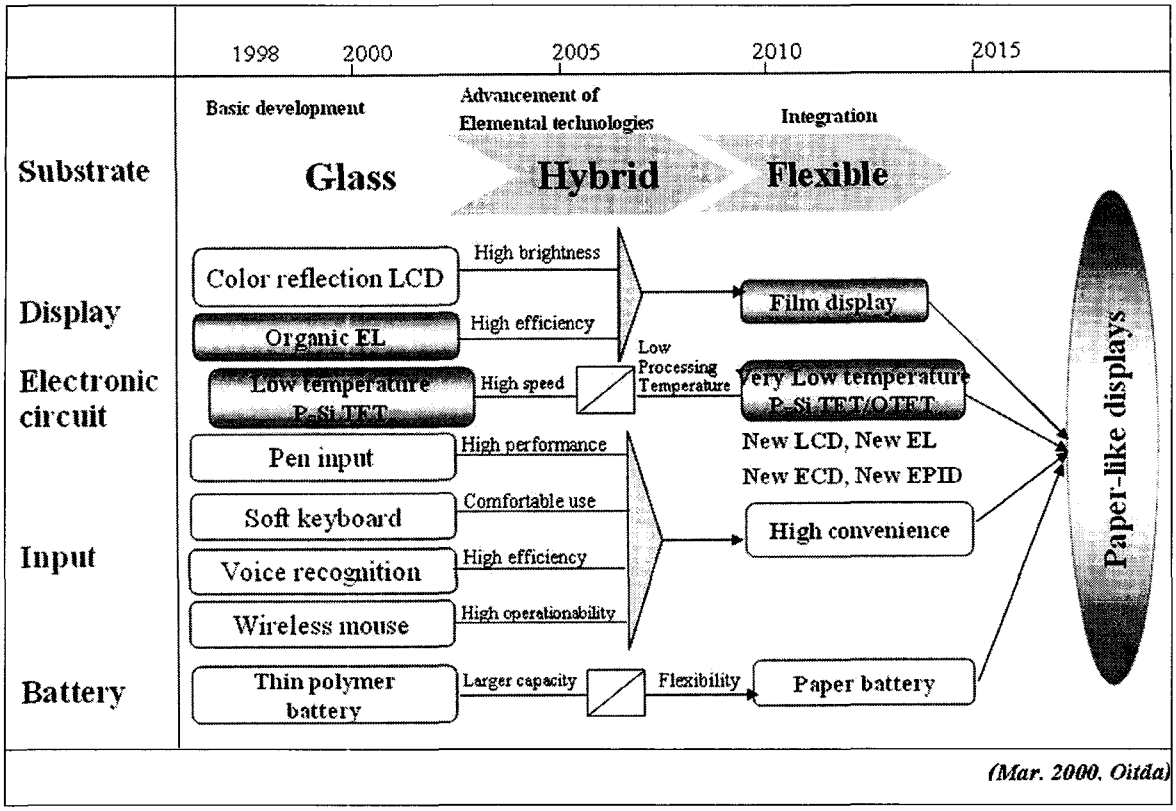


그림 1. 디스플레이 발전방향.

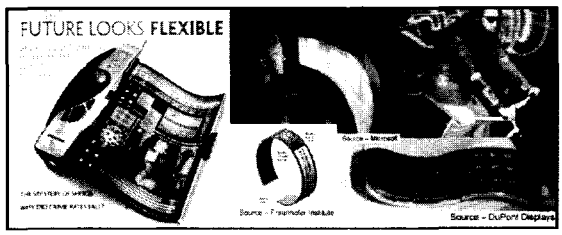
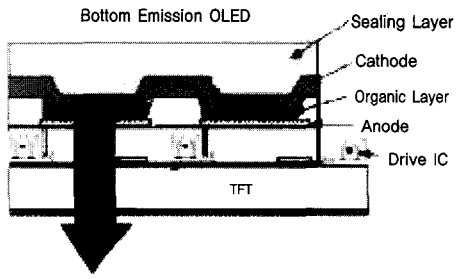


그림 2. 플렉시블 디스플레이 응용 상상도.

주입되고, 음극에서는 LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital)로 전자가 주입된다. 주입된 전자-정공은 엑시톤(exciton)을 형성하고, 이 엑시톤이 바닥 상태로 천이하면서 빛을 방출하게 된다.

