

Backplanes for Flexible Displays

최운섭 (호서대학교)

I. 서론

우리의 미래는 어떠한 환경 하에 있을까를 기대하는 것은 유익할 수 있다. 그것은 지금과 미래에 대한 적극적인 의지와 도전에 대한 기대 속에 살게하기 때문이다. 지금의 시대는 IT 시대라 말하는데 이는 주변의 많은 사물들이 IT 기반의 제품에 둘러 있는 환경 하에 살고 있기 때문이다. 이동통신 기기를 비롯한 모든 제품이 그러하다. 과거에는 자동차는 기계산업의 꽃으로 불리어졌다. 지금의 자동차를 보자 현재의 자동차는 기계가 차지하는 비중보다 전자관련 부품들이 차지하는 비중이 보다 많아지는 추세이다. 또한 새롭게 등장하는 모든 기능들이 전자관련 제품에 의해 고급화되어 가고 있다. 디스플레이를 보면 과거에는 극히 제한적인 부분에서의 숫자나 속도 등의 표시하는 정도 이었으나 이제는 네비게이션과 DMB의 등장으로 또한 더 나아가 각종 정보를 표시하는 계기판들의 디스플레이화가 진행되고 있다. 향후에 자동차 앞 유리가 스크린으로 변화되고 속도가 표시되며, 내부의 앞면 콘솔에 디스플레이의 장착으로 모든 정보를 이용하고 무선 인터넷등으로 가공이 된다면 자동차는 움직이는 디스플레이로 거듭날 것이다. 그렇다면 자동차를 기계산업이라 불리기는 쉽지 않을 것이다. 우리가 사용하는 휴대폰도 어떠한지 예측해 볼 수 있다. 불과 10년전만 하여도 우리는 군대에서 사용하는 무선기수준의 전화기로 통화 하였으나 지금은 너무나 작고, 카메라 기능과 지상파TV의 시청이 실시간 이루어지는 놀라운 디스플레이기기로 변신하였다. 미래의 디스플레이에 대한 노무라의 보고에 따르면 미래를 이끌어갈 디스플레이로는 flexible display, 3D display, high density/reality display, wearable display, large display등을 제시하였으며, 그중에 flexible display가 가장 시장과 성장에 가장 유망한 것으로 예측하였다. 영화 '마이 너리트리포트'에 소개되었던 수많은 디스플레이들이 현실이 되는 시대가 올 것이다. flexible e-newspaper로 각종 정보가 실시간 방송되고, 공중에 투명디스플레이를 펼쳐가며 빈 공간에 임의의 표시소자를 구현하여 작업을 수행하는 일과, 무거운 책 대신 e-paper로 구성된 e-book으로 필요한

책을 가지고 다닐 수 있는 손안의 작은 도서관이 등장 할 수 있다면 우리의 미래는 정말 멋지지 않을까? 이들을 실현시킬 수 있는 핵심소재인 디스플레이용 backplane에 대하여 생각해 보고자 한다.

Flexible display는 여러 구성요소로 되어 있다. 아래층에 기판이 있고 그 위에 display의 구동을 위한 소자가 있고 구동소자위에는 표시를 나타내는 디스플레이가 있다. 또한 그 위를 덮는 상판층과 보호층이 필요하다. 각종 표시장치로는 LCD, OLED, e-paper가 가능하리라 여겨진다. 이들을 유연성디스플레이로 구현하기 위해서는 공통적으로 해결해야 할 선결과제가 있는데 이는 기판과 구동소자이다. 유연성 기판으로는 plastic과 stainless steel(SUS)를 사용하며 plastic substrate의 경우에는 barrier coating이 반드시 필요하다. 또한 온도특성과 dimensional stability가 매우 중요하다. SUS의 경우에는 표면의 평활화 공정이 반드시 필요하다. 온도에 대해서는 plastic 기판의 공정온도가 200°C 또는 150°C 이하가 되면 좋고, SUS의 경우는 온도에 대한 제한 보다 유연성의 한계가 있다. 표시소자를 살펴보면 LCD의 경우에는 유연성디스플레이로 구현하기 위해 선결되어야 할 것으로는 유연성을 가지는 BLU, 액정의 굴곡에 따른 원하는 편광이 가능한지 등에 따른 빛의 조절, 그에 따른 시야각등의 과제가 있다. 이 display의 경우에는 기판의 유연성과 투습/투습 특성은 현재의 기술 수준으로도 큰 어려움이 없다. e-paper의 경우에는 기판의 유연성과 투습/투습성은 문제가 아니지만 passive display가 아닌 active로의 구동을 위해 TFT를 써야 하면, 그에 따른 동화상과 color의 구현이 과제이다. 그렇지 않으면 저해상도의 저가 display로의 용도로만 개발이 되기 때문이다. OLED display의 경우에는 이론적으로 flexible display의 구현이 가장 용이할 수 있는 유기 display이지만 display로서의 기술자체 보다는 기판의 투습과 투습성이 매우 중요한 문제로 등장하게 된다. 또한 표시소자의 encapsulation을 위한 thin film 형태의 봉지재료와 장치의 개발이 중요하다. 이상에서 보듯이 flexible display를 고해상도와 동화상이 가능하게 표현하기 위해서는 TFT가 필수이고, 그에 따른 유연성을 가지는 기판상에 유연한 TFT를 개발하여야 가능하다.

