

Flexible Display 기술과 동향

김영훈, 권순형, 박성규, 김원근, 한정인(전자부품연구원)

1. 서론

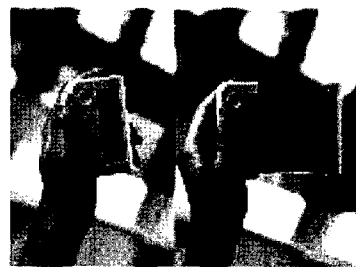
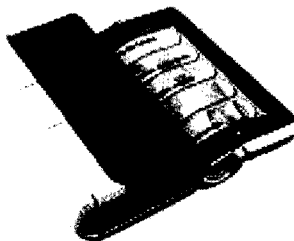
최근 기술혁신 및 융합을 통한 산업용기기의 저가 격 실현은 새로운 전자기기를 가정과 개인으로 침투, 확대시켰고 최근에는 급속한 정보화 기술의 진전으로 언제 어디서나 정보를 접할 수 있는 유비쿼터스 컴퓨팅의 시대로 접어들고 있으며, 네트워크, 인터넷, 디지털 콘텐츠, 휴대 정보기기, 멀티미디어, 유무선 통신기술 등이 융합하며 종래 개념으로 정의할 수 없는 새로운 기기로 점점 진화되어 가고 있다.

이러한 전자기기의 진화와 더불어 다양한 정보를 인간에게 언제 어디서나 전달하는 정보전달 매체로서 외부 충격에 강하며, 휴대하기 편하고, 경

량, 박형이면서 임의의 형태로 패널 구현이 가능하고, 특히 유연하여 종이처럼 접거나 두루마리의 형태까지도 가능한 유비쿼터스 디스플레이의 개발 필요성이 증대하면서 현재의 유리기판을 고분자기판으로 대체하려 하고 있다.

이러한 고분자기판을 이용하면 다양한 형태의 플렉서블 디스플레이(LCD, OLED, E-Paper 등) 구현이 가능해질 뿐만 아니라 이동통신 단말기용 디스플레이 및 휴대 정보통신 기기용 표시 소자와 같이 얇고 가벼운 조건 이외에도 외부 충격에 강하고 특히 휘어지거나 다양한 형상의 디스플레이를 요구하는 제품에 적용될 수 있다¹⁻³⁾.

플렉서블 디스플레이의 궁극적인 제품 형태는 종이처럼 쉽게 구부릴 수도 있고, 경우에 따라서



〈그림 1〉 플렉서블 디스플레이를 활용한 다양한 제품군

는 두루마리처럼 말 수 있는 형태이다. 하지만 현재에는 일정한 곡률 반경으로 휘어진 형태의 디스플레이나 휘어지지 않지만 고분자 기판 상에 제작된 디스플레이도 플렉서블 디스플레이의 범주에 포함된다. 이는 기술적으로 아직까지는 종이처럼 구부린 형태에서도 전기적, 광학적 특성 저하 없이 디스플레이를 구현하기가 매우 힘들기 때문이다. 특히 LCD의 경우 구조적 특성 상, 두 개의 기판 사이에 액체인 액정인 들어가 있기 때문에 휘어질 경우 위치에 따라서 셀 갭의 변화가 있게 되고, 액정의 흐름이 발생하여 결과적으로 광학 특성이 달라질 수 있다. 이와 같이 플렉서블 디스플레이를 구현하기 위해서는 기존의 유리 기판을 이용할 때에는 발생하지 않았던 여러 가지 변수들이 생길 수 있기 때문에 이를 해결하기 위한 추가적인 연구가 많이 필요한 실정이다.

