

산화물 TFT 기술 및 AMOLED 응용

정재경 (인하대학교 신소재공학과, 화합물반도체 소자연구실)

I. 서론

AMOLED 디스플레이는 2008년 삼성 SDI에서 세계 최초로 양산을 개시하면서 기존 평판디스플레이 시장인 LCD와 PDP를 잇는 차세대 디스플레이로 부각되고 있다. AMOLED는 궁극의 디스플레이에서 요구되는 모든 특징을 보유하여 꿈의 디스플레이로 불리고 있는데, AMOLED는 1) 자발광으로 시야각에 제한이 없는 선명한 화질을 구현하며, 2) 고속응답이 가능하여 빠른 동영상구현이 가능하고, 3) 얇게 만들 수 있는 장점이 있을 뿐만 아니라, 4) 모바일 디스플레이부터 향후 대형 TV까지 전 응용제품에 적용 가능한 이점이 있다.

이직 AMOLED 디스플레이는 주로 소형의 모바일 제품에 제한적으로 적용되고 있는데, 그 주된 이유는 AMOLED 대형화에 필수적인 TFT 기판 기술이 확보되지 않았기 때문이다. 기판 대형화의 관점에서 LCD 기판 기술인 비정질 실리콘 TFT 소자기술은 이미 8세대(기판 크기: 2200× 2500mm) 양산이 진행중이기 때문에 가장 검증된 기술일 뿐만 아니라 제조비 관점에서도 가장 유리하나, 비정질 실리콘 TFT 소자는 구동시간에 따른 심한 문턱전압의 이동으로 인해 AMOLED 디스플레이 적용이 매우 어렵다는 치명적이 단점이 있다. 이는 LCD의 경우 구동소자가 단순 스위치의 기능만 하는데 비해, AMOLED에서는 안정적 전류를 공급하는 드라이버의 기능도 요구되기 때문이다.

현재 4세대(기판크기: 730× 920mm) 양산중인 AMOLED

디스플레이는 엑시머 레이저 결정화(ELA)에 의한 다결정 실리콘 TFT 기술이 적용 중에 있으나 레이저 에너지 밀도, Shot 수, Shot overlap 등의 공정마진이 매우 작고, 결정화 장비 비용 및 유지 비용이 높으며, 단위시간당 생산량에 제한이 있기 때문에 노트북, TV와 같은 중대형 제품을 생산하는데 적합하지 않다. 이에 대한 대안으로 대면적 결정화를 위해 마스크를 이용하여 엑시머 레이저를 조사한 후 다결정 실리콘을 형성하는 SLS (sequential lateral solidification) 기술을 삼성등과 같은 대기업에서 개발 진행 중이나 여전히 유지비용이 고가이고 shot 자국이 발생하는 본질적인 단점은 아직 극복되지 못하고 있다. 상술한 기존 실리콘 기반의 TFT 기술의 대안으로 현재 가장 유력한 기술은 ZnO 기반 산화물 TFT 소자이다. [표 1]에 비정질 실리콘 TFT, 폴리 실리콘 TFT 및 산화물 TFT 소자의 장단점을 비교하였다. 먼저 산화물 TFT 소자의 경우에는 별도의 결정화와 도핑공정을 필요로 하지 않기 때문에 기판대형화라는 관점에서 폴리 실리콘과 비교했을 때에 매우 유리하다. 현재까지 8세대 이상의 기판규격에서 산화물 TFT 소자 기술의 검증이 완성된 상태는 아니나, 산화물 반도체 증착방법인 DC 혹은 AC 스퍼터링법의 경우 이론적으로는 8세대이상이 가능하다. TFT 소자특성중 대표적인 파라미터인 이동도의 경우 산화물 TFT 소자는 비정질 실리콘 TFT 소자에 비해 10배이상 우수한 약 $10\text{cm}^2/\text{Vs}$ 의 수준을 갖는데, 따라서 노트북 혹은 HDTV AMOLED의 제품에 backplane으로 사용되기에 충분한 값으로 인식되고 있다. [표 1]에서 살펴볼 수 있듯

[표 1] 비정질 실리콘, 폴리 실리콘 및 산화물 TFT 소자의 장단점 비교

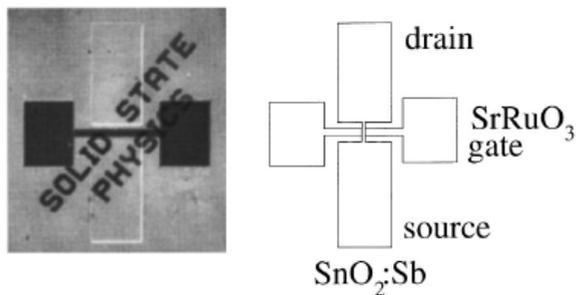
	a-Si TFT	poly-Si TFT	Oxide TFT
세대	8G	4G	8G
반도체	amorphous Si	polycrystalline Si	amorphous InGaZnO
TFT 균일도	Good	Poor	Good
이동도	1cm ² /Vs	~100cm ² /Vs	>10cm ² /Vs
마스크 수	4-5	5-11	4-5
제조비용	Low	High	Low
신뢰성(10 ⁵ hr)	$\Delta V_{th} > 5V$	$\Delta V_{th} < 0.5V$	$\Delta V_{th} < 1.0V$
회로내장	No	Yes	Yes

이 산화물 TFT 소자는 비정질 실리콘과 폴리실리콘 TFT 소자의 고유한 장점을 동시에 보유하고 있음을 알 수 있다.