II. 유연성을 위한 TFT기술

1. a-Si 기반의 유연성 TFT 기술

a-Si는 현재 TFT-LCD에 사용하는 구동소자로서 이미 8세대 mother glass까지 양산이 이루어지고 있다. 따라서 이러한 기술을 flexible display에 적용할 수 있다면 가장 바람직한 경우가 될 것이다. 따라서 초기에는 이러한 목적을 가지고 양산중인 a-Si TFT 기술을 기반으로 한 flexible display 연구가 주류를 이루었으며, 관련부분에 대한 디스플레이 핵심 기술들이 2000년대 중반부터 기업을 중심으로 이루어져 왔다. 그러나 여기서 간과해서는 안되는 것은 어디에 target을 갖느냐가 기술개발의 중요한 관점이 된다는 것이다. 곧 현재 개발하는 기술의 killer application을 추구할 수 있는 기술이 되어야 한다는 것이다.

Waterloo 대학과 Ignis가 공동으로 a-Si를 plastic 기판 위에 150°C 가 적용가능한 저온공정기술을 개발하였다. 이들은 plastic 기판의 barrier layer로서 SiNx를 passivation 시켜 기판에서의 barrier 특성을 확보한 후에 그 위에 저온공정의 a-Si TFT를 제조하였다. 이들은 on-off ratio 10^9 , V_t 1.5V, subthreshold slope 0.3V/dec, mobility $1.1\text{cm}^2/\text{Vs}$, leakage current fA의 특성을 가지는 유연성기판상의 TFT를 제작하였다. (Fig. 1) Honeywell도 150°C 공정으로 plastic 기판에 a-Si TFT pixel circuit를 PEN 상에 만들어 단색으로서 R, G, B color를 구현하였다. 이들은 channel passivated type inverted staggered type TFT를 제작하여 OLED에 적용을 시도하였다. 삼성전자는 PES 기판을 사용하여 130°C 공정으로 a-Si TFT를 자사의 pilotline에서 제작하였다. 기판의 전처리를 180°C에서 24시간 시행하여 기판수축과 치수안정성의 문제를 해결하였다. 증착은 각 층에 필요한 절연체, 반도체, doping 층 등 모든 공정을 PECVD 130°C에서 실시하였다. 그 특성이 이동도 $0.3\sim 0.4\text{cm}^2/\text{Vs}$, 문턱전압 3.7V, off current 10^{-13} 이하의 우수한 특성을 확보하여 400×300 pixel(100ppi) 5" plastic LCD를 제작하였다.(Fig. 2) 최근에 Philips의 French 등은 EPLaR(Electronics on

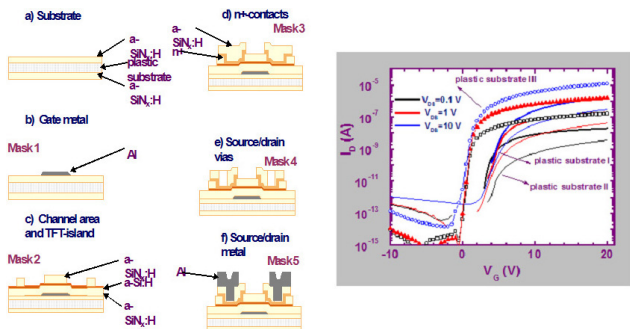


Fig. 1 a-Si TFT on Plastic at 150°C process by Waterloo U/Ignis

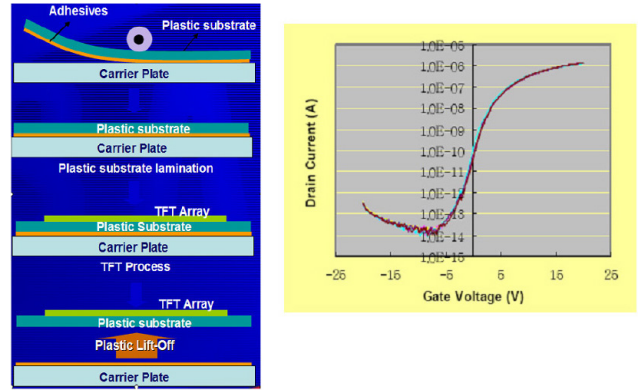


Fig. 2 a-Si process and TFT transfer characteristics on PES by Samsung Electronic