상기에서 언급했던 LCD 이외에도 현재 유기 발광물질을 이용한 플렉서블 OLED, 그리고 E-Ink 등의 전기영동방식의 디스플레이 모드를 이용한 E-Paper에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 우선 OLED 방식의 플렉서블 디스플레이의 개발 동향을 살펴보면 기존의 단순한 수동구동(Passive-Matrix) 혹은 Segment 방식에서 능동구동(Active-Matrix) 방식으로 전환되는 과정에 있으며, 능동구동에 필요한 TFT로는 현재 비정질 실리콘(a-Si:H) TFT,^[4] 다결정 실리콘을 이용한 LTPS(Low-Temperature Poly-Si) TFT,^[5] Pentacene, Polythiophene 계열 등의 유기 반도체를 이용한 OTFT(Organic Thin-Film Transistor) 기술^[6], 그리고 ZnO, IZGO 등의 산화물 반도체를 이용한 Oxide TFT 기술^[7] 등이 검토되고 있다.

현재 플렉서블 OLED를 구현하는데 있어 가장 큰 문제점 중 하나는 기판 및 보호막의 투습율(Water Vapor Transmission Rate)이다. 유기 발광물

질 등 OLED에 들어가는 유기물질은 대기 중에 존재하는 수분 및 산소의 영향을 많이 받는다. 기존의 유리 기판을 사용할 경우에는 유리 기판이 효과적인 수분 및 산소 투과 방지막 기능을 동시에 수행했지만 고분자 기판을 사용할 경우 고분자 기판이 수분 및 산소 투과 방지막 역할을 제대로 수행하지 못하기 때문에 수명이 급격히 감소하는 문제가 발생한다. 따라서 플렉서블 OLED에서는 이와 같은 문제점들을 해결하는 연구가 전세계적으로 활발히 진행되고 있다.

마지막으로 E-Ink의 전기영동방식의 입자, 그리고 Bridgestone의 입자 기반의 디스플레이 모드를 이용한 E-Paper 기술이 있다. 현재 다른 기술들과 비교해 E-Paper 타입의 플렉서블 디스플레이의 상용화가 가장 빨리 이루어 질 것으로 기대되고 있는데 빠르면 2009년에는 실제 시판하는 제품을 볼 수 있을 것으로 기대되고 있다. 이렇게 E-Paper 타입의 플렉서블 디스플레이의 상용화가 가장 빠른 이유는 E-Paper가 요구하는 TFT나 기타 다른 특성이 다른 디스플레이 모드에 비해서 월등히 낮기 때문이다. TFT의 경우 전하이동도가 약 $10^{-2} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 이상이면 패널 구동이 가능하며 LCD나 OLED 등 다른 모드에 비해서 수분 및 산소 투과에 따른 영향이 상대적으로 적다. 또한 Bridgestone 방식의 E-Paper의 경우 TFT 없이 수동구동(PM)도 가능하기 때문에 제품화에 있어 매우 유리하다고 할 수 있다.

이와 같이 현재 플렉서블 디스플레이는 LCD, OLED, E-Paper 등 다양한 디스플레이 모드로 개발되고 있다. 따라서 본고에서는 다양한 형태로 연구·개발되고 있는 플렉서블 디스플레이를 기술적으로 분류하여 최근의 개발 동향 및 향후 전망을 다루고자 한다.

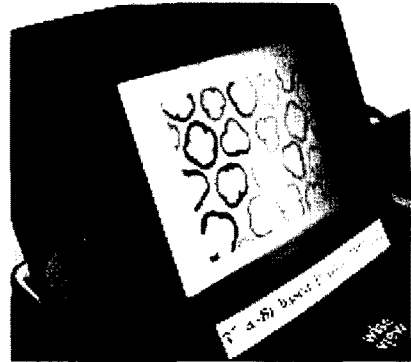
II. 플렉서블 디스플레이 : 모드별 분류

1. LCD (Liquid Crystal Display)

LCD는 현재 여러 가지 디스플레이 모드 중 가장 상용화가 앞서 있고 또한 기술적으로도 가장 성숙되어 있는 기술이다. 이런 이유로 플렉서블 디스플레이 개발 초기 단계에는 주로 LCD 모드를 채택하여 기술 개발이 이루어졌다. Bi-stable 특성을 가진 콜레스테릭 액정이나 강유전성 액정을 이용한 메모리 모드의 플렉서블 LCD가 특히 많은 관심을 받았었는데 이는 메모리 모드 LCD의 소비전력이 매우 적어 스마트 카드 등에 적용하기에 가장 적합했던 기술이었기 때문이다. 하지만 이런 메모리 모드의 플렉서블 LCD는 응용 분야에 한계가 있었고 또한 TFT를 이용한 고휘질의 TFT-LCD가 등장함에 따라 점차 그 관심은 줄어들게 되었다.