OLED에서 발광하는 빛의 방출방향에 따라 하부방출형, 상부방출형 그리고 양면발광형으로 나눌 수 있다. 하부방출형의 경우에는 양극으로 투명전극인 ITO가 사용되고 음극으로는 일함수가 낮은 금속이 사용된다. 반면 상부방출형은 양극으로 일함수가 큰 금속이나 금속/ITO의 복합층이 사용되고 음극으로 일함수가 낮은 금속으로 반투명하게 형성하거나 투명전극으로 사용하고 있다. 양면발광형은 양극과 음극을 모두 투명 혹은 반투명전극으로 사용하여 기판의 양면으로 빛이 방출하게 한다. 양면발광형 OLED는 폴더형 휴대폰에 채택될 경우 하나의 디스플레이로 내 · 외부창 역할을 동시에 할 수 있기 때문에 휴대폰의 두께를 최소화하고 가볍게 만들 수 있는 장점이 있다.

OLED의 구동방식에 따른 분류에는 수동구동형 OLED (Passive-matrix OLED, PM-OLED)와 능동구동형 OLED(Active-matrix OLED, AM-OLED)가 있다. PM-OLED는 양극과 음극의 교차되는 부분이 화소를 형성하고, AM-OLED는 각 화소에 구동 박막 트랜지스터(TFT)를 포함하는 구조로 되어 있다. PM-



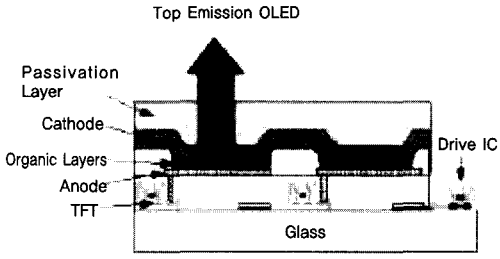


그림 3. 하부방출형과 상부방출형 AM-OLED 단면도.

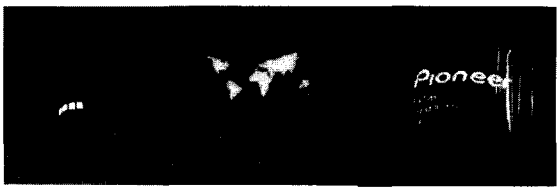


그림 4. 다양한 기판에 구현한 플랙시블 OLED 디스플레이 ; (a) Steel Foil(UDC), (b) Glass(Schott Glas), (c) PET(Pioneer).

OLED는 구조는 간단하나, 짧은 시간동안 선택된 화소가 빛을 발하게 되므로 해상도가 높아질수록 선택된 화소의 발광휘도는 높아져야 한다. 따라서 소자의 열화 및 전력소모 등의 단점으로 대면적으로 부적합하다. AM-OLED는 하부방출형의 경우의 화소내의 TFT에 의해 발광면적이 줄게 되므로 개구율을 높이는 것이 매우 중요하다. 이를 해결하기 위하여 TFT의 상부에 OLED를 적층하여 기판의 상부로 발광하게 하여 개구율을 높이는 상부방출형에 대한 연구가 이루어지고 있다.

플렉시블 OLED 디스플레이는 기존의 유리를 기반으로 하는 OLED 디스플레이와 비교하여 플렉시블한

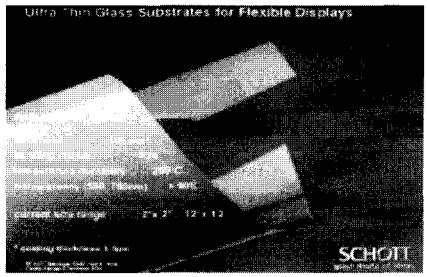


그림 5. 플렉시블 유리 기판(Schott Glass사).

기판을 사용하게 됨으로써 소재, 소자 그리고 공정면에서 기술적인 어려움과 해결해야 할 문제점들이 있다. 유리를 기반으로 하는 OLED 디스플레이와 비교한 플렉시블 OLED 디스플레이를 가능하게 기술로는 크게 플렉시블 기판 및 차단막(barrier) 기술, 패널기술, 그리고 제조 기술로 나눌 수 있다.