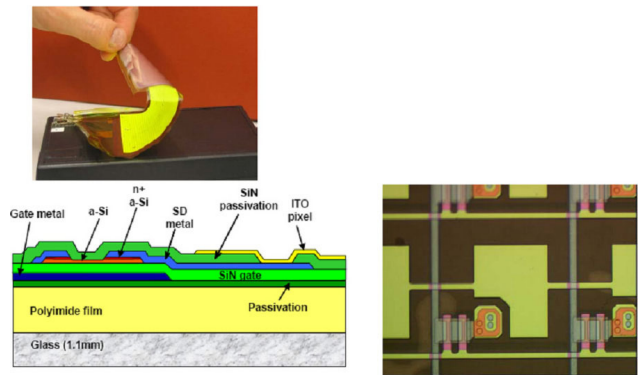


Fig. 3 EPLaR a-Si Process 6x8cm OLED lamp, pixel pitch 200um by Philips

Plastics by Laser Release)라는 공정을 개발하였다. 이공정은 기존의 LCD line을 그대로 활용할 수 있는 것으로 기판으로는 내열성이 우수한 polyimide를 사용하였으며 약 $200\mu\text{m}$ 의 pixel을 가지는 electrophoretic display를 plastic 위에 구현하였다.(Fig. 3)

2. LTPS 기반의 유연성 TFT 기술

LTPS를 plastic에 구현하기 위하여 2000년대 초부터 여러 가지 기술들이 등장하였다. 그중에 몇 가지의 기술을 살펴 본다. Flexible IC라는 미국의 실리콘밸리에 있는 회사에서는 glass 위에 접착제를 사용하여 plastic 기판을 부착시키고 그 위에 barrier층을 coating 한 다음 barrier 위로 TFT를 증착하는 것으로 plastic 기판에서 glass를 분리시킨 후에 metal 공정과 그 이후의 공정을 수행한다. 이들은 6" NMOS와 PMOS를 각각 제조하였다 보고하였는데, NMOS의 이동도는 $250\text{cm}^2/\text{Vs}$, V_{th} 는 -5.5V , subthreshold slope 0.5V/dec로 매우 우수한 data를 보고하였으나 그 이후의 진전을 보고하지 못한 것 같다. 한편 이들이 사용한 lamination-delamination 기술에는 몇 가지 문제점이 있다. 곧, uniformity, surface roughness, adhesion, plastic deformation and dimensional control, delami-

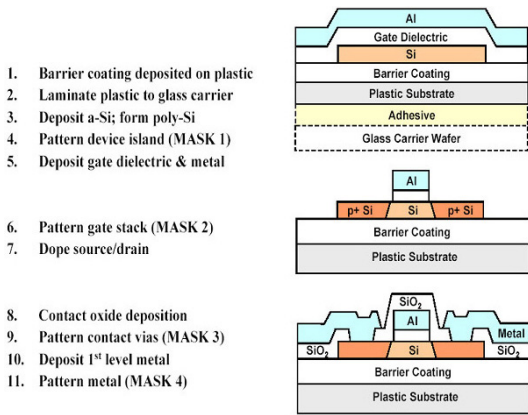


Fig. 4 LTPS on Plastic using lamination-delamination process by FlexIC

nation ease and contamination, lamination 재료의 litho 및 solvent 저항성등이 개선의 여지가 있는 부분이다.(Fig. 4) Lehigh 대학과 Sharp는 plastic이 아닌 metal foil을 처음으로 사용하여 LTPS TFT를 제작하였다. 100 μ m의 SUS의 표면을 평탄화시켜 15nm 이하의 표면 균일도를 얻었고 4"급의 60 \times 80 pixels을 만들어 CMOS TFT circuit로서 PLED의 구현을 시도하였다. 증착방법으로는 PECVD 방법과 thermal evaporation 방법을 사용하여 이동도 87~200cm²/Vs, 110~130cm²/Vs을 각각 얻었다. Sony 또한 이 분야에 대한 연구를 실시하여 몇 가지 유용한 결과를 내었다. 이들은 glass 위에 etch stopper를 올리고 그 위에 LTPS 기반의 TFT를 제작한 후에 제거가 가능한 glue를 임시기판을 붙인다. 이 공정이후에 HF를 사용하여 glass를 제거하고 etch stopper를 제거한 후에 그 위에 plastic 기판을 접착제로 붙인 다음 상부에 있는 removable glue를 제거하는 조금 복잡한 방법이다. 이 기술로 300 \times 300 LTPS TFT pixel을 제작하였다.(Fig. 5) 한편 Seiko-Epson에서도 유사한 transfer 기술 SUFTLA(surface free technology by laser annealing) 이용하여 LTPS TFT를 제조하여 발표하였다. 이 공정은 quartz 기판 위에 희생층으로서 a-Si layer를 올리고 그 위에 TFT를 제작한다. p-channel과 n-channel을 형성한 후에 수용성의 접착층을 도포하고