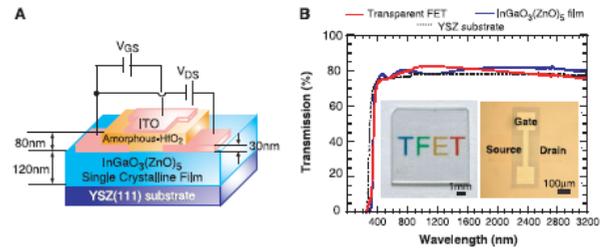
II. 산화물 TFT 소자 기술

역사적으로 최초의 산화물 TFT는 필립스 연구소에서 1995년에 SnO₂ 산화물 반도체를 강유전체 성질을 갖는 게이트 절연막에 적용하여 메모리소자로 사용하기 위한 목적으로 연구되었다. [그림 1] 물론 이때 제작된 트랜지스터 소자의 성능은 Ion/off비가 100에 불과하여 제대로 TFT의 특성을 보인다고 하기 힘든 수준이었다.^[1]

그 후 2003년에 ZnO 박막을 고온에서 적절히 열처리를 하면 TFT 소자의 채널로써의 특성을 보이는 결과가 미국 Oregon 대학의 Wager 교수 그룹에 의해 발표되었다. 그러나 제작된 소자의 이동도는 0.3~2.5cm²/Vs, 문턱전압은 10~20V 정도의 값이었기 때문에 실제 디스플레이



[그림 1] 제작된 SnO₂ 트랜지스터 사진과 개략도



[그림 2] 투명 TFT 소자 구조의 단면도와 제작된 투명 소자의 실제 투과도

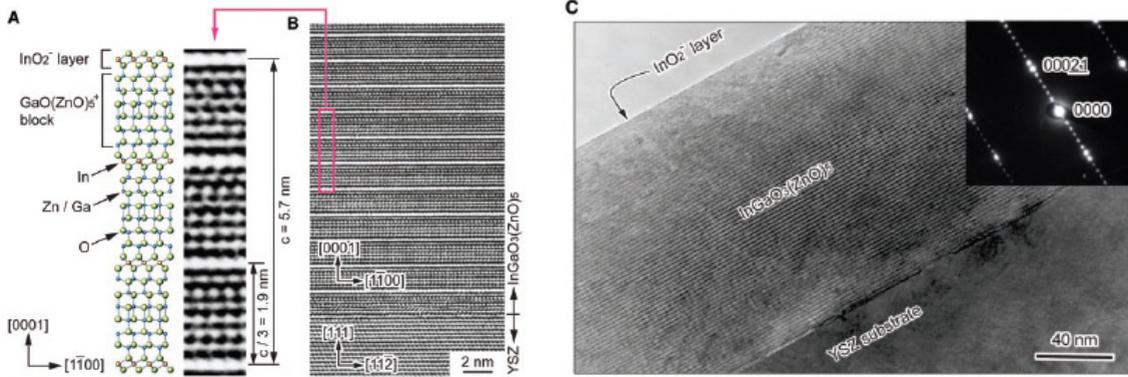
TFT 소자로 사용되기엔 여전히 부족한 수준이었다.^[2]

한편, 일본 동경공대의 Hosono 교수 연구팀에서는 InGaO₃(ZnO)₅ 결정을 이용하여 대단히 높은 전하이동도 (80cm²/Vs)와 비교적 우수한 10⁵의 Ion/off비를 갖는 투명한 TFT 소자 제작을 발표하였다. [그림 2, ^[3]