TFT-LCD 타입의 플렉서블 디스플레이의 경우 패널 내에 존재하는 구동 소자의 종류에 따라 보다 세분화되어질 수 있다. 현재 상용화되어 있는 LCD 모니터, LCD TV 등에 사용되고 있는 a-Si TFT와 Poly-Si TFT, 그리고 유기 반도체를 이용한 OTFT, 마지막으로 산화물 반도체를 이용한 Oxide TFT 등으로 분류할 수 있다.

앞서 언급했듯이 초기의 플렉서블 LCD는 TFT를 포함하지 않은 수동구동 혹은 Segment 타입이 주를 이루었다. 하지만 TFT를 구동 소자로 이용한 TFT-LCD 기술이 진보되고, 사용자도 보다 고휘질, 고해상도의 디스플레이를 요구하게 되면서 플렉서블 LCD도 점차 TFT를 포함한 형태로 발전하게 되었다. 플렉서블 TFT-LCD의 핵심 기술 중 하나는 저온에서(200°C 이하) 고분자 기판 상에 TFT를 형성하는 기술인데, a-Si:H TFT의 경우



〈그림 2〉 삼성전사에서 개발한 7인치급 a-Si:H TFT 기반의 플렉서블 TFT-LCD

공정온도가 보통 350°C 이상이어서 내열온도가 대부분 200°C 미만인 고분자 필름 기판에는 적용하기가 힘든 기술이었다. 이런 이유로 200°C 미만에서 a-Si:H TFT를 형성할 수 있는 저온 공정에 대한 연구가 집중적으로 이루어졌고, 결과적으로 〈그림 2〉와 같이 고분자 기판을 이용한 플렉서블 TFT-LCD 시제품 개발이 가능케 되었다.

a-Si TFT 기술은 이미 기술 성숙도에 있어 다른 기술보다 우위에 있다고 할 수 있으나 현재로서는 플렉서블 디스플레이에 적용하기에는 다소 어려운 점이 있다. 이는 a-Si TFT의 성능이 poly-Si TFT에 비해 매우 뒤떨어지고 최근에 발표되고 있는 OTFT나 Oxide TFT 비해 그 성능이 뒤떨어지기 때문이다. 또한 a-Si TFT 기술은 그 성능에 비해 상대적으로 많은 공정 과정과 고가의 진공 장비가 필요하며 고분자 기판과 무기물의 열적 특성 차이에서 나타나는 잔류 응력 및 구분된 상태에서 발생하는 외부 스트레스에 대한 응력에 대한 영향이 크기 때문에 상용화를 위해서는 이를 극복할 기술이 필요하다.

a-Si:H TFT 이외에 다결정 실리콘을 이용한 LTPS TFT 기반의 플렉서블 LCD에 대한 연구도 활발히 이루어졌다. LTPS TFT 기술은 고분자 혹은

은 Steel Foil 기판 상에 Excimer Laser Annealing 등의 방법을 이용하여 고성능의 Poly-Si TFT를 제작하는 방법으로서 이 기술의 가장 큰 장점으로는 패널 상에 주변 구동회로를 집적시킴으로서 향후 System on Panel(SOP) 구현이 가능하다는 것이다. 구동회로를 내장하게 되면 패널 주변에 별도의 Driver IC를 장착할 필요가 없기 때문에 기계적인 유연성이 좋아진다는 장점이 있다.