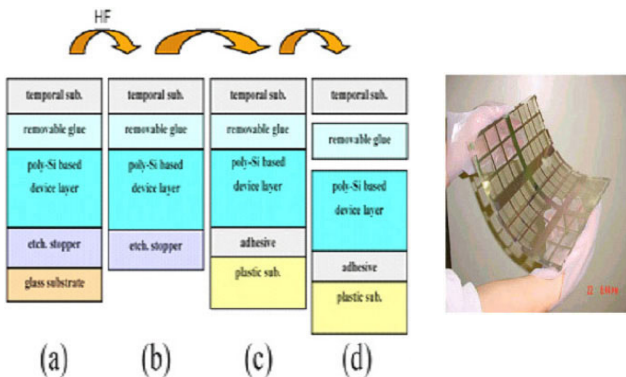


Fig. 5 Transfer process for LTPS on plastic by Sony

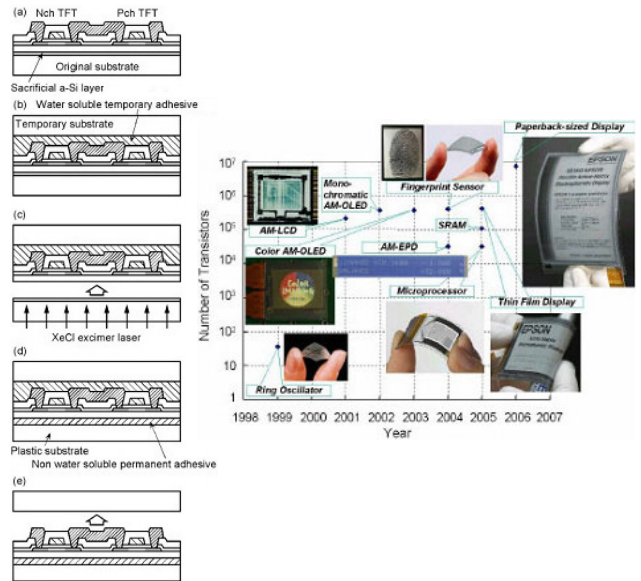


Fig. 6 SUFTLA Process for flexible array & display applications by Seiko-Epson

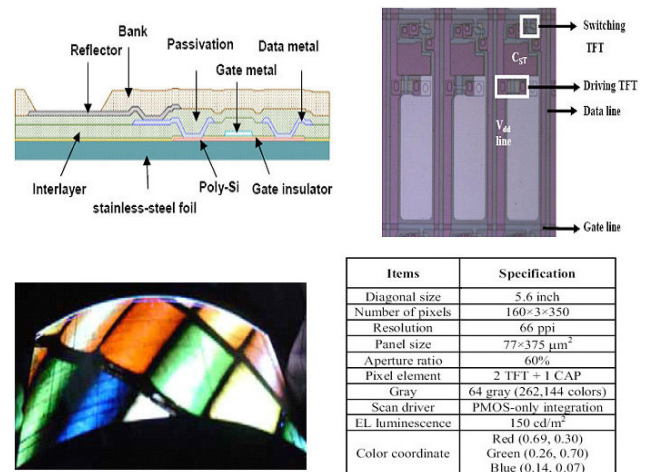


Fig. 7 LTPS for AMOLED on SUS by Samsung SDI

최상층으로 임시기판을 놓는다. TFT 기판의 뒤로 excimer laser를 조사하여 희생층과 TFT를 분리시킨다. 분리된 곳으로 plastic 기판을 접착제로 접합시킨 후에 수용성 접착제와 임시기판을 제거하는 공정이다. 제작된 array는 428 \times 238 pixel이고 그 각각의 크기는 34 \times 46 μ m로 all plastic substrate LCD와 OLED를 제작하였다.(Fig. 6) 삼성SDI와 PARC에서도 SUS 기판위에 평활층을 만들어 LTPS를 구현하였다. 삼성SDI는 160 \times 350을 가지는 5.6" 66ppi, PMOS intergrated 된 기판을 SUS 위에 개발하여 OLED를 구현하였다.(Fig. 7)