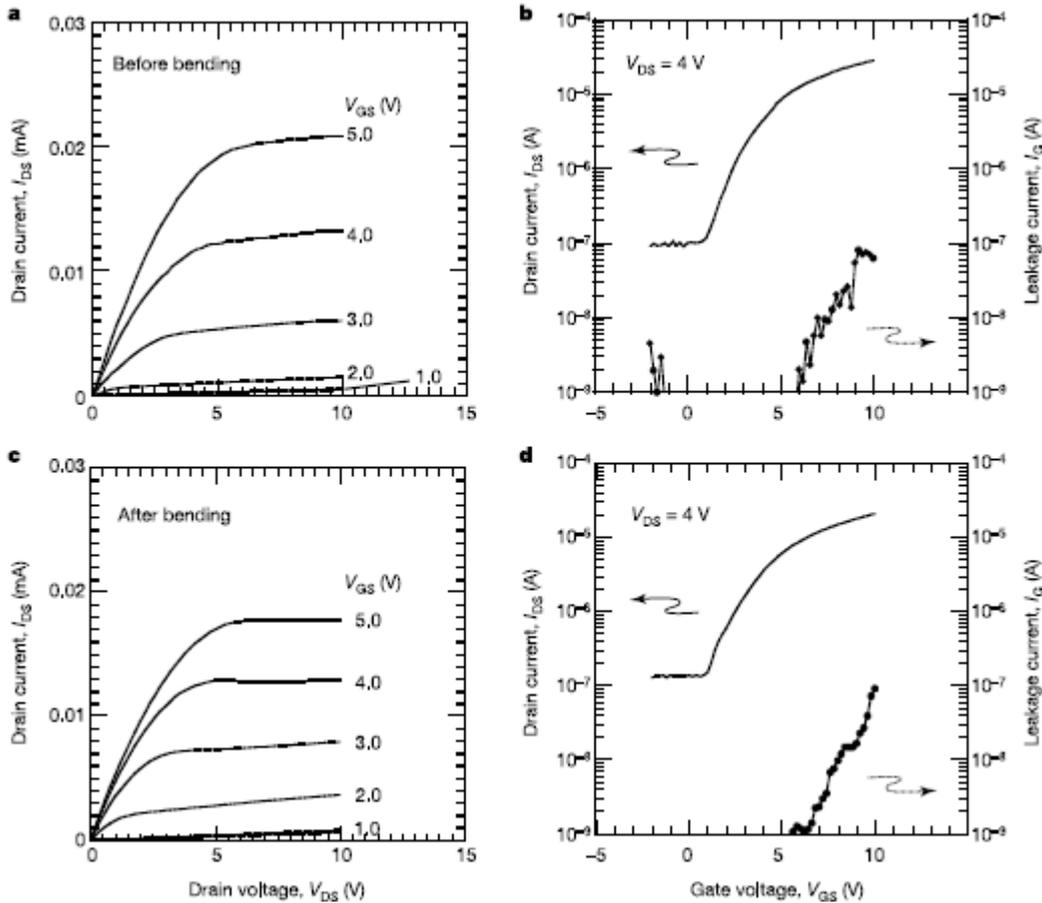
트랜지스터 채널물질은 InO₂⁺층과 GaO(ZnO)₅⁺층이 반복적으로 배열되어 있는 초격자구조를 갖고 있으며 [0001]방향으로의 전하이동도가 높은 것으로 추정되었다. [그림 3] 그러나 상기 소자는 1400°C이상의 고온 열처리를 요구하기 때문에 실제 디스플레이 소자로써의 응용이 거의 불가능한 단점이 있었다.

현재와 같은 산화물 TFT 소자기술에 대한 전세계적인 연구 및 개발의 계기는 동대학의 Hosono 교수 그룹에서 Nature 지에 2004년에 비정질 InGaZnO (IGZO) 박막을 이용한 TFT소자 제작을 발표하고 난 이후이다.^[4] 특히 비정질 IGZO 박막의 경우에는 Pulsed Laser Deposition (PLD) 방법을 이용하여 상온에서 증착이 가능하기 때문에 플라스틱 기판위에서도 이동도 10cm²/Vs, Ion/off비 10⁶의 우수한 TFT 특성을 보여주고 있다.

이들은 산화물에서 금속의 최외각 전자중 방향에 따른 비등방성이 가장 작은 s-오비탈 파동함수 overlap이 전자의 밴드 전하 수송에 기여하기 때문에 비정질 박막임에도 불구하고 10cm²/Vs이상의 높은 이동도를 가질 수 있다고 설명하였다. 이에 비해 실리콘 반도체의 경우는 전자전도대가 sp³ 오비탈의 반결합에 의해 형성되는데, 사면체 방향으로의 전자존재 방향성을 갖기 때문에 다이아몬드 결정구조를 가질 때의 약 1000cm²/Vs 정도의 이동도가 비정질상으로 변화하면 많은 gap states 생성으로 인해 불과 1cm²/Vs 수준의 이동도를 갖게 되는 것으로 이해할 수 있



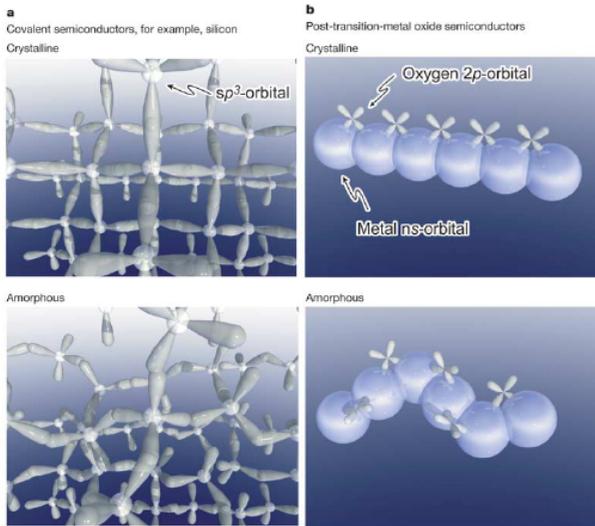
[그림 3] 단결정 InGaO₃(ZnO)₅ 층상 결정 구조 및 고분해능 전자현미경 이미지