최근의 추세는 고분자 기판 상에 직접 LTPS TFT를 제작하는 기술과 유리 기판을 이용한 Transfer 기술이 차세대 기술로 대두되고 있다. Transfer 기술을 이용한 플렉서블 LTPS TFT 제작 기술에 있어서는 Sony, Seiko-Epson 등이 우수한 기술을 확보하고 있다. LTPS TFT 기술을 적용할 경우 상기에서 언급한 것처럼 패널 상에 구동 회로를 실장할 수 있기 때문에 한 차원 높은 수준의 플렉서블 디스플레이를 구현할 수 있다. 이 기술의 핵심은 유리 기판 상에 제작한 패널을 고분자 기판으로 transfer하는 기술인데, Sony에서는 유리 기판에 제작된 패널을 우선 다른 기판에 접착제로 붙인 후 유리 기판을 식각하고 다시 고분자 기판에 접착하는 방식을 사용하고 있으며, Seiko-

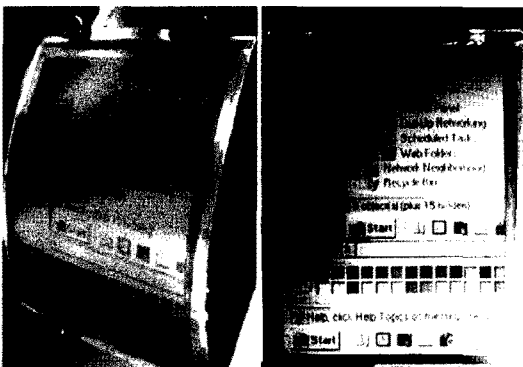
Epson에서는 XeCl laser를 이용한 SUFTLA[®] (Surface Free Technology by Laser Ablation/Annealing) 방식을 채택하고 있다. <그림 3>에서는 LTPS TFT 기반의 플렉서블 LCD의 시제품을 보여주고 있다.

하지만 LCD 모드를 채택한 플렉서블 디스플레이의 상용화는 현재 다소 지연되고 있는 상황이다. 이는 LCD가 자체발광형의 디스플레이가 아니기 때문에 상부 혹은 하부에서 별도의 광원이 요구되고 또한 패널이 휘어질 경우 액정의 흐름으로 인해 화질의 저하가 발생하여 상용화를 위해서는 이와 같은 문제점들을 반드시 해결해야 하는 과제를 안고 있다.

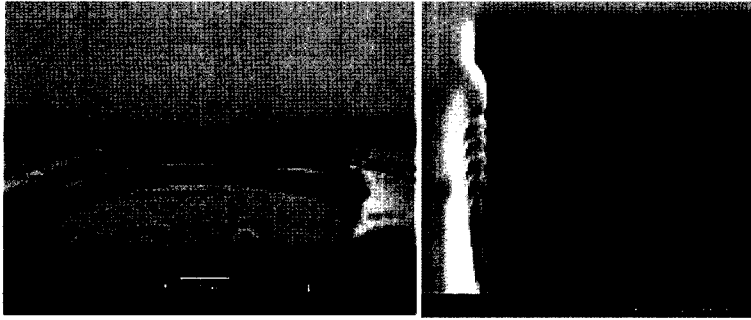
2. Organic Light-Emitting Diode

OLED를 이용한 플렉서블 디스플레이는 LCD와는 달리 자체 발광형으로 별도의 백라이트가 필요 없고, 또한 고휘도의 디스플레이 구현이 가능하기 때문에 기계적으로 유연한 특성을 유지해야 하는 플렉서블 디스플레이에 있어 LCD보다 훨씬 더 적합한 기술이라 할 수 있다. 현재 OLED를 플렉서블 디스플레이로 적용하는데 있어 가장 큰 이슈로 떠오르고 있는 것은 수분 및 산소를 효과적으로 차단할 수 있는 가스 차단막 제작 기술과 또한 능동 구동형 OLED에 필요한 Backplane의 개발이다.