3. Oxide 반도체 기반의 유연성 TFT 기술

최근에 일본의 Hosono group에서 Nature에 oxide TFT

를 발표함으로써 촉발된 산화물박막트랜지스터의 연구가 최근에 가장 활발하다고 이야기 할 수 있다. 특히 생산을 위한 연구와 개발은 국내의 삼성과 LG에서 단연 두각을 나타내고 있으며, ETRI와 대학등을 중심으로 광범위한 연구가 진행되고 있다. 다양한 반도체성상이 있으나 주로 $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ (IGZO)에 근거한 연구로 치중되고 있다. Oxide TFT가 각광을 받는 이유는 amorphous에 따른 우수한 전기적특성, wide band gap에 의한 투명소자의 구현 가능성, post oxidation 미발생으로 소자특성의 변화가 적음, 저온공정이 가능하기에 flexible display용 기판에서의 적용 등이 이유가 될 수 있기 때문이다. 한편, 이들 oxide TFT는 ZnO를 근간으로 다양한 3성분계와 4성분계의 산화물 반도체가 존재한다. 이들은 다양한 defect가 내부에 존재하기에 이들의 영향으로 n-type conductivity를 나타낸다. 즉 zinc interstitial, oxygen vacancy, hydrogen 등의 생성과 이동에 의한 영향이 소자의 특성에 매우 민감하기에 이들에 의한 carrier control과 stability 연구가 매우 중요하다. 또한 oxide TFT에 doping을 하여 p-type conductivity를 부여 할 수는 있으나 p-type 특성을 얻기가 용의하지 않고 또한 경시변화에 의해 n-type으로 회귀한다. Oxide TFT로는 4성분계(quarterary) oxide semiconductor가 가장 활발하여 비정질 IGZO($\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$)의 연구개발인데, 이 원천특허는 Hosono 가 갖고 있다.

2004년도 일본의 Hosono는 a-IGZO와 Y_2O_3 gate oxide를 이용하여 PET위에 산화물소자의 형성을 보고하였다. (Fig. 8) 이후 일본의 Casio와 Koich 대학에서 ZnO를 이용한 LCD를 제작하였고, Toppan Printing은 IGZO를 이용한 e-paper를 제작하였다. 2007년에 한국의 LG전자에서는 a-IGZO를 SUS기판에 제작하여 flexible AMOLED를 구현하였다.(Fig. 9) 이들은 SUS 기판을 표면처리하여 표면의 평활도를 높이고 top gate 구조의 TFT를 만들어 passivation을 한 후에 유기물을 증착시키고 plastic barrier film으로 encapsulation 한 후에 top emission type 3.5" AMOLED display를 구현시켰다. IMID 2007에 발표하였으며 SUS 위의 산화물 반도체의 특성은 유리기판의 경우와 유사한 특성을 나타내었다. 같은 해에 삼성SDI에서도 SUS foil을 사용한 flexible OLED를 발표하였다.

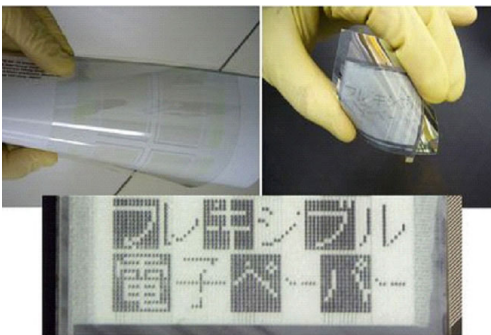


Fig. 8 IGZO TFT & e-paper application on PEN by Hosono Group

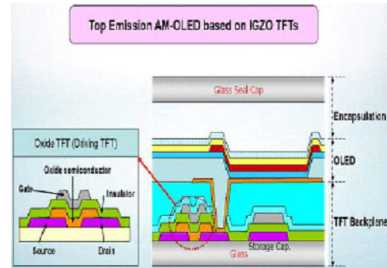


Fig. 9 IGZO TFT & AMOLED application on SUS by LG Electronics

4. 유기 반도체 기반의 유연성 TFT 기술 (Printed Electronics)

기존의 실리콘반도체를 대신해 유기반도체를 사용한 유기 전자소자는 공정의 간단함과 대면적의 가능성, 유연성의 부가, roll-to-roll 공정에 의한 저가격화 등의 가능성을 가지고 개발 중에 있다. 기존의 유기반도체 (OTFT)로서 flexible display를 구현하기 위한 유기반도체 소재로는 저분자인 pentacene과 고분자인 poly-3-hexylthiophene 등이 있다. 삼성전자는 pentacene을 사용하여 15" OTFT array를 제작하였다. 이동도가 $7\text{cm}^2/\text{Vs}$, on-off 10^6 의 결과로 LCD를 구현하였다. 이는 증착공정을 이용한 것이다. 그러나 최근에 pentacene을 soluble precursor로 만들어 solution process를 진행하는 추세에 있다. 이렇게 제작된 soluble process를 하여 그 결과 이동도가 $0.13\sim 1.0\text{cm}^2/\text{Vs}$, on-off는 10^5 이상의 양호한 유연성 TFT를 제작하였다. polymer 계열의 유기반도체의 경우에는 아직 pentacene 계열에 비해 그 특성이 낮다. 이들의 사용은 공정의 변화를 가져오고, 또한 물성과 적용 분야의 다양성을 예측할 수도 있다. 최근에 각광을 받는 용액공정이 가능한 반도체를 사용한 인쇄형전자제품의 개발이 크게 주목을 받고 있다. 이때 사용하는 주요 기술로는 화소형성을 위한 미세패터닝 공정으로서, inkjet, gravure, flexo, offset 그리고 imprinting 기술 등이 있다. printed electronics란, 프린팅 공정기법으로 만들어진 전자 소자 혹은 전자 제품을 의미하며, 이러한 printed electronics 제품으로는 2차원 3차원 형상의 프린팅 패턴과 구조체, 이를 기능성 잉크로 프린팅한, 도선, 저항, 캐패시터, 인덕터 등의 수동소자, TFT 등의 능동 소자가 있으며, 이들의 집합체로 이루어진, RFID tag, e-paper, flexible display, solar cell, printed sensor 등이 있다.