2.1 플렉시블 기판 및 차단막(barrier) 기술

플렉시블 OLED 디스플레이를 실현시키기 위해서는 기판이 얇고 유연하면서도 유리전이온도, 열팽창, 경도, 다층코팅 박막의 호환성, 두께의 균일도 및 평탄도, 내화학성이 우수한 특성을 가져야 한다. 플렉시블 기판으로는 Steel 같은 금속 재질을 이용하여 박막화함으로써 유연하면서 내열성 및 내구성을 확보한 금속 박막과 100 μm 내외 두께의 박막 유리에 고분자막을 코팅하여 가벼우면서 유리의 깨지기 쉬운 성질을 보완하는 플렉시블 유리기판, 그리고 PET (Polyethyleneterephthalate), PES (Polyether-sulphone), PC (Polyester-carbonate), PI (Polyimide), PEN (Polyethylenenapthalate) 등의 플라스틱 필름이 있다.

Steel foil과 같은 금속박막은 불투명해서 상부방출형으로 구현해야 만 한다는 제약이 있고, 아직은 평탄도면에서 OLED가 요구하는 조건을 만족하기에는 부족하여 평탄화막을 도포해서 사용해야 하지만, 공정온도, 열팽창, 내화학성 및 내구성 면에서는 장점이 있다. 특히 플렉시블 AM-OLED를 구현하기 위해서는 고온에서 이루어지는 TFT 공정을 무리없이 수행할 수 있다는 점에서 매우 유리하다.

플렉시블 유리기판은 유리를 100 ~ 200 μm 두께의

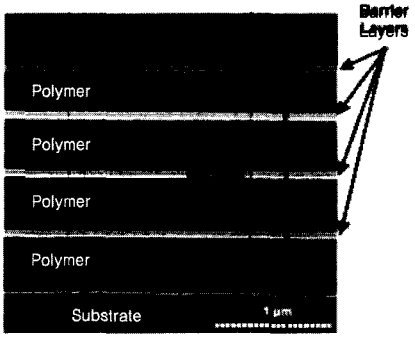


그림 6. 플라스틱 기판상에 다층 유/무기 차단막의 단면도(Vitex사).

초박막으로 가공한 후, 깨짐을 방지하기 위하여 고분자 막을 3~5 μm 두께로 코팅하여 얇으면서도 유연한 기판을 얻을 수 있다. Schott Glass사에서 제작한 플렉시블 유리는 곡율반경이 3 μm으로 유연하고 380 nm ~780 nm 파장대에서 90 %이상의 투과도를 가지며, 250 ℃ 이상의 내열강도 특성을 확보함으로써 PM-OLED 뿐만 아니라 AM-OLED제작도 용이하게 할 수 있을 것으로 기대된다. 금속과 유리를 소재로 한 플렉시블 기판은 산소와 수분투과 차단막이 필요없다는 것은 매우 큰 장점이다.

플라스틱 기판은 두께의 균일도 및 평탄도, 내화학성 등 아직 해결해야 할 문제점이 있으나, 얇고 가벼우며, 유연하고, Roll-to-Roll 공정과 같이 대량생산으로 저가의 공정이 가능하다는 장점이 있다. 표1은 플라스틱 기판의 종류와 물성을 나타낸 것이다. OLED는 수분과 산소에 매우 민감한 소자이다. 장수명의 OLED 구현을 위해서는 $1x10^{-5}$ g/m^2/day 이하의 수분 투과도 특성이 요구된다. 그러나 일반적으로 플라스틱 기판의 수분 투과도는 10 ~ 1000 g/m^2/day 으로 OLED 디스플레이에 적용하는 데는 어려움이 있다. 따라서 플라스틱 기판에 수분 차단막을 형성하는 것이 불가피하다. 차단막은 그림 6과 같이 유기막과 무기막을 적층하는데 무기막으로는 SiOx, SiNx, SiON, AlO, AlON, MgO 등이 사용되며, 수분과 산소를 차단하는 역할을 한다. 유기막은 무기막의 증착시 발생하는 pinhole을 막아주고 스트레스를 완충시켜 무기막의 박리(delamination) 와 균열(Crack)을 막아주는 역할을 하며, 용액공정과 진공증착법으로 형성할 수 있다. 하부방출형의 경우에는 빛이 기판을 통하여 방출되므로 차단막은 저투습, 저투산소 특성뿐만 아니라 고광투과 특성도 확보해야 한다.