OLED의 경우 대부분의 구성이 유기 물질로 이루어져 있고 이런 유기 물질들은 수분 및 산소에 대한 노출에 매우 취약한 특성을 가지고 있다. 투습율의 경우 OLED는 약 $10^{-5} \text{ g/m}^2 \cdot \text{day}$ 이하의 매우 높은 특성을 요구하고 있다. 대부분의 고분자 기판이 $10 \text{ g/m}^2 \cdot \text{day}$ 이상의 투습율을 가지고 있기 때문에 이와 같은 요구 조건을 만족시키기 위해 고분자 기판 상에 다양한 구조와 재료로 형



<그림 3> LTPS TFT 기술을 이용한 플렉서블 TFT-LCD (Sony)



〈그림 4〉 Vitex의 다층 구조형 가스 차단막의 구조

성된 가스 차단막에 대한 연구가 기관 개발 회사들을 중심으로 진행되고 있다.

고분자 기관용 가스 차단막과 관련해서는 미국 Vitex에서 제안한 유기물과 무기물이 교차된 형태의 다층 구조에 대한 연구를 2000년 초기부터 발표하기 시작했으며 이 분야에 대한 원천 특허를 다수 확보하고 있다. Vitex는 독창적인 구조와 우수한 특성을 갖는 박막 형성 기술을 개발했으며, 현재 고분자 기관의 가스 차단막뿐만 아니라 플렉서블 OLED의 보호막으로도 개발 중에 있다. 현재 가스 차단막이 형성된 고분자 기관의 수분 투과율은 $10^{-5} \sim 10^{-7} \text{ g/m}^2 \cdot \text{day}$ 정도로 발표되고 있으나 다층의 구조를 사용하기 때문에 기계적인 안정성 면에서는 아직 해결해야 할 문제점들이 남아 있는 것으로 알려져 있다.

이외에도 독일의 Fraunhofer 연구소 산하 Institut Silicatforschung(ISC)에서 개발한 silicone, organic, ceramic의 composite으로 이루어진 하이브리드 형태의 ORMOCER[®]s도 우수한 가스 차단 특성을 나타내는 것으로 알려져 있다. 알려진 바에 의하면 SiO_2 , Al_2O_3 등의 산화물과 함께 2층 혹은 4층의 다층 구조로 형성했을 경우 수분 투과율이 $10^{-5} \text{ g/m}^2 \cdot \text{day}$ 정도로 매우 우수한 특성을 나타내었다.



〈그림 5〉 LG Philips LCD에서 개발한 능동구동형 플렉서블 OLED

능동구동형 OLED를 위한 능동소자 개발에 있어서는 a-Si:H TFT, 다결정 실리콘을 이용한 LTPS TFT가 유력시 되고 있지만 고분자 기관을 이용하기 때문에 높은 공정 온도 등 TFT 제조시 발생하는 문제점들을 해결해야 한다. 하지만 OLED의 경우 구조에 따라서 Top emission, Bottom emission이 가능하기 때문에 고분자 기관 대신에 불투명한 Steel foil을 사용할 수 있다. Steel foil의 경우 고분자 기관과는 달리 1000°C 이상의 고온에서도 견딜 수 있으며 열팽창계수도 매우 작아 LTPS TFT를 이용한 플렉서블 OLED 개발이 가능하다<그림 5>. 하지만 Steel foil의 경우 표면이 매우 불균일하여 공정 전에 기관 표면을 CMP



〈그림 6〉 Sony의 2.5인치급 OTFT 기반 플렉서블 OLED

로 처리해줘야 한다는 단점을 안고 있어 향후 양산화에 있어서 해결해야 하는 과제로 남아 있다.

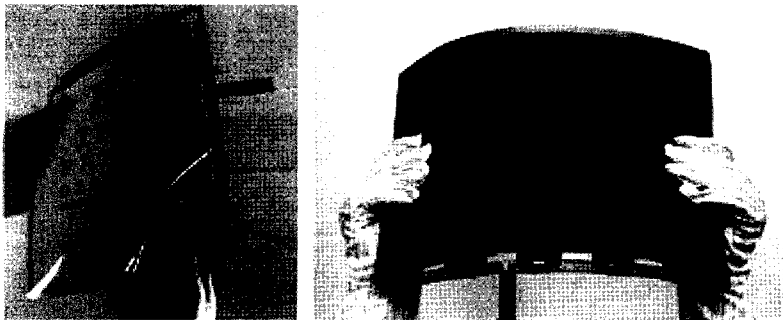
최근에는 공정이 복잡하고 높은 공정 온도를 요구하는 실리콘 기반의 TFT 대신 유기 반도체를 이용한 OTFT를 이용하여 능동구동형 OLED를 구현하는 기술이 각광받고 있으며, 미국의 Penn. State University (PSU), 일본의 NHK 방송기술연구소, Sony 등에서 연구를 진행되고 있다. 특히 Sony에서는 <그림 6>에서처럼 Pentacene OTFT를 이용한 2.5인치급 플렉서블 OLED를 개발, 시연한 바가 있다.