1995년도 프린스턴대학의 Chou가 제안한 nano imprinting lithography 공정과 텍사스대학의 Williams 교수가 제안한 UV를 이용한 step and imprint lithography 등이 소개 되었다. 이들 공정은 thermal imprinting 기술, UV nanoimprinting 기술, μ -contact imprinting 기술 등 다양하게 개발이 진행되고 있다.(Fig. 10, Fig. 11) 미국의 NIST, ATP, Dupont, Sarnoff, Lucent등의 콘소시움에서 개발한 thermal multilayer printing 기술은 OLED display용의 OTFT backplane을 만드는 것이다. 이동도는 $1\text{cm}^2/\text{Vs}$, on-off ratio 10^5 , operating voltage -25V , drain current $2\mu\text{A}$ drive circuit, breakdown voltage 30V , printing process에 의한 $10\mu\text{m}$ 의 line width를 구현한다. PARC 에서는 digital lithography와 additive printing을 이용한 OTFT array의 개발로 기존의 lithography 공정에 비해 digital lithography의 경우에는 PR(광광성수지)을 이용한 노광의 사진공정 없이 mask를 jet printing에 의해 바로 기판에 형성시키고 식각공정과 strip 공정을 통하여 pattern이 바로 형성되는 공정이다. 비교되는 기존의 lithography 공정보다 2단계를 줄일 수 있다. 이 기술로