2.2 패널 기술

플렉시블 OLED 디스플레이도 유리를 기판으로 하는 패널과 마찬가지로 양극과 음극사이에 유기박막을 형성하는 것은 동일하나, 양극으로 사용되는 ITO의 경우에 반복되는 구부림의 스트레인(strain)에 의하여 박리되거나 균열이 발생하는 문제점이 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 투명전극으로 PEDOT:PSS, 카본 나노튜브, ZITO, GITO, ZIO, GIO와 같은 새로운 물질을 개발하려는 노력들이 이루어지고 있다. 이러한 신물질들이 ITO를 대체하여 OLED의 양극으로 사용되기 위해서는 유연성뿐만 아니라 평탄도 (RMS : <1.5 nm), 판저항 (<10 Ω/□), 투과도 (>85%), 일함수 (> 4.5eV) 특성을 모두 만족해야 한다.

OLED의 장수명화를 위해서는 산소와 수분으로부터 유기막을 보호할 수 있는 봉지(encapsulation)기술

표 1. 플라스틱 기판의 물성.

Base Polymer	PET	PEN	PC	PES	PAR	PCO	PI
CTE(-55 to 85°C)ppm/°C	15	13	60-70	54	53	74	30-60
%Transmission (400-700nm)	>85	0.85	>90	90	90	91.6	Yellow
Water absorption(%)	0.14	0.14	0.4	1.4	0.4	0.03	1.8
Young's moduus/Gpa	5.3	6.1	1.7	2.2	2.9	1.9	2.5
Tensile strength/MPa	225	275	NA	83	100	50	231

이 반드시 필요하다. 플렉시블 OLED를 봉지하는 기술은 기존 유리를 기반으로 하는 SUS나 유리 캔 봉지와는 달리 디스플레이의 유연함을 유지하면서 산소와 수분의 투과를 막을 수 있어야 한다. 플렉시블 OLED에 사용되는 봉지 방법으로는 유기/무기 다층막으로 구성된 차단막(Barrier) 필름을 플렉시블 OLED 위에 부착(lamination)시키는 방법(그림 7(a))

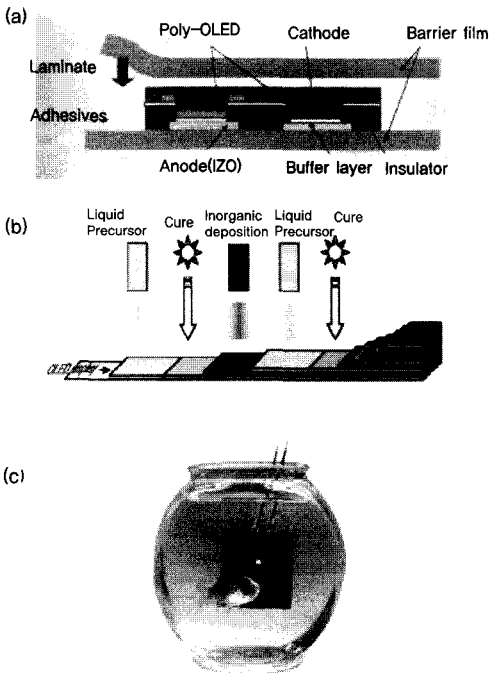


그림 7. 봉지기술 ; (a) 부착식 봉지(DNP) (b) 유/무기 적층 패시베이션 (Vitex) 및 (c) 패시베이션된 OLED를 물 속에서 구동한 사진.

과 OLED 위에 차단막을 직접 형성하는 패시베이션(passivation) 방법(그림 7(b))이 있다. 패시베이션 방법은 기판의 차단막을 형성하는 방법과 같이 유기막과 무기막을 적층하는 구조이나 OLED 위에 직접 형성하므로 OLED의 특성에 영향을 미치지 않게 형성하는 것이 매우 중요하다. 특히, 무기막 증착시 저온에서 공정이 이루어져야 하며, plasma나 ion-beam에 의한 손상이 없도록 해야 한다. 무기막은 기판 차단막과 같이 산화막들을 CVD, Sputter, ALD와 같은 증착법으로 형성하며, 유기막의 형성은 용액공정으로 도포하는 방법과 진공공정으로 형성하는 방법이 있다. 그림 7(b)는 Vitex 사 (미국)에서 개발한 패시베이션 기술의 한 예로써 UV 경화 유기막과 무기막을 반복하여 증착한다. 그림 7(c)는 이렇게 패시베이션된 OLED를 물 속에서 구동하는 사진이다.