[그림 4] Bending 전후의 InGaZnO TFT 소자 특성 (구부러도 변화 없음)

다. 그리고 기존 ZnO 등의 다결정 산화물 박막에 비하여 소자의 높은 이동도 및 균일도 확보 측면에서 재료의 가치우위를 가질 수 있다고 주장하였다. [그림 5]

Hosono 교수 그룹의 발표 이후^[3,4] 전세계적으로 산화물 트랜지스터의 연구는 매우 활발하게 진행되어 오고 있다. 최근까지 연구된 내용은 주로 산화물 트랜지스터의 이동



[그림 5] 실리콘과 InGaZnO 반도체 재료의 오비탈 구조 비교

도, 게이트 스윙, $I_{on/off}$ 비 등의 디바이스 특성을 개선하기 위한 방향이었는데, 크게 분류하면 1) 고성능을 갖는 신규 반도체 재료 자체를 개발하거나, 2) 접촉저항을 감소시키기 위한 공정 및 소자구조 연구, 3) 저전압구동을 위한 고유전박막을 게이트 절연막으로 대체하려는 시도가 최근 집중적으로 연구되고 있다.

1. 산화물 채널 물질 연구

지금까지 연구된 반도체 채널 재료는 ZnO, In_2O_3 , InZnO, ZnSnO, InGaZnO, ZnGaSnO 등과 같이 매우 다양하다. 가장 대표적인 광대역반도체 재료는 ZnO 반도체인데, 주로 UV 감지소자, LED와 같은 광소자, SAW 필터와 같은 압전소자 등의 적용을 목표로 많은 연구가 진행되어 왔으며, TFT 소자의 채널재료로의 집중적인 관심은 2004년 Fortunato 그룹이 $20cm^2/Vs$ 이상의 고이동도 특성을 갖는 ZnO 트랜지스터 제작을 발표하고 난 이후에 시작되었다.^[5] 그러나 ZnO 박막은 증착과정에서 결정화가 매우 쉽게 발생하기 때문에 대면적향에 적합한 비정질상을 얻기가 쉽지 않고, 결정입계의 존재 때문에 TFT 소자의 이동도 및 문턱전압 산포 문제가 발생할 가능성이 높은 단점이 있다.

평판디스플레이 소자의 투명 전도막으로 널리 이용되는 InSnO와 InZnO 박막은 증착중 산소분압을 적절히 증

가시킴으로써 반도체 성질을 띠게 제작할 수 있고, 비교적 높은 이동도를 갖을 수 있으나 공통적으로 In 양이온 함유량이 많이 누설전류가 높고, 경시 변화 문제점과 열악한 DC, 광 신뢰성의 문제점이 있다.

InGaZnO 반도체 재료는 In_2O_3 는 이동도 개선제로, ZnO는 네트워크 형성제로, Ga_2O_3 는 전하억제 및 네트워크 안정제로 역할을 하기 때문에 가장 우수한 신뢰성을 갖는 산화물 반도체 재료중에 하나이다.^[6] 그러면서도 이동도 $10cm^2/Vs$ 이상의 특성을 갖고 TFT 특성 최적화도 비교적 용이하여 삼성, LG, Cannon과 같은 대기업에서 집중적으로 연구 및 개발이 진행되어 왔다.^[7-9] 그래서 대부분의 산화물 TFT 소자가 적용된 AMOLED 패널은 InGaZnO 산화물 반도체를 사용하였다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 In 및 Ga 원자는 대표적인 희유금속일 뿐만 아니라 가격 또한 높기 때문에 최근에는 In, Ga이 적게 포함되거나 혹은 포함되지 않는 새로운 다성분계 채널재료에 대한 탐색도 활발하게 진행 중에 있다.^[10-11] 이런 관점에서 전세계 매장량이 풍부한 ZnO, SnO_2 의 이성분계 산화물인 ZnSnO 반도체 재료에 관심이 쏠리고 있다.^[12-13] 그러나 아직까지도 Sn 원자의 정확한 물리적, 전기적인 역할규명이 미흡하고, ZnSnO 이성분계만으로 기존 InGaZnO TFT 소자특성 및 신뢰성에 근접한 특성을 확보할 수 있는지의 여부는 확실치 않다.