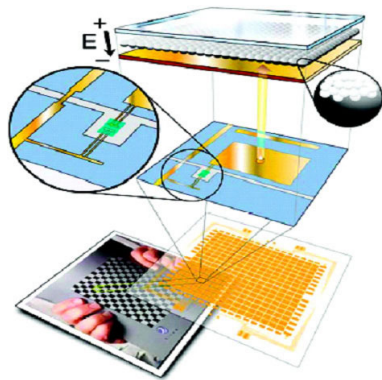


Fig. 10 Scheme of printing TFT for e-Paper

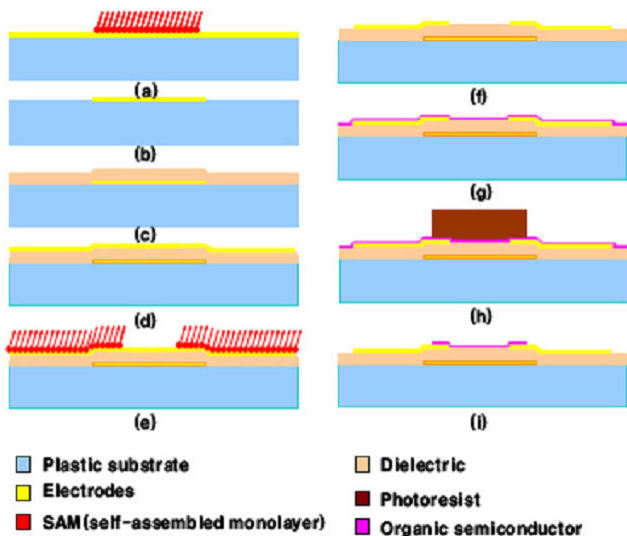


Fig. 11 μCP (μ contact printing) by KIMM

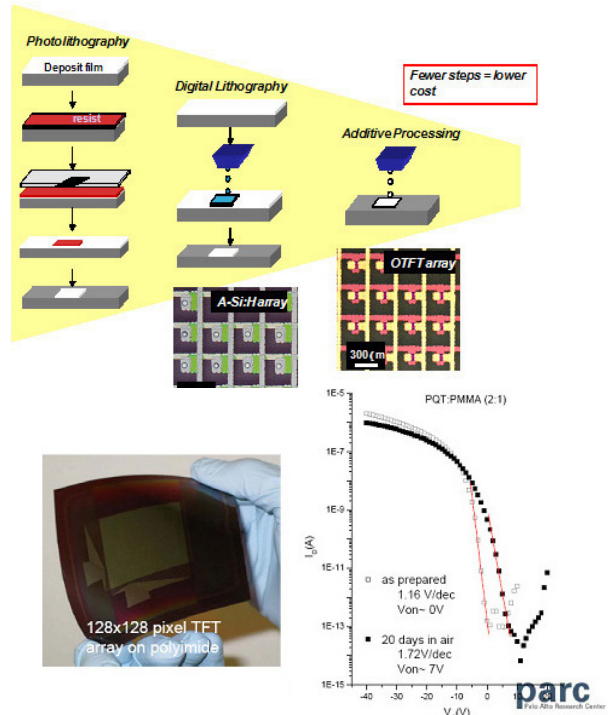


Fig. 12 Additive printing process for TFT array by PARC

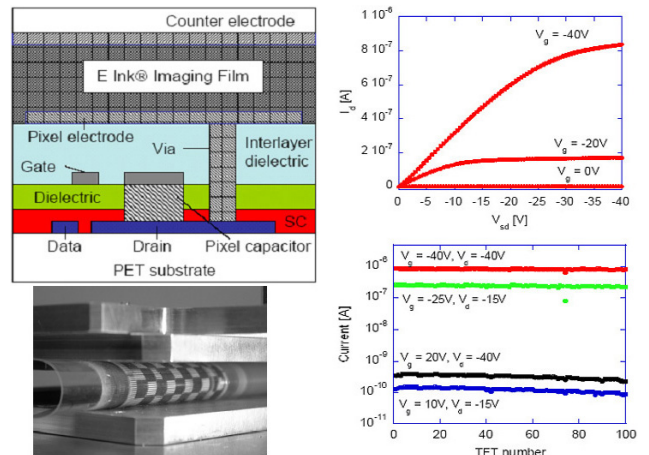


Fig. 13 Ink-jet OTFT process for e-paper application by Plastic Logic

printing line을 $10\mu\text{m}$ 까지 제작이 가능함을 발표하였다. 좀 더 간단한 방법으로 additive printing이 제시되었다. additive processing의 경우에는 patterning 자체가 마치 인쇄 하듯이 단번에 이루어지는 것으로 기존의 lithography공정에 비해 process가 현저하게 줄어 공정의 단순화와 원가 절감이 가능하다. 이러한 digital lithography에 의한 a-Si TFT array와 additive printing OTFT array를 보고하였다. digital lithography 공정의 결과는 기존의 a-Si TFT와 동일한 정도의 전기적 특성을 얻었고, additive printing OTFT는 polythiophene을 사용하여 이동도 $0.1\text{cm}^2/\text{Vs}$ 의 특성과 75dpi, 128×128 all jet printed array를 제작하였다.(Fig. 12) Roger group에서 imprinting 방법으로

OTFT를 제작한 이후에 2008년에는 미국의 Liquidia Technology에서 PRINT(pattern replication in nanowetting template)라는 공정으로 광경화성 perfluoro polyethers로 OTFT를 제작하였다. HP사는 self-aligned implanting lithography을 이용하여 roll-roll 공정에 의해 plastic 기판위에 TFT array를 구현하였다. 영국의 Plastic Logics에서는 inkjet을 이용한 TFT array 구현기술을 개발하여 이미 양산체제를 갖춘 것으로 알려져 있다. 이들은 175 μ m의 PET를 사용하여 유기반도체인 polyfluorene, silver paste gate, PEDIOT/PSS 전극층으로 모든 공정을 inkjet으로 하여 e-paper를 구현하였다.(Fig. 13) Rolltronics는 Flexible Active Matrix Mechanical Switching Arrays (FAS) 기술로 roll-to-roll 공정을 이용한 array 개발을 하였다.

III. 결 론

지금까지 알아본 flexible display용 TFT의 유연성을 위한 기술을 알아보았다. 현재 진행되고 있는 TFT 기술에 대한 일반적인 사항들을 Table 1에 정리하였다. 초기에는 a-Si TFT와 LTPS TFT의 plastic화를 위한 기술의 개발이 주축을 이루었으나 현재는 organic TFT와 oxide TFT를 많이 연구하고 있다. 유연성기판에 따른 공정조건의 변화가 소자의 특성과 그 사용 안정성에 미치는 영향을 간과해서는 안되며, 충분한 reliability를 확보하고 가격에 대한 이점이 있어야 한다. 또한 IC나 주변 부품들의 flexible화도 같이 이루어져야 제대로 된 flexible display에 사용이 가능하게 될 것이다. 현재 organic TFT는 printed electronic의 방법을 사용하는 것이 주류를 이루고, 새롭게 각광을 받는 oxide TFT는 저온공정과 TFT 특성의 우수성으로 기업체를 중심으로 많은 연구와 개발이 이루어지고 있다. 그러나 이러한 연구들은 학계와 연구소에서 기초연구를 병행하며 나아가야 한다. 또한 특허권을 확보할 수 있는 길을 찾아야 국가경쟁력을 유지할 수 있을 것이다. 바람직하게는 어떤 display를 어느 목표로 개발해야 하는지에 대한 기술적 target