플렉시블 OLED를 제작하는 방법으로는 진공공정과 용액공정으로 나눌 수 있다. 진공공정으로는 유기 저분자를 진공에서 증착하는 방법이 있으며, 용액공정으로는 용액고분자의 잉크젯 프린팅법, 스크린 프린팅법이 있다. 플렉시블 디스플레이의 큰 장점인 값싸고 대면적이 가능하게 하기 위해서는 진공공정보다는 용액공정이 유리하다.

앞서 설명한 바와 같이 PM-OLED는 디스플레이의 패널의 크기가 증가할수록 열화와 소비전력이 증가하므로 대면적의 플렉시블 OLED 디스플레이를 구현하기 위해서는 능동구동방식에 의한 디스플레이 구현이 필수적이다. 이를 위해서는 플렉시블 기판상의 스위칭 소자인 트랜지스터(transistor) 제작이 이루어져야 한다. 트랜지스터는 LTPS(Low Temperature

표 2 연구그룹별 플렉시블 트랜지스터 제작방법.

Process	Low-Temperature Direct Processes	Liquid Processes	Solid Processes	Transfer Processes
Research Group	FlexICs Rolltronics Samsung Electronics Xerox Lightmith	Plastic Logic Nanolayers Nanosys	Sarnoff/DuPont Samsung SDI	Seiko-Epson Sony

Poly Silocon), a-Si:H TFT, OTFT(Organic TFT) 가 있으나, LTPS와 a-Si:H TFT는 공정온도가 높으므로 150 ℃ 이하의 저온공정을 통하여 플라스틱 기판 위에 제작하기 위한 노력이 이루어지고 있다. 그외 기존의 TFT 또는 반도체 공정에서 제작된 트랜지스터를 플라스틱 기판에 전이하는 기판전이 기술도 개발되고 있다. 최근들어 플라스틱 기판 및 OLED와 동일한 유기물 소재를 이용한 OTFT에 대한 연구가 국내 · 외에서 가속화되고 있다.

2.2 제조기술

플렉시블 기판위에 OLED를 제작하는 경우에는 배치타입과 Roll-to-Roll 방식으로 구분할 수 있다. 플렉시블 디스플레이의 가장 큰 장점인 값싸고 대면적을 구현하기 위해서는 배치타입보다는 Roll-to-Roll 방식(그림 8)이 유리하다. 그러나 전공정에 대하여 Roll-to-Roll 방식이 적용되기 위해서는 리소그라피(Lithography), 유기물/ 전극의 형성, 패시베이션 등의 전공정에 대한 장비 개발이 선행되어야 한다.

플렉시블 OLED를 가능하게 하는 기술들을 간단하게 소개하였다. 이와 더불어 플렉시블 OLED을 평가하는 기술 또한 매우 중요하다. 아직은 확립된 기술이 없으나, UDC (미국) 등 플렉시블 OLED를 연구하는 일부 그룹 등에서 초보적인 단계의 연구들이 이루어지고 있다.

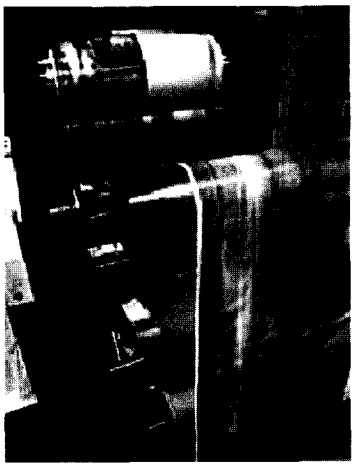


그림 8. Roll-to-Roll에 의한 플렉시블 OLED제조방법.

그림 9. 다양한 플렉시블 OLED ; (a) PLED(DupONT, 2002), (b) PM-OLED(UDC, 2002), (c) AM-OLED(Seico-Epson, 2003), (d) PM-OLED(ETRI, 2003), (e) PM-OLED (DNP, 2004), (f) PM-OLED(Pioneer, 2003).