2. 산화물 반도체의 오믹 접합 기술

산화물 TFT 기술의 가장 큰 장점 중에 하나는 sputtering법으로 형성된 반도체 박막이 별도의 도핑 공정을 진행하지 않아도 $10^{15} \sim 10^{18}cm^{-3}$ 사이의 전하농도를 갖는 n-type의 비의도적 도핑이 된다는 점이다. 따라서 고가의 이온주입 장비 개발 및 도핑 공정을 생략할 수 있기 때문에 폴리 실리콘 TFT에 비해 가격경쟁력이 우수하다. 그러나 다른 관점에서 보면 이러한 사실 때문에 발생하는 채널과 소스, 드레인 전극과의 접촉저항 문제는 반드시 해결해야할 이슈이다. 실리콘 반도체 혹은 디스플레이의 실리콘 기반의 소자에서는 소스/드레인 부분의 오믹 접합을 위해서 이온주입, in-situ 도핑, 혹은 확산 공정을 통해 선택적으로 $10^{20}/cm^3$ 이상의 고농도 도핑을 실시하기 때문

에 완벽에 가까운 접촉저항 특성을 확보할 수 있으나 산화물 TFT 소자의 경우에는 이러한 접근방법이 불가능하기 때문이다. 그래서 지금까지 진행된 접촉저항을 감소시킬 수 있는 방법으로는 1) 플라즈마 처리를 통해 산화물 반도체의 산소결핍을 유발하여 전극과 접합하는 영역의 국부적인 전자농도를 증가시키거나^[14] 혹은 2) 산화물 반도체에서 도판트로 작용하는 수소를 선택적으로 주입하는 방법^[15,16] 등이 제시되어 왔다.

3. 고유전절연막 적용 산화물 TFT 소자

산화물 TFT 기술의 가장 큰 장점 중에 하나는 반도체 박막의 형성이 고온을 필요로 하지 않는 PVD(physical vapor deposition)법이기 때문에 플라스틱을 기판으로 소자제작이 가능하고 따라서 플렉서블 디스플레이의 구동소자로의 적용이 가능하다는 점이다. 그러나 플렉서블 디스플레이 혹은 모바일 디스플레이와 같은 배터리에 의해 전원이 공급되는 디바이스는 아직까지도 한번 충전으로 사용가능시간에 충분치 않기 때문에 필연적으로 소비전력을 감소시키는 방향으로 기술 개발이 진행되어야 한다. 일반적으로 고유전체박막을 게이트 절연막으로 TFT에 적용하게 되면 게이트와 채널사이의 전하충전용량을 증가시키므로써 게이트 스윙과 구동전압을 감소시키는데 매우 효과적이다. 이러한 이유 때문에 산화물 TFT 소자에 고유전체 박막을 게이트 절연막으로 적용한 연구결과가 최근에 발표되었다. 지금까지 주로 연구된 물질에는 Al_2O_3 ($k \sim 8$,^[17,18]) HfO_2 ($k \sim 16$,^[19]), Y_2O_3 ($k \sim 18$,^[7]), BZN ($k \sim 51$,^[20]), TiO_2 ($k \sim 40$,^[21]) 등과 같은 주로 실리콘 반도체 기술에서 연구되었던 재료들이다. 이러한 고유전체박막을 절연막으로 사용하게 되면 구동전압을 감소시킬 수 있고, 게이트 스윙 특성을 개선시킬 수 있으나 게이트 누설전류의 증가, 소자의 전하 이동도의 저하와 같은 문제점 또한 해결이 필요한 이슈들이다. 또한 산화물 반도체와 상기 고유전체 박막 계면사이의 화학적 안정성 및 계면 트랩 등과 같은 상세 연구 분야도 아직 초기 단계라고 할 수 있다.

III. 산화물 TFT의 AMOLED 응용

산화물 TFT 소자가 최초로 평판디스플레이 구동소자로 적용된 것은 2006년 일본 Kochi대학교와 Casio사의 1.4 인치의 AMLCD이다.^[22] 상기 디바이스는 ZnO 박막채료를 반도체층으로 이용하였고, 반도체층 위에 게이트 절연막이 형성되는 탑 게이트 구조를 채용하였다. 이는 ZnO 박막의 결정성장이 초기에는 전위, 결정립 입계 등의 결함이 많이 형성되다가 두께가 증가하는 방향으로 결정성이 개선되면서 결함밀도가 감소하는 특성을 나타내는데, 탑 게이트 소자의 경우에는 트랜지스터가 켜질 때의 전도 채널이 반도체 상부층에 형성되기 때문에 상대적으로 우수한 계면특성을 이용할 수 있기 때문이다.

산화물 TFT를 이용한 최초 AMOLED 디스플레이 시제품은 2007년 LG전자에 의해 제작되었다. [그림 6] SID 2007년 학회에서 시연된 디스플레이는 3.5인치의 크기를 갖고, QCIF+ (176×RGB×220)의 해상도이며, 화소회로는 가장 기본적인 2Tr + 1Cap으로 구성되었다.^[23] Casio사와 마찬가지로 LG전자의 경우에도 TFT 소자 구조는 탑 게이트 구조였으며, 차이점은 반도체 채널을 ZnO 박막이 아닌 InGaZnO 박막채료를 사용한 점이였다.