하지만 OTFT 기반의 플렉서블 OLED의 경우, 상용화를 위해서는 아직 신뢰성 등 여러 가지 해

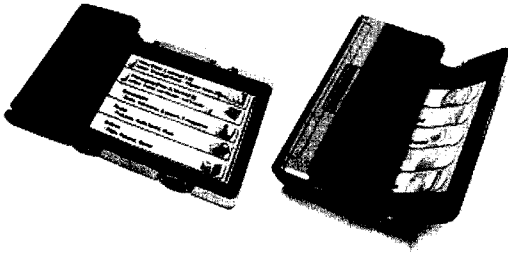
결해야만 하는 문제점들을 가지고 있어서 최근에는 저온 공정이 가능하고 우수한 전기적 특성을 가진 산화물 반도체 기반의 Oxide TFT 기반의 플렉서블 OLED에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있는 상황이다.

3. E-Paper

E-Paper 기술의 장점은 전자 디스플레이의 특성을 지니면서도 기존의 종이와 유사한 특성을 가지고 있기 때문에 향후 이를 이용한 E-Book, Price Tag, 광고판 등에 사용될 가능성이 매우 높다. 현재 개발되고 있는 E-Paper 기술은 Electrophoretic, Electrochromic, PDLC, Cholesteric 등이 있으나 아직까지 LCD나 OLED처럼 완벽한 색재현성 및 빠른 응답속도 등의 구현이 어렵다. 그러나 E-Paper 기술은 다른 디스플레이 기술에 비해 저가격화 및 박형화, 안정성 등이 뛰어나기 때문에 향후 이 기술을 응용한 제품 개발이 가속화 될 것으로 기대되고 있다. 특히 입자를 기반으로 하는 E-Paper 기술은 TFT가 필요 없는 구조도 가능하며 TFT가 필요한 경우더라도 LCD나 OLED처럼 높은 수준의 전기적 특성을 요구하지 않기 때문에 현재 개발된 기술로 상용화하기에 가장 적합한 기



〈그림 7〉 E-Ink를 이용한 B/W 및 Color 형태의 E-Paper 시제품



〈그림 8〉 Polymer Vision의 E-Ink를 이용한 E-Paper 시제품

술이라고 할 수 있다. 최근에는 흑백 모드뿐만 아니라 컬러 필터나 색을 입힌 입자를 이용한 풀컬러 E-Paper에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며 이와 더불어 구동 전압을 낮추고 신뢰성을 높이기 위한 연구도 많이 진행되고 있다.

다양한 디스플레이 모드를 채택한 플렉서블 디스플레이 중에서 E-Ink를 기반으로 한 E-Paper가 가장 빨리 상용화될 것으로 예측되고 있으며 빠르면 2009년에 상용화된 제품을 볼 수 있을 것으로 발표되고 있다. 〈그림 8〉에서는 최근 Polymer Vision에서 개발하고 상용화를 준비 중인 접는 형태의 E-Paper 시제품을 보여주고 있다. 그림처럼 E-Ink를 디스플레이 모드로 채택한 이 제품은 두 번 정도 접는 것이 가능하며 해상도도 QVGA급 이상으로 다양한 응용분야로 확대가 가능한 기술이다.

III. 결론

이처럼 LCD, OLED, E-Paper 기술을 이용한 플렉서블 디스플레이는 현재 여러 가지 형태로 발전하고 있는 상황이다. 특히 E-Paper 형태의 플렉서블 디스플레이는 향후 1~2년 이내에 구체적인 시장이 형성될 것으로 기대되고 있으며, LCD,

OLED 형태의 플렉서블 디스플레이도 관련 기술이 확보되는 대로 바로 시장에 투입될 것으로 전망되고 있다.