3. 연구동향

플렉시블 OLED는 1998년부터 로고나 7-segment의 시연이 이루어지기 시작하여 2003년 Pioneer사에서 3인치급 풀컬러 플렉시블 PM-OLED를 플라스틱 기판상에 시연하였다. 반면, 플렉시블 AM-OLED는 1999년 UDC와 Princeton 대학이 함께 steel foil을 기판으로 하여 a-Si:TFT위에 OLED 를 발표한 이래로 2003년 세이코-엡슨에서 TFT의 기판전이 방법으로 플렉시블 AM-OLED 디스플레이를 처음으로 시연하였다. 플렉시블 OLED는 Pioneer, UDC(Universal Display Co.)를 중심으로 단분자 유기물 소재로 진공증착을 기반으로 한 연구가 이루어지고 있으며, Philips, DuPont, CDT(Cambridge Display Tech.), Seico-Epson, DNP(Dai Nippon Printing Co.)을 중심으로 고분자를 소재로 한 잉크 젯, 프린팅 방식에 의한 플렉시블 OLED 연구가 이루어지고 있다. 플렉시블 OLED의 핵심기술인 기판과 차단막은 Sumitomo

Backlite, Teijin, 3M 등이 플라스틱 기판을 Schott Glas 사에서 플렉시블 유리기판을 개발하여 판매하고 있다. 패시베이션 기술은 유/무기 다층막 구조의 특허를 가지고 있는 Vitex 사와 패널을 개발하는 각 업체 및 연구기관에서 독자적으로 개발하고 있다.

국내에서는 ETRI, KIST, KETI 등의 연구소를 중심으로 플렉시블 OLED 연구가 이루어지고 있다. ETRI는 1998년 국내에서는 처음으로 7-segment 를 PET 기판에 구현한 이래로 2000년 1.8인치급으로 단분자 유기물과 고분자 PM-OLED를 구현하였으며, 지금까지 플라스틱을 기반으로 하는 OLED 디스플레이와 패시베이션 기술에 대한 연구를 수행하고 있다.

4. 결 론

디스플레이 산업은 반도체 산업과 더불어 우리 경제의 중추 산업으로 자리잡고 있다. 또한, 디스플레이는 디지털 컨버전스라는 환경 변화에 발맞추어 반도체, 인터넷, 이동통신, 가전기술 등과 융합된 새로운 시장 창출이 기대되고 있다. 플렉시블 디스플레이의 구현으로 주머니속에 중 · 대형 디스플레이를 휴대할 수 있다면 모바일 IT 산업 발전과 더불어 사회문화 전반의 변화를 몰고 올 것이다.

과학기술의 발달과 더불어 많은 경우에서 인간의 상상력이 현실로 이루어지는 것을 보아왔다. 플렉시블 디스플레이는 마이너리티 리포터와 같은 SF 영화 속의 상상의 디스플레이가 아닌 우리의 생활 속으로 다가올 것이라 믿는다.

참고 문헌

[1] William A. MacDonald, "Engineered films for display technologies", J. Mater. Chem., Vol. 14, p. 4, 2004.

[2] A. Yoshida, S. Fujimura, T. Miyake, T. Yoshizawa, H. Ochi, A. Sugimoto, H. Kubota, T. Miyadera, S. Ishizuka, M. Tsuchida, and H. Nakada, "3-inch Full-color OLED Display using a Plastic Substrate", SID 03 DIGEST, p. 856, 2003.

[3] A. Yoshida, A. Sugimoto, T. Miyadera, and S. Miyaguchi, "Organic light emitting devices on polymer substrate", Polym. Sci. Technol,. Vol. 14, p. 327, 2001.

[4] Sugimoto, A. Yoshida, T. Miyadera, and S. Miyaguchi "Organic light emitting devices on polymer film substrate", Proceedings of the 10th International Workshop on Inorganic and Organic Electroluminescence (EL' 00), 2000.

[5] C. C. Wu, S. D. Theiss, G. Gu, M. H. Lu, J. C. Sturm, S. Wagner, and S. R. Forrest, "Integration of organic LED' s and amorphous Si TFT' s onto flexible and lightweight metal foil substrates", IEEE Electron Dev. Lett., Vol. 18, No. 12, 1997.

[6] 이창희, 강승열, 도이미, "차세대 디스플레이 기술: 종이와 같은 디스플레이", 물리학과 첨단기술, 2003.

[7] Oitda Newletter No.9, Mar 20, 2000, www.oita.or.jp

[8] www.universaldisplay.com

[9] A. Plichta, "Flexible display glass substrate", Flexible Display & Electronics 2004, April 26, San Francisco, USA.

· 저 · 자 · 약 · 력 ·

성명 : 추혜용

◈ 학력

· 1987년 경희대 물리학과 이학사

· 1989년 경희대 물리학과 이학석사

◈ 경 력

· 1989년 – 현재 한국전자통신연구원 기반기술연구소 책임연구원