같은 해 8월에 개최되었던 IMID 학회에서 LG전자는 0.1mm 두께의 스테인레스 포일을 기판으로 사용하여 3.5인치 플렉시블 AMOLED를 제작하였는데 기판이 휘어진 상태에서도 정지화상 및 동영상 구동이 가능함을 시연하



[그림 6] 산화물 TFT 소자기술이 적용된 3.5인치 AMOLED 패널 사진

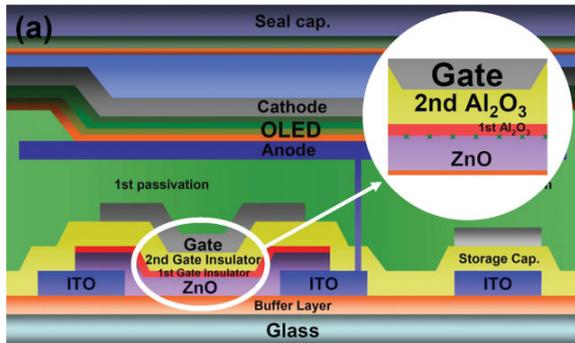


[그림 7] 금속 기판상에 산화물 TFT 소자를 이용하여 제작한 3.5인치 플렉서블 AM OLED 이미지

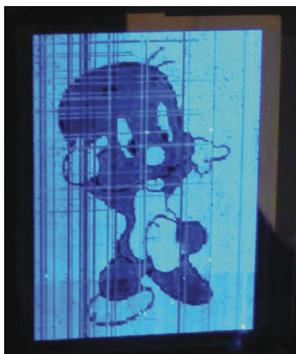
였다. [그림 7]

2008년 한국전자통신연구원에서는 ALD법에 의해 증착된 ZnO 박막을 반도체 채널로 사용한 TFT 소자에 의해 구동되는 2.5인치 투명 AMOLED 패널 개발을 발표하였다.^[24] LG전자와 마찬가지로 탑 게이트 TFT 소자 구조를 채택[그림 8]하였으며 제작된 TFT 소자 특성은 소자 이동도 $\sim 4\text{cm}^2/\text{Vs}$, Ion/off 비는 10^7 수준이었다.

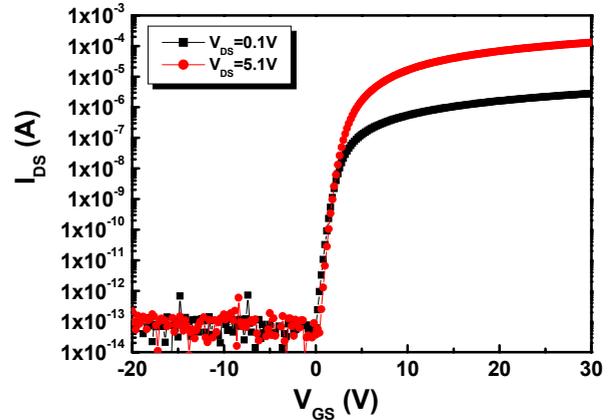
2008년 삼성 SDI에서는 InGaZnO TFT 소자를 이용하



[그림 8] ZnO TFT-AMOLED 패널의 단면도



[그림 9] Mono-blue 2.5인치 AMOLED 패널 사진



[그림 10] 패널에 실제 적용된 바텀 게이트 구조의 InGaZnO TFT 소자의 transfer 특성

여 full-color 12.1인치 AMOLED 패널 시제품을 SID 학회에서 전시하였다.^[25] 실제 AMOLED 패널에 적용된 산화물 소자는 LG 전자 및 한국전자통신연구원과는 다른 바텀 게이트 구조였고 제작된 소자 성능은 이동도 $20\text{cm}^2/\text{Vs}$, 게이트 스윙 $0.27\text{V}/\text{decade}$ 및 Ion/off 비 10^9 수준의 특성이었다. [그림 10] 그리고 제작된 패널의 해상도는 WXGA ($1280 \times \text{RGB} \times 765$)로써 현재 노트북에 채용중인 TFT-LCD 패널의 해상도와 동일한 수준일 뿐만 아니라 2Tr+1Cap의 기본화소회소를 이용하였음에도 불구하고 고품위의 화질특성을 가질 수 있음을 제시하였다.[그림 11]

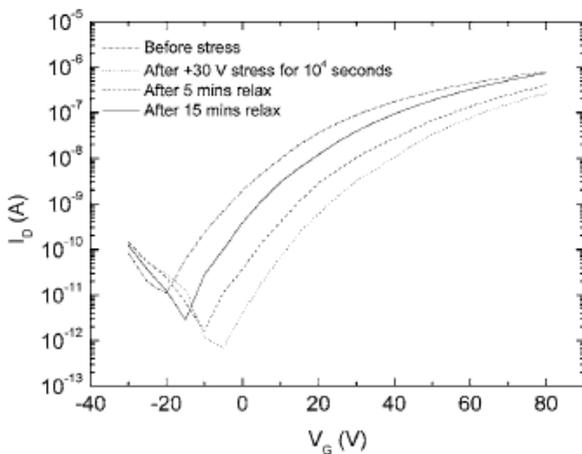


[그림 11] 바텀 게이트 구조의 InGaZnO TFT소자가 적용된 12.1인치 AMOLED 패널 사진

IV. 향후 전망

본 기술특집에서 살펴본바와 같이 산화물 TFT 소자 기술은 최근 눈부실만한 속도로 발전하고 있으나 앞으로 AMOLED 디스플레이 기반 기술로 적용되기 위해서는 극복해야 할 기술적 난관도 많다. 가장 중요한 문제는 산화물 TFT 소자의 DC 신뢰성이다. 양의 게이트 전압을 인가하면 스트레스 시간이 경과함에 따라 트랜지스터의 문턱전압이 양의 방향으로 이동하는 현상인데 [그림 12], 예를 들어 기존 OLED 소자 구동시에 NMOS TFT 기관의 문턱전압이 0.2V만큼 증가하면 수십%의 휘도변화로 직결되어 image sticking 혹은 화면 불균일성을 초래하기 때문이다.