[Table 1] flexible display에 적용 가능한 backplane의 비교

	Poly-Si	Amorphous Si	Organic TFT	Oxide TFT
Type	CMOS	NMOS	PMOS	NMOS
Performance:				
Mobility	> 50~150	0.5~1	1~5	1~100
Leakage	OK	Very good	OK	Very good
Stability	Good	Issue	Issue	Issue
Uniformity	Issue	OK	Issue	Good
Manufacturability	Maturing	Excellent	N/A	Dev.
Process Temp	400~600°C	150~300°C	80~120°C	Rt~200°C
Cost	High	Medium	Low ??	Low
Plastic compatibility	Under dev.	Good	Excellent	Excellent

과 killer application에 명확한 roadmap을 가지고 개발에 임하는 것이 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] Flexible Flat Panel Displays, G. Crawford, Ed, SID, John & Wiley & Sons, Ltd, 2005.
- [2] H. Klauk, U. Zschieschang, F. Eder, D. Rohde, G. Schmid, C. Dehm, IEEE Trans. Electron Devices, 52, 618 (2005).
- [3] K. Nomura, H. Ohta, K. Ueda, Y. Kamiya, M. Hiraso, H. Hosono, Science, 300, 1269 (2003).
- [4] K. Nomura, H. Ohta, A. Takagi, T. kamiya, M. Hirano, H. Hosono, Nature, 432, 488 (2004).
- [5] A. C. Arias, S. E. Ready, R. Lujan, W. S. Wong, K. E. Paul, A. Salleo, M. L. Chabiny, R. B. Apte, Y. Wu, P. Liu, B. Ong, R. A. Street, Appl. Phys. Lett. 96, 2063 (2004).
- [6] S. H. K. Park, C. S. Hwang, C. Byun, M. Ryu, J. L. Lee, H. Y. Chu, K. I. Cho, IMID, 1249 (2007).
- [7] A. Chwang, R. Hewitt, K. Urbanik, J. Silvernail, K. Rajan, M. Hack, J.J. Brown, J.P. Lu, C. Shi, J. Ho, R. A. Street, T. Ramos, L. moro, N. Rutherford, K. Tognori, B. Anderson, D. Huffman, SID Digest 37, 1858 (2006).
- [8] C. D. Kim, I. B. Kim, I. . J. Chung, SID Digest, 38, 1669 (2007).
- [9] A. Kattmans, N. Giebink, I. C. Chung, S. Wagner, S. R. Forest, Y. Hong, V. Cannella, J SID, 15, 433 (2007).
- [10] Y. Hong, G. Heiler, R. Kerr, A. Kattmanis, I. C. Cheng, S. Wagner, SID Digest, 37, 1862 (2006).
- [11] M. C. Sung, H. N. Lee, C. N. Nam, S. K. Kang, D. Y. Kim, S. J. Kim, S. K. Kim, H. G. Kim, S. T. Kim, IMID, 7, 133 (2007).
- [12] J. K. Jeong, M. Kim, J. H. Jeong, H. J. Lee, T. K. Ahn, H. S. Shin, K. Y. Kang, H. Seo, J. S. Park, H. Yang, H. J. Chung, Y. G. Mo, H. D. Kim, IMID 7, 145 (2007).
- [13] J. Y. Kwon, K. S. Son, J. S. Jung, T. S. Kim, M. K. Ryu, K. B. Park, J. W. Kim, Y. G. Lee, C. J. Kim, S. I. Kim, Y. S. Park, S. J. Lee, J. M. Kim, IMID, 7, 141 (2007).
- [14] D. U. Jin, J. K. Jeong, T. W. Kim, J. S. Lee, T. K. Ahn, Y. G. Mo, H. K. Chung, SID Digest, 14, 1083 (2006).
- [15] J. H. Ahn, H. S. Kim. K. . J. Lee, S. W. Jeon, S. J. Kang, Y. Sun, R. G. Nuzzo, J. A. Roger, Science, 314, 1754 (2006).
- [16] Plastic Logics data

- [17] S. E. Burns et al, SID Digest 74 (2006).
[18] W. B. Jackson, M. Almanza-Workman, A. Chaiken, R. A. Carcia, A. Jeans, O. Kwon, H. Luo, P. Mei, C. Perlov, C. Taussing, SID Digest, 322 (2008)

저 자 소개



최운섭

1978~1982 : 서울대학교 공과대학 공업화학과 학사, 1982~1984 : 서울대학교 대학원 공학석사, 1992~1997 : U of Akron, Polymer Science 공학박사, 1997~2000 : U of Arizona, Research Associate, 2000~2005 : 삼성SDI 중앙연구소 수석연구원 Flexible OLED Group Leader, 2005~현재 : 호서대학교 디스플레이공학부 교수