참고문헌

- [1] Y. H. Kim, S. K. Pa가, D. G. Moon, W. K. Kim and J. I. Han, "Organic Thin Film Transistor-Driven Liquid Crystal Displays on Flexible Polymer Substrate", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 43, 6A, 3605, June, 2004.
- [2] A. Sugimoto, H. Ochi, S. Fujimura, A. Yoshida, T. Miyadera and M. Tsuchida, "Flexible OLED Displays Using Plastic Substrates", *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electronics*, 10, 1, January/February, 2004.
- [3] J.-K. Lee, C.-D. Kim, I. Kang, I.-J. Chung, "A Flexible Color A4 Size e-Paper Fabricated on a Thin Metal Foil", *Proceeding of The 14th International Display Workshops*, 1291, December, 2007.
- [4] S. K. Park, D. A. Mouery, I. Kim, D. Zhao, S. Subramanian, J. E. Anthony, and T. N. Jackson, "F-TES ADT organic integrated circuits on glass and plastic substrates" *International Electronic Device Meeting (IEDM)*, Washington, D.C., p.225, USA, 2007, D. J. Gundlach, J. E. Royerl, S. K. Park, "Contact induced crystallinity for high performance soluble acene-based TFTs and circuits", *nature materials*, 7, 216, 2008,
- [5] J. K. Jeong, D. U. Jin, H. S. Shin, H. J. Lee, M. Kim, T. K. Ahn, J. Lee, Y. G. Mo and H. K. Chung, "Flexible Full-Color AMOLED on Ultrathin Metal Foil", *IEEE Elec. Dev. Lett.*, 28, 5, 389, May, 2007.

- [6] I. Yagi, N. Hirai, M. Noda, A. Imaoka, Y. Miyamoto, N. Yoneya, K. Nomoto, J. Kasahara, A. Yumoto and T. Urabe, "A Full-Color, Top-Emission AM-OLED Display Driven by OTFTs", SID '07 Digest, 38, 1753, May, 2007.
- [7] H. N. Lee, J. Kyung, S. K. Kang, D. Y. Kim, M. C. Sung, S. J. Kim, C. N. Kim, H. G. Kim and S. T. Kim, "3.5 Inch QCIF+ AM-OLED Panel Based on Oxide TFT Backplane", SID '07 Digest, 38, 1826, May, 2007.

저자소개



김영훈

1999년 서울대학교 재료공학부 학사
 2001년 서울대학교 재료공학부 석사
 2001년-현재 전자부품연구원 선임연구원

주관심 분야 : 플렉서블 디스플레이, 박막 트랜지스터, 태양전지



김순형

2001년 광주대학교 전자공학과 학사
 2004년 한양대학교 재료공학부 석사
 2001년-2002년 하이닉스반도체
 2004년-2007년 LG전자 주임연구원
 2007년-현재 전자부품연구원 선임연구원

저자소개



박성규

1991년 경희대학교 전자공학과 학사
 1995년 경희대학교 전자공학과 석사
 2007년 The Pennsylvania State University, Electronic Materials and Devices, 박사
 1997년-2003년 전자부품연구원 선임연구원
 2007년-2008년 Eastman Kodak (U.S.A)
 2008년-현재 전자부품연구원 책임연구원

주관심 분야 : Flexible Printing Devices, Organic Electronics, Metal Oxide Devices, Flat Panel Displays



김원근

1986년 고려대학교 금속공학과 학사
 1989년-1995년 삼성전자 반도체연구소 연구원
 1996년-현재 전자부품연구원 수석연구원



한정인

1983년 연세대학교 금속공학과 학사
 1985년 한국과학기술원 재료공학과 석사
 1989년 한국과학기술원 재료공학과 박사
 1989년-1992년 삼성전자 반도체연구소 선임연구원
 1992년-현재 전자부품연구원 수석연구원