이러한 소자 불안정성은 온도가 증가할수록 혹은 산화물 반도체층에 노출되는 주변광의 강도가 증가할수록 가속되기 때문에 반드시 상세한 원인계 분석이 필요하다. 비정질 실리콘소자의 경우에서도 게이트 전압인가에 따른 문턱전압의 열화는 흔히 관찰되는데, 주로 채널과 게이트 절연막 계면으로의 전하 트랩핑 혹은 게이트 절연막으로의 전하주입으로 설명하고 있다. 이러한 현상적인 설명을 산화물 TFT 소자에 적용하여 전하 주입 혹은 전하 트랩핑이 산화물 트랜지스터 소자의 불안정성 원인이라고 주장하는 논문도 다수 있으나^[26-29], 산화물 TFT 채널



[그림 12] ZnO TFT 소자에 +30V 게이트 전압이 104초 동안 인가시에 관찰되는 소자 특성 열화^[26]

재료로 널리 사용되는 ZnO 및 SnO₂ 물질이 산소 센서 혹은 수분 센서로도 이용된다는 사실을 고려하면 기존 원인에 이러한 대기 중의 산소 및 수분 등이 전기적 스트레스 인가시에 미치는 동력학적 인과관계까지도 폭넓게 고려되어야만 총체적인 산화물 TFT 소자의 열화기구에 대한 이해가 가능할 것으로 판단된다.^[30] 또한 이러한 산화물 TFT 소자특성의 열화기구 이해는 폴리실리콘 TFT 소자의 신뢰성과 비슷한 수준의 강건한 산화물 TFT 소자 기술을 확보하는데도 크게 기여할 것이다.

둘째 현재 대부분의 대기업에서 개발중인 InGaZnO 산화물 반도체는 삼성분계의 조성으로 매우 복잡한데 이와 관련된 여러 기술적 이슈에 대한 고민도 필요하다. 예를 들면 삼성분계 타깃 제작의 재현성 혹은 타깃에 포함되는 수소와 같은 불순물 함유량의 제어, 스퍼터링법에 의한 산화물 반도체층 증착 공정 중에 경시변화 없는 산소 분압 제어 및 양이온, 혹은 양이온/음이온 조성 제어, 반도체 패터닝 이후 대기 방치에 따른 소자 열화를 최소화 할 수 있는 소자 집적공정 최적화 등의 관점에서 많은 연구 개발이 필요하다.

마지막으로 산화물 TFT 소자 기술은 산화물 반도체 자체가 투명하고 저온공정이 가능하기 때문에 향후 투명 디스플레이 혹은 플렉서블 디스플레이 분야의 구동소자로도 매우 유망한데, 이러한 분야의 응용이 가속화되기 위해서는 저온공정에서도 우수한 소자 특성을 갖는 산화물 반도체 소재 개발, 이에 부합하는 저온 게이트 절연막 및 패시베이션 기술 개발이 병행되어야 할 것이다. 특히 공정관점에서 초저원가 제조비용의 접근을 하기 위해서는 현재 사용하고 있는 진공증착 및 복잡한 리소그라피 공정을 생략할 수 있는 인쇄법등과 같은 신공정에 의한 산화물 반도체 패터닝 기술 및 소자 특성 확보에도 많은 산학연 협동 연구 및 개발이 절실함은 물론이다.

참고문헌

[1] M. W. J. Prins, K. O. Grosse-Holz, G. Muller, J. F. M. Cillessen, J. B. Giesbers, R. P. Weening, and R. M. Wolf, Appl. Phys. Lett, 68, 3650 (1996).

[2] R. L. Hoffman, B. J. Norris, and J. F. Wager, Appl. Phys. Lett, 82, 733 (2003).

[3] K. Nomura, H. Ohta, K. Ueda, T. Kamiya, M. Hirano, and H. Hosono, Science 300, 1269 (2003).

[4] K. Nomura, H. Ohta, A. Takagi, T. Kamiya, M. Hirano, and H. Hosono, Nature 432, 488 (2004).

[5] E. M. C. Fortunato, P. M. C. Barquinha, A. C. M. B. G. Pimentel, A. M. F. Goncalves, A. J. S. Marques, R. F. P. Martins, and L. M. N. Pereira, Appl. Phys. Letts, 85, 2541 (2004).

[6] H. Hosono, J. Non-Cryst. Solids, 352, 851 (2006.)

[7] H. Yabuta, M. Sano, K. Abe, T. Aiba, K. Nomura, T. Kamiya, and H. Hosono, Appl. Phys. Lett, 89, 112123 (2006).

[8] M. Kim, J. H. Jeong, H. J. Lee, T. K. Ahn, H. S. Shin, J.-S. Park, J. K. Jeong, Y.-G. Mo, and H. D. Kim, Appl. Phys. Lett, 90, 212114 (2007).

[9] J. K. Jeong, J. H. Jeong, H. W. Yang, J.-S. Park, Y.-G. Mo, and H. D. Kim, Appl. Phys. Lett, 91, 113505 (2007).

[10] E. M. C. Fortunato, L. M. N. Pereira, P. M. C. Barquinha, A. M. B. Rego, G. Goncalves, A. Vila, J. R. Morante, and R. F. P. Martins, Appl. Phys. Lett, 92, 222103 (2008).

[11] A. Chipman, Nature (London), 449, 131 (2007).

[12] W. B. Jackson, R. L. Hoffman, and G. S. Herman, Appl. Phys. Lett, 87, 193503 (2005).

[13] H. Q. Chiang, J. F. Wager, and R. L. Hoffman, Appl. Phys. Lett, 86, 013503 (2005).

[14] J. S. Park, J. K. Jeong, Y.-G. Mo, H. D. Kim, and S.-I. Kim, Appl. Phys. Lett, 90, 262106 (2007).

[15] B. D. Ahn, H. S. Shin, H. J. Kim, J.-S. Park, and J. K. Jeong, Appl. Phys. Lett, 93, 203506 (2008).

[16] A. Sato, K. Abe, R. Hayashi, H. Kumomi, K. Namura, T. Kamiya, M. Hirano, and H. Hosono, Appl. Phys. Lett, 94, 133502 (2009).

[17] S. H. Park, C. S. Hwang, H. Y. Jeong, H. Y. Chu, and K. I. Cho, Electrochem. Solid-State Lett, 11, H10 (2008).

[18] D. H. Levy, D. Freeman, S. F. Nelson, P. J. Cowdery-Corvan, and L. M. Irving, Appl. Phys. Lett, 92, 192101 (2008).

[19] K. Nomura, H. Ohta, K. Ueda, T. Kamiya, M. Hirano, and H. Hosono, Science 300, 1269 (2003).

[20] I. D. Kim, M. H. Lim, K. T. Kang, H. G. Kim, and S. Y. Choi, Appl. Phys. Lett, 89, 022905 (2006).

[21] J.-S. Park, J. K. Jeong, Y.-G. Mo, and S. Kim, Appl. Phys. Lett, 94, 042105 (2009).

[22] T. Hirao, M. Furuta, H. Furuta, T. Matsuda, T. Hiramatsu, H. Hokari, M. Yoshida, H. Ishii, and M. Kakegawa, J. Soc. Inf. Display 15, 17 (2007).

[23] H.-N. Lee, J. Kyung, M.-C. Sung, D. Y. Kim, S. K. Kang, S.-J. Kim, C. N. Kim, H.-G. Kim, and S.-T. Kim, J. Soc. Inf. Display 16, 265 (2008).

[24] S.-H. K. Park, C.-S. Hwang, M. Ryu, S. Yang, C. Byun, J. Shin, J.-I. Lee, K. Lee, M. S. Oh, and S. Im, Adv. Mater. 21, 678 (2009).

[25] J. K. Jeong, J. H. Jeong, H. W. Yang, T. K. Ahn, M. Kim, K. S. Kim, B. S. Gu, H.-J. Chung, J.-S. Park, Y.-G. Mo, H. D. Kim, and H. K. Chung, J. Soc. Inf. Display 17, 95 (2009).

[26] R. B. M. Cross and M. M. De. Souza, Appl. Phys. Lett, 89, 263513 (2006).

[27] P. Gorm, P. Holzer, T. Riedl, W. Kowalsky, J. Wang, T. Weimann, P. Hinze, and S. Kipp, Appl. Phys. Lett, 90, 063502 (2007).

[28] Y. Vygranenko, K. Wang, and A. Nathan, Appl. Phys. Lett, 91, 263508 (2007).

[29] A. Suresh and J. F. Muth, Appl. Phys. Lett, 92, 033502 (2008).

[30] J. K. Jeong, H. W. Yang, J. H. Jeong, Y.-G. Mo, and H. D. Kim, Appl. Phys. Lett, 93, 123508 (2008).

저 자 약 력

정 재 경



- 1997년 : 서울대학교 무기재료공학과 공학사
- 1999년 : 서울대학교 재료공학부 공학석사
- 2002년 : 서울대학교 재료공학부 공학박사
- 2004년 : 일리노이 주립대학 (UIUC) 박사 후연수
- 2009년 : 삼성 SDI 중앙연구소 책임연구원
- 2009년~현재 : 인하대학교 신소재공학과 조교수

• 관심분야 : 산화물 TFT, AMOLED, 플렉서블 electronics